



ROYAUME DU MAROC

Académie Hassan II des Sciences et Techniques

**ACTES
DE LA SESSION PLÉNIÈRE SOLENNELLE**

Année 2013

Rabat : 20 - 22 février 2013



**Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu Le garde,
Protecteur de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques**



ROYAUME DU MAROC

Académie Hassan II des Sciences et Techniques

**ACTES
DE LA SESSION PLÉNIÈRE SOLENNELLE**

Année 2013

Rabat : 20 - 22 février 2013

© Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Rabat
Km 4, Avenue Mohammed VI (ex Route des Zaers)
Rabat, Royaume du Maroc

Dépôt légal : 2013 MO 2557
ISBN : 978-9954-520-09-3

Réalisation : **AGRI-BYS S.A.R.L.** (A.U)

Achevé d'imprimer :
Imprimerie Lawne : 11, rue Dakar, Océan, 10040-Rabat, Maroc

SOMMAIRE

Avant-propos	9
Forword	11
CÉRÉMONIE D'OUVERTURE.....	13
Mot du Directeur des Séances	
Rajae El Aouad	15
Discours d'ouverture du Secrétaire Perpétuel	
Omar Fassi-Fehri	17
Où en est-on dans la compréhension des mécanismes qui régissent la matière?	
Catherine Bréchnac.....	23
Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des «chat de Schrödinger» de lumière	
Serge Haroche.....	33
Les mathématiques et la physique un mariage heureux «Quelques réflexions sur les tribulations de l'entropie, allant et venant entre mathématique et physique»	
Cédric Villani	45
Désignation du nouveau Directeur des Séances	55
SESSION PLÉNIÈRE I : PHYSIQUE DES HAUTES ENERGIES ET SCIENCES DE L'UNIVERS	57
Origine de la structuration de l'univers et nature de l'énergie noire	
Jean-Michel Alimi	59
A la recherche du boson de Higgs et au-delà	
Jonathan R. Ellis	95
Introduction to Standard Model of Electro-Weak Interactions	
El Hassan Saidi	103
SESSION PLÉNIÈRE II : PHYSIQUE QUANTIQUE, MATIÈRE CONDENSÉE ET MATIÈRE MOLLE.....	153
Dynamics of Soft, Biological Interfaces	
Gerald G. Fuller	155

Les corrélatons quantiques en théorie quantique de l'information	
Mohamed Daoud	159

Packing of wires in cavities and growing surfaces	
Hans Hermann	175

Nouvelles fonctionnalités et applications de matériaux pour la spintronique	
Abdelilah Benyoussef	177

Sesion Parallèle 1 : Physique en Sciences de la vie

La Tomographie d'Emissionà Positrons : TEP	
Nezha Ben Raiss, Rajaa Cherkaoui	195

Gamma knife radiosurgery : an advanced neurosurgical therapeutic method and privileged field of applying physics to medicine	
Abdesslam El Khamlichi	205

Radiothérapie au Maroc : passé, présent et futur	
Abdellatif Benider.....	221

Sesion Parallèle 2 : Physique et Agronomie

Agriculture instrumentation as one of the opportunities for international cooperation in science and technology, specifically between Brazil and Morocco	
Silvio Crestana	225

La télédétection en agriculture	
Mohamed Ettarid	227

La prédiction agrométéorologique des rendements céréaliers au Maroc	
Riad Balaghi.....	239

Sesion Parallèle 3 : Physique et Sciences économiques

Introduction : quand la physique s'invite dans l'économie	
Rachid Benmokhtar Benabdellah	247

L'économie expérimentale : quel rapport à la physique	
Guillaume Hollard	249

China's economic development	
Yu Yongding.....	251

SESSION PLÉNIÈRE III : PHYSIQUE ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR.....265

Instrumentation pour les lasers à impulsions ultra-courtes	
Daniel Kaplan	267

Matériaux cellulaires pour des applications piézoélectriques Mostapha Bousmina.....	273
L'expérimentation a-t-elle (encore) sa place en mécanique des matériaux? André Zaoui	275
Revisiting the pasteur quadrant, post-normal science and strategies for research on natural hazards and disasters Juan Carlos Castilla.....	277
Cérémonie d'accueil des nouveaux membres	289
<i>Session Parallèle 4 : Physique, Physique-Chimie</i>	
Etude de l'efficacité des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie mécanique Yahia Boughaleb	297
Contribution au développement et à la réalisation des cellules photovoltaïques organiques Mohammed Addou.....	325
Ecole Doctorale de Marseille Mossadek Talby	239
Structural, magnetic and electronic studies of LaFe13-xSix magnetocaloric compounds Hassan Lassri	343
Photogenerating work from polymers: light induced molecular movement and nanopatterning Zouheir Sekkat	359
Propriétés magnétiques de quelques systèmes exotiques mono et tridimensionnels Mohamed Belaiche	377
<i>Session Parallèle 5 : Physique et Sciences de la Terre et de l'Environnement</i>	
From the atlas to the rif a crustal seismic image across Morocco Ramon Carbonell	381
Thermochronologie par traces de fission sur apatite et mouvements verticaux de la meseta occidentale marocaine Omar Saddiqi	397
Space geodesy for geodynamic and earthquake research in morocco Robert Reilinger.....	417
A Climate-Driven model and development of a floating-point timescale for the middle devonian eifelian stage using time-series analysis of magnetic susceptibility (χ) data sets Brooks B. Ellwood.....	431
Geophysical investigations for environmental applications Abdelkrim Rimi	451

Session Parallèle 6 : Utilisation des techniques physiques dans l'ingénierie verte pour l'industrie

Principes et applications de l'intensification en génie des procédés	
Laurent Falk	465
Le traitement des déchets miniers pour l'obtention de produits à haute valeur ajoutée	
Mohamed Barakate	471
Le compostage : Une technologie verte de valorisation des gisements de déchets organiques	
Brahim Soudi	473
Valorisation des déchets urbains: cas de la technologie biogaz	
Hassan El Bari.....	483

Session interne de l'Académie

Rapport d'Activité de l'Académie pour l'année 2012 et discussion	
Omar Fassi-Fehri	495
Compte rendu de la session plénière 2013	527
Discours d'ouverture du Secrétaire Perpétuel (en arabe)	
Message adressé à Sa Majesté le Roi Mohammed VI (en arabe)	
Avant-propos (en arabe)	

AVANT-PROPOS

La physique est une science dite «exacte» de la nature dont le nom provient du mot grecque *Phisikhê* (*physikê*) signifiant «connaissance de la nature». Depuis le travail de Galilée au 17^{ème} siècle sur la chute des graves (mécanique du mouvement), la physique a été initiatrice et précurseur de la méthode scientifique telle que nous la connaissons aujourd'hui et qui repose sur l'observation, l'hypothèse, la théorie, l'expérience systématique et reproductible et sa confrontation avec la théorie et les hypothèses.

Le physicien s'efforce de comprendre et de découvrir les lois de la nature et les mécanismes responsables des comportements et des interactions de la matière à travers l'espace et le temps pour les transcrire sous forme de lois générales et quantitatives.

Au cours du temps, la physique s'est scindée en plusieurs spécialités, incluant, la mécanique et l'astronomie, la physique des particules et des interactions, la physique quantique et la physique ondulatoire, la physique de la matière condensée et la physique statistique. Sous cette classification sommaire et un peu empirique, se cachent des domaines aussi variés que l'électromagnétisme, l'électronique, l'optique photonique, l'astrophysique, la physique des plasmas et la physique nucléaire, la thermodynamique, la mécanique du solide, la matière molle et les fluides, la physique des matériaux, la biophysique, la physique du signal, etc.

Tous ces domaines sont au cœur des avancées majeures que nos sociétés ont connues, et du développement industriel du monde moderne: électricité, télécommunications, électronique, optique-photonique, aérospatial, automobile, appareils de diagnostic médical, outils d'analyses et de fabrication et de production, etc. Bref, la physique est omniprésente dans presque tous les secteurs d'activité industrielle et de production. Le savoir scientifique et technique en physique est aussi largement utilisé au Maroc dans ses divers plans sectoriels de développement, comme le plan émergence dans le domaine de l'industrie (aéronautique, automobile, électronique, télécommunications et technologies numériques, secteur d'extraction et de transformation, textile, chimie et parachimie, etc.) ou encore le plan solaire dans le domaine énergétique. Ces secteurs nécessitent aussi bien de la formation qualifiée que de la recherche scientifique et technologique de haut niveau.

Avec le développement des concepts théoriques en physique et le développement de moyens de calcul et d'analyse et l'utilisation de nouveaux grands instruments sophistiqués, comme le LHC (Large Hadron Collider), la communauté des physiciens pense qu'on est actuellement à la veille de découvertes scientifiques majeures qui pourraient permettre de mieux comprendre la matière et l'Univers.

La session plénière 2013 de l'Académie a été l'occasion de discuter et débattre des récentes avancées en physique, leur implication sur la connaissance de la matière et de l'Univers, et aussi leur importance dans le développement des différents secteurs d'activités industrielles au Maroc.

FOREWORD

Physics is a branch of natural sciences. Its name comes from the Greek word *Phisikh* (*physikê*) meaning «knowledge of nature». Since the work of Galileo in the 17th century on gravity (mechanical movement), physics has been the precursor and initiator of the scientific method, as it is known today and which is based on observation, hypothesis, theory, systematic and reproducible experiments and confrontation with theory and its assumptions.

The physicist tries to understand and discover the laws of nature and the mechanisms responsible for the behavior and interactions of matter, through space and time, to translate them to general and quantitative laws.

Over time, physics has been subdivided into several specialties, including i) mechanics and astronomy, ii) particle physics and interactions, iii) quantum physics and wave physics, and iv) physics of condensed matter and statistical physics. Under such general and quite empirical classification are hidden fields such as electromagnetism, electronics, photonics, electrodynamics, cosmology, astronomy, plasma and nuclear physics, thermodynamics, solid state physics, soft matter and fluid mechanics, physics of materials and biophysics, electronics and signal physics, etc...

All these areas are behind the major advances of society and modern world's industrial development: electricity, telecommunication, electronics, optics and photonics, aerospace, automotive, medical diagnostic and analysis devices, equipment for sensing and tools for manufacturing and fabrication, etc... In short, physics is omnipresent in almost all sectors of industry and production. The scientific and technical knowledge in physics is also widely used in Morocco in its various development plans, such as the emergence Plan (aerospace, automotive, electronics, telecommunications and digital technologies, mining and processing sectors, textile, chemistry and parachemistry etc.), or in the national renewable energy plan such as solar energy. These sectors require high level training of engineers and technicians as well as high-quality scientific and technological research.

With the advancement of theoretical concepts in physics and the rapid development of computing capacity and means of analyses, and new sophisticated experimental setups, such as the LHC (Large Hadron Collider), the physics community foresees major future scientific discoveries that could allow a better understanding of matter, universe and its evolution.

The 2013 plenary session of the Hassan II Academy of Science and Technology would be an opportunity to discuss and exchange ideas and debate on the recent advances in physics, their involvement in the knowledge of matter and universe, as well as their importance in the development of the various industrial sectors in Morocco.

CÉRÉMONIE D'OUVERTURE

MOT DU DIRECTEUR DES SÉANCES

Pr. Rajae EL AOUD

Directeur des Séances



Bonjour à tous.

Nous avons le plaisir d'ouvrir cette séance plénière de l'Académie 2013. Je souhaite la bienvenue à tous nos amis et confrères qui nous ont rejoints aussi bien du Maroc que de l'étranger, et je donne tout de suite la parole à Monsieur le Secrétaire Perpétuel de l'Académie.

DISCOURS D'OUVERTURE DU SECRÉTAIRE PERPÉTUEL

Pr. Omar FASSI-FEHRI

***Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques***



Excellences,

Honorables invités,

Mesdames & Messieurs les Académiciens,

Mesdames & Messieurs,

C'est toujours un honneur et un privilège de prendre la parole à l'ouverture de la session plénière solennelle de notre Académie. C'est aussi pour tous ses membres un motif de fierté et un grand plaisir de se retrouver pour s'acquitter d'une activité phare de leur institution, celle, comme précisée dans la Loi de sa création, de réunir chaque année l'ensemble de ses membres dans l'objectif de développer la concertation et l'échange entre la communauté scientifique nationale, et l'élite scientifique mondiale sur des questions majeures qui préoccupent notre société, et pour apporter un éclairage accru sur le progrès incessant des sciences, et s'interroger sur les conditions qui permettent à celles-ci d'évoluer et de s'épanouir.

Cette session plénière, à l'instar de toutes les précédentes, s'inscrit dans le cadre des Hautes Orientations de notre Tuteur Sa Majesté le Roi Mohammed VI que Dieu Le protège qui, dans Son Discours d'installation de notre Institution avait insisté sur «l'importance du rôle que devront jouer nos scientifiques en général et les membres de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques en particulier, afin de contribuer à relever les défis du développement et principalement ceux du développement humain».

Nous saisissons cette occasion privilégiée, pour réaffirmer nos sincères sentiments de gratitude et de reconnaissance à SM le Roi Mohammed VI que - Dieu le Garde - pour Sa Protection Tutélaire, Sa sollicitude et Ses encouragements. Nous exprimons également à l'égard de Notre Souverain Bien Aimé nos sentiments déferents les plus sincères, suite à l'agrément donné par Sa Majesté aux propositions faites par le Conseil d'Académie, comme stipulé par la Loi, concernant la nomination de nouveaux membres. A cette occasion nous voulons réitérer notre gratitude et nos sincères remerciements à Sa Majesté le Roi pour Sa Sollicitude et Ses précieuses Orientations; et nous espérons être dignes de la Confiance Royale ainsi manifestée.

En ce jour anniversaire dans le calendrier de l'Hégire du décès de notre regretté Souverain Feu Sa Majesté le Roi Hassan II dont notre Institution porte fièrement le nom, nous avons une pensée émue de respect et de gratitude pour l'Illustre Souverain qui a eu le mérite de créer notre Institution. En décidant de la création de notre Académie, Il exprimait Sa volonté de consolider la vocation de notre pays comme terre de dialogue et de rencontres entre Hommes de sciences et de savoir. En ce jour mémorable, nous rendons un vibrant hommage à Feu SM le Roi Hassan II, unificateur du pays et fondateur de l'Etat marocain moderne, et au Roi bâtisseur, qui a marqué l'histoire contemporaine du Royaume.

**Excellences,
Mes chères consœurs, mes chers confrères,
Mesdames, Messieurs,**

Nous sommes, aujourd'hui, particulièrement honorés de la présence parmi nous à cette cérémonie d'ouverture de toutes les personnalités qui ont bien voulu répondre à notre invitation, et que nous remercions très sincèrement et à qui nous souhaitons la bienvenue; nous remercions tout particulièrement les représentants du corps diplomatique qui nous honorent de leur présence; à tous nous souhaitons la bienvenue.

A cette session participent plusieurs éminentes personnalités scientifiques venant de (France, USA, Royaume-Uni, Suède, Chine, Espagne, Sénégal, Chili, Brésil, Portugal) ; ils animeront nos débats en liaison avec le thème scientifique de la session.

Nous sommes particulièrement honorés de recevoir parmi nous Mme Catherine Bréchignac, Secrétaire Perpétuelle de l'Académie des Sciences de l'Institut de France, et que je voudrais remercier une nouvelle fois pour l'aide précieuse qu'elle apporte à notre jeune Académie, notamment dans la préparation de cette session.

Je remercie tout particulièrement l'invité d'honneur de la session, le Pr. Serge Haroche, membre de l'Académie des Sciences de France, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure et au Collège de France, lauréat du Prix Nobel de Physique 2012, né au Maroc dans la grande ville de Casablanca; au cours de la même séance d'ouverture parlera le Pr. Cédric Villani, lauréat de la médaille Fields, qui se trouve cette semaine au Maroc sur invitation de l'Institut de France du Maroc. Dans quelques instants nous les écouterons tous avec plaisir et pour notre plus grand bonheur sur des questions qui se trouvent au cœur du thème de la session «la physique aujourd'hui et ses applications».

**Excellences,
Mes chères consœurs, mes chers confrères,
Mesdames, Messieurs,**

Depuis la tenue, il y a un an, de la dernière session plénière solennelle, l'Académie a encore davantage renforcé son action dans le cadre des missions qui lui sont dévolues de par la Loi - Nous aurons l'occasion d'examiner en détail après demain l'ensemble des activités menées durant l'année, en faire le bilan et voir comment notre travail pourra être amélioré. Je voudrais au cours de cette séance rappeler seulement quelques unes des actions phares auxquelles nous accordons la plus grande importance comme :

1. la promotion de la recherche scientifique par le financement d'une douzaine de projets de recherche correspondant à un budget de quelques 30 Millions DH,
2. l'intérêt que nous portons à l'enseignement des sciences, et à la diffusion de la culture scientifique que nous encourageons par l'organisation des journées «les jeunes et la science au service du développement» tenues cette année sous le thème «l'énergie durable pour tous», et par la création de clubs scientifiques au sein des établissements scolaires (une quinzaine),
3. la diffusion régulière depuis son installation des publications de l'Académie; les actes des sessions, le bulletin d'information de l'Académie, la lettre de l'Académie et depuis deux ans le journal scientifique «Frontiers in Science and Engineering»,
4. le développement de la communication scientifique dans son volet vulgarisation, mais aussi l'aspect formation à la rédaction d'articles scientifiques,
5. l'encouragement de l'excellence, en octroyant en particulier aux lauréats du Concours général des Sciences et Techniques, organisé en commun avec le Ministère de l'Education Nationale, des bourses d'excellence. Signalons, ce dont nous sommes particulièrement fiers, que parmi les lauréats de la première promotion, l'un d'entre eux a été admis à l'Ecole Polytechnique et un autre a réussi en juillet dernier au concours d'entrée à l'Ecole Normale Supérieure (Rue d'Ulm); peut être qu'il sera un jour étudiant chercheur au sein de célèbre laboratoire Kastler Brossel des professeurs Serge Haroche et Claude Cohen-Tannoudji,
6. une présence sur le plan international ponctuée notamment durant l'année écoulée par la participation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques à la réunion tenue à Washington du G-Sciences, avec treize autres académies nationales, qui a préparé la réunion du G20 au Mexique, chargée d'étudier les questions de l'environnement, ponctuée aussi par deux nouvelles conventions dont l'une signée avec l'Académie des Sciences de l'Inde se traduit déjà par une coopération dans le domaine de la recherche médicale et une autre avec l'Académie des Sciences de Chine, qui donne lieu déjà à une coopération scientifique sur les questions de désertification,

7. la réalisation d'études et d'enquêtes sur la recherche scientifique au Maroc; le document réalisé dans ce cadre «Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité : un état des lieux et des recommandations clés» :

- alerte sur l'avenir de la recherche scientifique nationale et sur la relative stagnation depuis quelques années en particulier au niveau de la production scientifique, et des moyens, surtout humains, dédiés à la recherche; il faut reconnaître que l'alerte donnée par l'Académie en 2009 sur la situation de la recherche au Maroc «Pour une relance de la recherche scientifique au service du développement du Maroc» reste d'actualité,
- rassure, car malgré tout il met en relief les acquis indéniables obtenus et quelques îlots de grande qualité,
- enfin, il propose des mesures réalistes susceptibles de relancer la recherche scientifique et de valoriser ses résultats en :
 1. élaborant une stratégie de formation d'une nouvelle génération de chercheurs,
 2. réformant profondément le système national de recherche pour le rendre capable d'accompagner les plans de développement sectoriel, initiés par Sa Majesté le Roi (Maroc vert, Halieutis, Energie, Emergence, Azur, Maroc Numeric...),
 3. améliorant la qualité de l'enseignement des sciences dans tout le cursus scolaire, et en développant la diffusion de la culture scientifique.

Excellences,

Mes chères consœurs, mes chers confrères,

Mesdames, Messieurs,

Dès le mois de mars de l'année dernière, la Commission des Travaux avait suggéré que le thème scientifique général de la session plénière solennelle 2013 porte sur la physique.

Sans remonter aux origines de la physique, qui se situent en Grèce, rappelons que le mot «physique» lui-même vient du grec et signifie «connaissance de la nature», la science moderne est née en fait avec des expériences de physique menées par le génial Galilée, considéré comme «le père de la physique moderne»; Galilée n'accepte comme critères de vérité que l'expérience et la réflexion, et y associe l'utilisation des mathématiques. Depuis, chaque grand domaine de la physique a connu un développement continu dans différentes branches comme la mécanique, l'électricité, l'optique, l'thermodynamique, la structure de la matière jusqu'aux grandes révolutions du siècle dernier avec la mécanique quantique et la relativité – ceci étant malgré tous les progrès et avancées réalisés, beaucoup de questions restent encore ouvertes, qui touchent autant le domaine de l'infiniment petit et les composants ultimes de la matière, que celui de l'infiniment grand; pourra-t-on en particulier un jour unifier dans un même modèle la gravitation et la mécanique quantique? – quelle est la nature de l'énergie noire responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers ? Dans le domaine de l'électronique, domaine qui façonne notre vie aujourd'hui, intervient dans toutes nos activités et a conduit au développement formidable de la microélectronique et des technologies de la communication, grâce à la miniaturisation des composants électronique (taille divisée par 2 tous les 18 mois), trouvera-t-on un processus autre que les semi-conducteurs lorsqu'on aura atteint la limite de la taille des

atomes? Il semble que sur ce plan la biologie viendrait déjà au secours de l'électronique en utilisant des cellules vivantes comme connexions électriques miniatures.

Je suis sûr que certaines de ces questions nous seront éclairées en écoutant durant la session nos éminents invités, que je voudrais remercier pour avoir accepté de participer à cette session et à qui je souhaite la bienvenue.

**Excellences,
Mesdames, Messieurs,**

- Le premier ressort qui fait évoluer les sciences physiques est bien entendu d'ordre cognitif; il répond au souci de répondre aux questions fondamentales que les physiciens se posent sur la matière et sur l'univers; cette volonté de connaître, de comprendre, d'expliquer la nature et l'univers est le propre du physicien. A ce propos Einstein a parlé de : «la lutte éternelle de l'esprit inventif de l'homme pour arriver à une compréhension plus parfaite des lois qui gouvernent les phénomènes physiques». C'est encore lui qui écrit «qu'est ce que qui nous pousse à inventer des théories l'une après l'autre, et pourquoi même les imaginons-nous? la réponse est simple, parce que nous avons la joie de comprendre». Au cours de la session, nous consacrons à ces questions trois séances plénières, une à l'ouverture, ensuite une séance sur «physique des hautes énergies et sciences de l'univers», enfin une séance sur «physique quantique, matière condensée et matière molle»,
- Un ressort non moins important que celui dû à l'intérêt cognitif, c'est celui dû aux importantes et multiples applications de la physique; celle-ci est aujourd'hui omniprésente dans notre environnement; nous avons déjà parlé du rôle de l'électronique, mais aussi la mise au point des thérapeutiques nouvelles, et bien d'autres applications, font évoluer la recherche sur la physique. Qui pouvait imaginer, que la théorie de la physique quantique, au moment de sa découverte, allait donner naissance à autant d'applications pratiques et à autant d'inventions comme le laser, l'ordinateur, internet, l'I.R.M, l'énergie nucléaire; a-t-on imaginé que la théorie de la relativité restreinte et la relativité générale allaient connaître une application aussi pratique que celle du GPS? Dans ce cadre nous organisons une séance plénière consacrée à «physique et sciences de l'ingénieur»,
- Enfin, rappelons que la physique évolue aussi grâce aux sollicitations provenant des sciences voisines, comme la chimie, la biologie, les sciences de la terre, les sciences de l'environnement, la météorologie.- Dans ce cadre, nous organisons six séances parallèles consacrées à la physique et sciences médicales, physique et agronomie, physique-chimie, physique et sciences économiques, physique et mathématiques, physiques et sciences de la terre et de l'environnement.

**Excellences,
Mesdames, Messieurs,**

A la base de toute cette activité, et à l'instar des autres disciplines scientifiques, insistons sur l'importance de l'esprit scientifique qui permet à la recherche scientifique et aux chercheurs de jouer correctement leur rôle; dans toute réelle activité scientifique en plus de bien d'autres qualités nous distinguons quatre : la rigueur, l'objectivité, la liberté

et l'indépendance. A ce propos rappelons ce qu'écrivait Gaston Bachelard «l'esprit scientifique nous interdit d'avoir une opinion sur des questions que nous ne comprenons pas» - ou ce que disait Albert Einstein : «la science est une création de l'esprit humain au moyen d'idées, et des concepts librement inventés».

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques s'attache à défendre un tel idéal comme l'avait inscrit, dans le préambule de la Loi la créant son Fondateur, notre regretté Souverain Sa Majesté le Roi Hassan II que Dieu L'ait en sa sainte miséricorde, en fixant parmi les missions de l'Académie celle de donner à la science et à la recherche scientifique et technique une place majeure dans l'échelle des valeurs nationales, et de proposer aux autorités concernées les voies et les moyens capables de développer l'esprit scientifique au sein de la société marocaine.

Placée sous la Protection Tutélaire de Sa Majesté la Roi Mohammed VI que Dieu Le garde, nous pensons que c'est dans cette Protection que réside la garantie de notre liberté et de notre indépendance, gages d'une action conforme à l'esprit scientifique.

Les membres de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques agissent et agiront toujours pour être dignes de la précieuse confiance royale pour «*servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale*».

Je vous remercie pour votre attention.

- Pr. Rajae EL AOUD (Directeur des Séances)

Merci Monsieur le Secrétaire Perpétuel de cette allocution d'ouverture, et je donne tout de suite la parole à Madame Catherine Bréchnignac. Un petit mot juste pour l'introduire à nouveau. Madame Bréchnignac est physicienne française, ancienne présidente du CNRS de 2006 à 2010 et du Haut Conseil des Biotechnologies d'avril 2009 à décembre 2010. Elle est Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences de France depuis le 22 juin 2010 et a pris ses fonctions en janvier 2011. Depuis elle est aussi ambassadrice déléguée à la Science, la Technologie et l'Innovation. Nous la remercions d'abord, comme l'a dit Monsieur le Secrétaire Perpétuel de l'Académie d'avoir apporté toute la contribution à l'organisation de cette séance plénière et d'avoir répondu à notre invitation. Elle va nous entretenir pendant une quarantaine de minutes d'une conférence intitulée : Où en est-on dans la compréhension des mécanismes qui régissent la matière? La parole est à vous Madame Bréchnignac.

OÙ EN EST-ON DANS LA COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES QUI RÉGISSENT LA MATIÈRE?

Pr. Catherine BRÉCHIGNAC
Secrétaire Perpétuel,
Académie des Sciences de France
Ambassadeur délégué en Science,
Innovation et Technologie



Le propos développé ici n'est pas de faire l'état des connaissances scientifiques à ce jour mais de suivre comment les «scientifiques» ont construit au cours des siècles les langages de la raison, langages qui leur permettent de comprendre les mécanismes qui régissent la matière.

Depuis quelques millénaires les hommes ont accumulé des savoirs pour comprendre, se protéger, se soigner, ou tenter d'agir sur leur environnement. Au fil du temps ils l'ont fait au travers d'observations, de théories pour expliquer les observations, d'expériences pour vérifier les théories, de créations. C'est la démarche scientifique.

Naissance de la démarche scientifique

L'observation du ciel et les mathématiques constituent le berceau de la connaissance scientifique. Les origines de l'astronomie remontent au-delà de l'Antiquité. La pierre trouvée le 15 août 2006 au nord-ouest de la Chine, qui montre une représentation de la grande Ourse que les chinois appellent «boisseau», date d'environ 10.000 ans. Elle témoigne que l'homme s'intéressait au ciel il y a fort longtemps. Avec l'apparition de l'écriture, les observations astronomiques sont consignées avec soin et ceci dans les quatre foyers de civilisations qu'étaient la Mésopotamie, l'Égypte, la Chine, et ce que nous appelons aujourd'hui les civilisations précolombiennes. Ce savoir, tant en astronomie qu'en mathématiques, avait des fins utilitaires que sont la mesure du temps et les décomptes dans la vie quotidienne. Le jésuite Joseph de Mailla affirme que vers 2850 avant notre ère, l'astronome Fu-Hi donna aux chinois le moyen de calculer les éclipses et mesurait le temps dans un système sexagésimal utilisé aussi par les babyloniens et dont il nous reste en héritage les 60 secondes dans la minute et les 60 minutes pour

faire une heure. A cette époque qui marque le début de l'Histoire et qui nous a transmis des calendriers d'une grande précision, aucune civilisation ne cherchait le pourquoi des phénomènes célestes observés.

La grande nouveauté vint de la Grèce antique lorsque les mathématiques sortent de l'utilitaire pour devenir conceptuelles et qu'émerge la philosophie. Avec Thalès le principe d'explication des phénomènes observés n'est plus transcendantal, mais réel. Les lois sont dictées par la nature et des théories rationnelles où les mathématiques sont dominantes procurent des explications chiffrées ou géométriques; Pythagore découvrit vers 500 avant notre ère une relation numérique entre les oscillations des cordes de la lyre, première mathématisation de la musique. Cependant, des discussions philosophiques menaient à des paradoxes dont Zénon d'Elée fut le porte-parole. Celui, bien connu, d'Achille et la tortue a rapport au temps. Achille court plus vite que la tortue, mais si celle-ci part avec quelques mètres d'avance sur lui, il ne la rattrapera jamais car lorsqu'il arrivera au point de départ de la tortue elle sera déjà plus loin. Ainsi, en raisonnant par itérations successives. Achille ne rattrapera pas les tortues. Or l'expérience montre qu'il n'en est rien, d'où le paradoxe. Ce raisonnement philosophique et non mathématique, basé sur la dichotomie du temps n'est pas approprié pour décrire des mouvements continus. C'étaient les prémices de la démarche scientifique.

Il fallut encore attendre près de 2000 ans pour voir poindre la «démarche scientifique» au sens où nous l'entendons aujourd'hui. Elle est née en Europe au XVI^{ème} siècle et toujours avec le couple astronomie-mathématiques.

Dès l'antiquité on avait conscience que la Terre était ronde mais, à l'exception d'Aristarque de Samos au III^{ème} siècle avant notre ère, la représentation d'Aristote plaçait la terre fixe au centre de l'univers. Le changement de paradigme vint de l'observation du mouvement des planètes, vocable qui -en grec- signifie astre errant. En effet, pour un observateur terrestre, le mouvement des planètes dans le ciel semble avancer, s'arrêter puis repartir en sens inverse, mouvement appelé rétrograde. Pour décrire le mouvement de Mercure des astronomes du monde arabe, tel qu'Ibn al Shatir, travaillant à l'observatoire de Maragha construit en 1259, avaient adopté un modèle héliocentrique. Copernic, médecin, mathématicien, astronome, reprit cette idée et propose dès les années 1510, un modèle dans lequel le Soleil était fixe au centre de l'Univers, chaque planète décrivant une trajectoire qu'il pensait circulaire autour de celui-ci. Ce modèle restera cependant confidentiel, il ne resurgira qu'avec Galilée qui, après des nuits d'observation du ciel avec une lunette dont il porta le grossissement de 6 à 30, mit en évidence les satellites de Jupiter et fit sienne la théorie de Copernic.

Mais Galilée était d'abord un physicien. Il était intéressé par la chute des corps. Il va se servir du plan incliné, machine simple utilisée depuis l'antiquité pour hisser des objets lourds, et établit le lien entre le temps et la distance d'un corps qui glisse sur le plan incliné. Il affirme dans l'Essayeur, paru en 1623, que le livre de la Nature est écrit «en langage mathématique».

La démarche scientifique au sens de la confrontation théorie – expérience était bien née et devint l'une des méthodes puissantes qui fit progresser la connaissance. Elle s'étendit au monde entier.

La démarche scientifique le langage et la raison

La démarche scientifique est une démarche de pensée. A l'époque où Christophe Colomb qui savait que la terre était une sphère et voulait expérimenter la route des Indes par l'ouest, où Copernic écrivait la théorie héliocentrique, leur contemporain Léonard de Vinci qui avait pour devise «obstination et rigueur» disait : «il faut contempler, il faut penser, celui qui pense peu se trompe souvent».

La pensée est indissociable du langage, et l'écrit aide à fixer la pensée. On peut se poser la question pourquoi les civilisations Olmèque et Maya qui peuplaient avant notre ère un côté de la planète, ainsi que la civilisation chinoise qui en peuplait l'autre côté et dont la pensée, amplement manifestée par sa culture, est riche et originale, n'ont pas engendré, avec les mêmes observations que celles que firent des siècles plus tard les européens, la démarche scientifique? Si cette question est sans réponse, il est clair que les formes linguistiques des langues chinoise ou maya basées sur des idéogrammes sont très différentes de celles des langues alphabétiques, plus abstraites et linéaires, transcrivant les mots par la combinatoire de lettres et les idées par un ensemble de mots. La langue chinoise par exemple n'est pas le logos et la pensée chinoise est plus une pensée globale qu'une pensée analytique. Or la démarche scientifique quant à elle est une démarche d'investigation qui passe en premier lieu par l'analyse.

Tandis que Galilée établissait les lois de l'inertie, Descartes qui voulait rompre avec les interminables raisonnements par syllogismes que l'on enseignait à son époque instaure des règles de raison qu'il énonce dans son Discours de la méthode en 1637 :

- Ne recevoir aucune chose pour vraie tant que son esprit ne l'aura clairement et distinctement assimilée préalablement.
- Diviser chacune des difficultés afin de mieux les examiner et les résoudre.
- Établir un ordre de pensées, en commençant par les objets les plus simples jusqu'aux plus complexes et divers, et ainsi de les retenir toutes et en ordre.
- Passer toutes les choses en revue afin de ne rien omettre.

Discours qui servait d'introduction à trois traités scientifiques la Dioptrique, les Météores et la Géométrie mettant en application sa méthode. C'est ainsi qu'il clarifia les lois de l'optique géométrique, lois qui avaient été déjà mentionnées par Ibn Sahl en 987 pour expliquer comment les miroirs courbes et les lentilles peuvent focaliser la lumière en un point.

Leibniz reprendra la logique de Descartes mais ira plus loin dans le langage mathématique de la pensée. Il dira aussi que les progrès qu'il a fait faire en mathématiques, celles du calcul infinitésimal, viennent uniquement de ce qu'il a réussi à trouver des symboles propres à représenter les quantités et leurs relations.

La démarche scientifique et les succès du déterminisme

Observer, accumuler des données, faire des synthèses, créer des langages et établir des lois pour expliquer les faits expérimentaux tout en cherchant s'il n'existe pas un contre-

exemple qui mette la loi en défaut, est depuis la fin du XVI^{ème} siècle la méthode qui permet d'accroître la somme de nos connaissances. Cette méthode permet d'appréhender le monde qui nous entoure d'une manière conceptuelle et synthétique. Elle présente l'avantage de minimiser la place qu'occuperait la mémorisation d'un grand nombre d'observations dans notre cerveau.

La compréhension de la gravitation universelle est un cas d'école. Commenant par Galilée qui s'intéressait à la chute des corps sur terre, puis Kepler qui écrira : «Une chose est certaine, du Soleil émane une force qui saisit la planète». C'est Isaac Newton qui fera la synthèse. Il montre que la chute d'un corps sur terre et le mouvement des astres sont causés par la même force proportionnelle aux masses mises en jeu et inversement proportionnelle au carré de leur distance, unifiant ainsi la mécanique terrestre et la mécanique céleste. Il établit les lois de la mécanique des corps en mouvement.

Plus tard Charles Coulomb énoncera, à la suite des mesures effectuées au moyen de sa balance à torsion d'une extraordinaire sensibilité, que les forces développées par les charges électriques et magnétiques suivent la même loi que celle de l'attraction gravitationnelle. Elles sont inversement proportionnelles au carré de leur distance.

En 1861 James Maxwell invente le concept de "champ" qui est en chaque point, un potentiel de forces. "Le champ-disait-il-crée une toile à travers tout le ciel". Son effet peut être gravitationnel lorsque cette force est liée à la Terre, électrique autour d'une charge ou magnétique autour d'un courant électrique. Cette idée de champ n'était pourtant pas nouvelle. Elle existait déjà à l'époque de Newton mais était alors considérée comme une technique mathématique qui servait à obtenir les forces agissant sur un corps. Maxwell y vit une réalité, ce concept de toile imaginé par Maxwell rejoint notre «web» d'aujourd'hui. En 1864 il écrit les fondements de l'électromagnétisme sous forme d'équations couplant les champs magnétique et électrique.

Ces équations recèlent cependant une grave difficulté qui ne sera levée que par une démarche scientifique poussée à l'extrême. Elles renferment l'existence d'une vitesse limite "c" pour la propagation des ondes électromagnétiques. Or il n'existe pas de vitesse limite pour les corps en mouvement dans la mécanique de Newton. Le dilemme se pose. Soit les équations de Maxwell sont une approximation dans les référentiels en mouvement lent par rapport à "c", soit les équations de Maxwell sont rigoureuses dans tous les référentiels mais la notion d'espace et de temps est à repenser. Cette question de l'espace-temps symbolisée un peu moins d'un siècle plus tard par Dali dans son célèbre tableau : «Les montres molles» est un cas d'école car la question posée est binaire et la démarche scientifique est parfaitement adaptée. Cependant le changement de paradigme était tellement énorme dans la seconde hypothèse qu'elle fut immédiatement rejetée sans plus de réflexion et la première adoptée. Mais il fallait trouver des vérifications expérimentales pour vérifier ou infirmer l'hypothèse choisie. La solution fut d'abord théorique. Au début du siècle suivant, Poincaré dans son livre la science et l'hypothèse publié en 1902 écrit : «il n'y a pas d'espace absolu, il n'y a pas de temps absolu de sorte que nous n'avons et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes, oui ou non, emportés dans un pareil mouvement». En 1905, dans son article «de l'électrodynamique des corps

en mouvement» Einstein choisit l'hypothèse que la vitesse limite est une constante universelle indépendante du référentiel. Il entra de plain pied dans la relativité.

Si la théorie de la relativité est profondément logique, paradoxalement elle défie le bon sens : Le temps n'est pas absolu, il peut se dilater; Les dimensions de l'espace ne sont pas constantes, elles peuvent être déformées; De ce fait le temps n'étant pas absolu et l'espace pouvant se déformer notre univers n'est pas en trois dimensions mais en quatre avec les trois composantes de l'espace et celle du temps.

Avec Einstein, l'attraction universelle décrite par Newton est devenue une approximation d'une théorie plus générale qui lie inertie et gravitation, dans laquelle la gravitation n'est plus considérée comme une force, cause d'une accélération, mais comme une déformation de l'espace-temps, où un rayon lumineux est dévié comme à travers une lentille.

Le caractère contre intuitif de la relativité existe en dépit du fait que de nombreuses expériences en ont montré les effets tangibles.

La première confirmation de la théorie de la relativité générale fut réalisée par Sir Arthur Eddington. Durant l'éclipse totale du soleil du 29 mai 1919 qui permettait de ne pas être ébloui par la lumière de celui-ci, Eddington observa la lumière émise par une étoile dont la position est proche de l'axe terre-soleil. Selon la relativité générale la lumière émise par l'étoile est légèrement déviée par l'action de la gravitation exercée par la masse du Soleil. Celle-ci devrait apparaître à une position légèrement plus éloignée du soleil. Eddington prit plusieurs photographies des régions situées autour du Soleil. La météo était mauvaise et les plaques photographiques de mauvaise qualité et difficiles à mesurer. Il nota toutefois dans son carnet : «...une plaque que j'ai mesurée donnait des résultats en accord avec Einstein». Eddington et Einstein restèrent amis. Dans le système solaire, les vitesses des corps sont très petites par rapport à la vitesse de la lumière et le champ de gravitation est faible, dans la majorité des cas l'approximation newtonienne est suffisante. Mais si nous voulons améliorer la précision de notre GPS il est nécessaire d'utiliser la théorie de la relativité. Notre position sur terre est déterminée grâce aux 24 satellites situés à 20.200km de la terre. La vitesse des 3 satellites servant à notre GPS est de 3870 ms⁻¹. Cette vitesse suffit à faire apparaître une dilatation significative du temps à bord du satellite par rapport au temps d'observation sur terre. Au bout de 24h on obtient un retard de l'horloge du satellite sur celle de la terre de 6,9μs, ce qui entraîne, si on n'en tient pas compte, une erreur de 2 mètres par minute dans la position que nous indique le GPS.

Mais le scientifique ne se satisfait pas des conséquences expérimentales d'une théorie même si aucune expérience (de celles-ci) ne met en défaut la théorie. Aussi cherche t-il à détecter directement la déformation de l'espace lors du passage d'une onde gravitationnelle. C'est l'objet des recherches menées sur les grands instruments internationaux que sont les interféromètres VIRGO, en Italie et LIGO aux Etats-Unis.

Dans cette connaissance du monde physique construite à partir de notre environnement particulier sur la Terre, les théories successives s'emboîtent les unes dans les autres au fur et à mesure que nous nous éloignons de notre environnement naturel. Elles sont des approximations successives de théories de plus en plus générales. Cependant l'état actuel

de nos connaissances fait que les concepts abordés nous éloignent du tangible. Mais plus on s'éloigne du tangible plus les concepts doivent être élaborés avec une démarche scientifique qui impose qu'aucune observation ne doive mettre en défaut la loi qui la régit; s'il n'en est pas ainsi, il nous faut concevoir un paradigme plus universel pour définir une nouvelle loi dont la précédente sera une approximation. Cette démarche est résolument déterministe.

La démarche scientifique mise à jour pour la physique a permis aussi à la chimie de devenir ce que nous appelons une science exacte. C'est Lavoisier dans «Méthode de nomenclature chimique» publié en 1787 qui, devant le nombre de substances connues qui ne cessent d'augmenter, a rationalisé leur appellation et utilise un mode d'écriture constitué de symboles instituant ainsi la charte fondatrice de la chimie. Dans son «Traité élémentaire de Chimie» publié en 1789. Il commence ainsi «C'est en m'occupant de ce travail, que j'ai mieux senti que je ne l'avais, encore fait jusqu'alors, l'évidence des principes qui ont été posés par l'Abbé de Condillac. Il y établit que nous ne pensons qu'avec le secours des mots; que les langues sont de véritables méthodes analytiques; que l'algèbre la plus simple, la plus exacte & la mieux adaptée à son objet est à-la-fois une langue & une méthode analytique; enfin que l'art de raisonner se réduit à une langue bien faite». On retrouve ici l'importance du langage analytique. Et Lavoisier suivant les prescriptions de Descartes de dire :

«Je me suis imposé la loi de ne procéder jamais que du connu à l'inconnu, de ne déduire aucune conséquence qui ne dérive immédiatement des expériences, & des observations... Cette loi rigoureuse, dont je n'ai pas dû m'écarter, de ne rien conclure au-delà de ce que les expériences présentent, et de ne jamais suppléer au silence des faits, ne m'a pas permis de comprendre dans cet ouvrage la partie de la Chimie la plus susceptible, peut-être, de devenir un jour une science exacte. C'est celle qui traite des affinités chimiques».

C'est Dimitri Ivanovitch Mendeleïev, un maniaque de l'ordre, qui écrit l'alphabet de la chimie avec la classification périodique, explicitant ainsi les affinités chimiques. Le 6 mars 1869 il présente devant la société russe de chimie un projet de classification périodique à lignes et colonnes; Les symboles des éléments chimiques s'inscrivent sur une ligne (en suivant l'ordre) en fonction de leur masse (croissante), allant à la ligne afin que les éléments ayant des propriétés chimiques similaires se retrouvent en colonnes. Il laissait des cases vides pour les éléments non encore connus à l'époque; qui furent remplies par la suite au fur et à mesure de la découverte des éléments correspondant. La réactivité chimique n'était plus empirique mais entrainait dans la logique déterministe.

Suivant cette même idée Claude Bernard, considéré comme le fondateur de la physiologie moderne dit dans son célèbre ouvrage Introduction à l'étude de la médecine expérimentale «Le savant complet est celui qui embrasse à la fois la théorie et la pratique expérimentale. 1° Il constate un fait; 2° à propos de ce fait, une idée naît dans son esprit; 3° en vue de cette idée, il raisonne, institue une expérience, en imagine et en réalise les conditions matérielles. 4° De cette expérience résultent de nouveaux phénomènes qu'il faut observer, et ainsi de suite... Le douteur est le vrai savant ; il ne doute que de lui-même et de ses interprétations, mais il croit à la science; il admet même dans les sciences expérimentales un principe scientifique absolu. Ce principe est le déterminisme des phénomènes, qui est absolu aussi bien dans les phénomènes des corps vivants que dans ceux des corps bruts.»

Cette démarche fut caricaturée par la suite sous le sigle OHERIC (Observation, Hypothèse, Expérience, Résultats, Interprétation, Conclusion) comme la succession d'étapes d'un modèle idéalisé de démarche scientifique. Elle n'en fut pas moins extrêmement précieuse pour faire avancer les connaissances en sciences de la vie dont on a décrypté l'alphabet avec le séquençage du génome et les premiers mots avec la biologie moléculaire. Claude Bernard fut pour cette discipline ce que furent en leur temps Lavoisier pour la chimie et Descartes pour la physique. La démarche scientifique restera réductionniste et déterministe jusqu'au début du XXe siècle.

La démarche scientifique au-delà du déterminisme et de la décomposition en éléments simples (réductionnisme).

Cependant cette démarche a aussi ses limites.

On peut aujourd'hui dans l'état des connaissances en distinguer deux. L'une vient de ce qu'il existe des observations qu'aucune loi déterministe ne pourra jamais expliquer car, par essence, les causes de ces observations ou une partie de ces causes sont aléatoires. L'autre vient des observations faites sur des systèmes complexes constitués de sous-ensembles imbriqués. L'imbrication entre les diverses parties du système peut engendrer soit des effets collectifs qui court-circuitent les effets individuels des diverses composantes, soit une dynamique divergente qui pourra dans certains cas déboucher sur le chaos. Dans le cas de systèmes complexes la compréhension des parties considérées séparément renseigne rarement sur le comportement du système.

C'est au début du XXe siècle, afin de répondre à des questions où la physique classique échouait comme l'effet photoélectrique, la mise en évidence de raies spectrales etc... qu'émergea le champ extraordinaire de la mécanique quantique. Son aspect probabiliste et le principe d'incertitude d'Heisenberg semèrent le doute dans la démarche scientifique déterministe utilisée jusqu'alors.

L'idée des théories probabilistes est cependant ancienne. Elle vient des jeux de hasard. Le mathématicien italien Luca Pacioli l'évoque.

L'exemple considéré par Luca Pacioli est celui de deux équipes misant chacune 11 ducats, dans une partie en 60 points. La partie est interrompue alors qu'une équipe a marqué 50 points et l'autre 30 points : pour être équitable, quelle somme doit récupérer chaque équipe? Doit-elle être répartie proportionnellement aux gains? Proportionnellement aux pertes? Ou bien doit-elle s'appuyer sur un raisonnement mathématique? Et lequel? C'est Pascal qui un siècle et demi plus tard donnera la solution mathématique. C'est Christiaan Huygens qui en 1667 écrivit le premier traité des probabilités.

De nos jours les probabilités constituent un champ entier des mathématiques, basées autour d'un langage qui leur est propre. Elles sont l'outil indispensable dès lors qu'une des variables de l'expérience présente un caractère aléatoire. Mais si l'on peut décrire tous les résultats possibles avant l'expérience, comme dans le cas simple du joueur de dés par exemple, on ne peut prévoir avec certitude le résultat de l'expérience.

Si le raisonnement probabiliste n'est pas moins rigoureux et tout aussi utile que le raisonnement déterministe, la difficulté vient du fait que l'on peut beaucoup plus facilement y faire entrer la subjectivité que dans un raisonnement déterministe.

C'est ainsi que transposé dans d'autres domaines comme la prise de décisions par exemple, il laisse une part importante à la subjectivité de chacun. Dans une telle approche, on suppose que la prévision qu'un événement se produise est assimilée à une mesure qui exprime le degré de conviction qu'un individu particulier lui attribue, en se basant sur ses expériences, son jugement, ses sentiments, ...

Une autre limite de la démarche scientifique dans son concept réductionniste réside dans la compréhension des systèmes complexes. Intuitivement, un système est complexe lorsqu'il est composé de nombreuses ramifications. Contrairement à ce que préconisait Descartes dans le Discours de la méthode : «Diviser chacune des difficultés afin de mieux les examiner et les résoudre» dans un système complexe le tout n'est pas la somme des parties et la connaissance des parties n'est souvent pas suffisante pour connaître les propriétés du tout, elle n'est même parfois pas nécessaire. Les systèmes complexes font émerger de nouvelles propriétés comme les effets collectifs ou l'auto-organisation dans la matière. Chez les systèmes inertes, comme les systèmes vivants, la complexité perçoit par étapes.

Quelques exemples :

- 1- la matière condensée est formée d'atomes, mais ses propriétés sont pour la plupart dues à des effets collectifs. Les électrons pour les plasmons.
- 2- le verre alors que l'homme maîtrise depuis longtemps les techniques de fabrication du verre, les physiciens ne savent toujours pas expliquer pourquoi ce matériau ne coule pas. Sa structure microscopique évolue sans cesse. «Le problème le plus profond et le plus intéressant en physique de l'état solide est sûrement celui de la nature du verre et de la transition vitreuse.» dit Philip Anderson.
- 3- la classification périodique le carbone et le silicium. Le verre et le vitrimère.
- 4- Les cellules du muscle cardiaque mises en culture dans une boîte de Pétri se contractent d'une manière synchrone lorsqu'elles sont au nombre d'une centaine.
- 5- Les milliards de neurones qui composent notre cerveau et qui n'ont individuellement aucune intelligence en créent une en se couplant.
- 6- Un autre exemple est celui de la métagénomique, ou encore la génomique des communautés. Le métagénome d'un ensemble de communautés d'organismes qui réfère à l'ensemble des séquences d'ADN extraites de ces communautés indique qu'elles sont généralement composées d'organismes non cultivables seuls.

A ce stade de complexité on peut se poser la question ne faudrait-il pas créer un nouveau langage, plus compact qu'un langage dont l'écriture linéaire n'est pas adapté aux propriétés émergentes du système complexe? Peut-être que nos amis chinois qui ont de par leur langue une pensée plus globalisée que les occidentaux pourraient apporter un nouvel éclairage à cette question.

La démarche scientifique est donc un outil que l'homme façonne pour l'adapter aux questions qu'il se pose, comme il façonne ses outils pour résoudre les problèmes techniques. Elle peut être déterministe, probabiliste, ou holistique après analyse de la question posée. Construite pour répondre à des questions de sciences exactes, elle peut être parfois transposée aux sciences humaines et sociales, mais il est important d'avoir en tête de ne pas utiliser un outil non approprié à l'objet.

Devant l'énorme masse de données dont nous disposons à ce jour, devant la complexité des sujets abordés qui nécessite souvent l'interaction entre plusieurs disciplines, la demande de la société qui veut des réponses simples, parfois même simplistes, la démarche scientifique n'est pas en mesure de tout résoudre. Elle doit s'adapter, cependant elle ne doit en aucun cas laisser place à un langage approximatif, pauvre et sans construction. Elle doit au contraire construire des langues riches et précises, afin que la pensée humaine en soit plus intelligible.

- Pr. Rajae EL AOUD (Directrice des Séances)

Merci Madame Bréchnignac de cette conférence passionnante, de nous avoir replongés dans l'histoire de la physique et d'avoir brossé le tableau du développement de théories déterministes, probabilistes et leurs applications dans le quotidien. La parole est à notre invité d'honneur Monsieur Serge Haroche.

M. Serge Haroche est né à Casablanca comme l'a annoncé Monsieur le Secrétaire Perpétuel de l'Académie. C'est un physicien français travaillant dans le domaine de la physique quantique. Le 2 juin 2009, il reçoit la médaille d'or du CNRS. En 2001, il est nommé au Collège de France chargé de la chaire de physique quantique. Le 9 octobre 2012, il est co-lauréat du Prix Nobel de Physique avec l'américain David Vineland. Il va nous entretenir en faisant la conférence intitulée : "Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des «chats de Schrödinger» de lumière". La parole est à vous Monsieur Haroche.

JONGLER AVEC DES PHOTONS DANS UNE BOÎTE ET RÉALISER DES «CHATS DE SCHRÖDINGER» DE LUMIÈRE

Pr. Serge HAROCHE

*Ecole Normale Supérieure et Collège de France, Paris
Prix Nobel de Physique - 2012*



Résumé

Le prix Nobel de Physique 2012 a distingué des travaux sur le contrôle et la manipulation non destructive de particules de matière ou de lumière, réalisant au laboratoire certaines des expériences de pensée que les fondateurs de la théorie quantique avaient imaginées, mais jugeaient pratiquement infaisables. David Wineland et son équipe du National Institute of Standards and Technology de Boulder (Etats-Unis) étudient des atomes isolés et piégés en les manipulant à l'aide de lumière laser. Notre groupe de recherche, au laboratoire Kastler Brossel de l'Ecole Normale Supérieure, réalise en quelque sorte l'opération inverse : nous contrôlons sans les détruire des photons piégés entre deux miroirs ultra-réfléchissants en les mesurant à l'aide d'atomes traversant un à un le montage expérimental. Ces deux types d'expérience permettent de mettre en évidence la logique contre-intuitive du monde quantique. Elles nous ont en particulier conduit à préparer de petits systèmes de quelques photons dans des superpositions quantiques d'états appelés «chat de Schrödinger», par référence à la fameuse expérience de pensée que le physicien autrichien avait imaginée pour exprimer l'étrangeté du monde microscopique. Dans mon exposé, je présenterai de façon générale le contexte de ces travaux, j'évoquerai mon parcours dans cette exploration du monde quantique et je décrirai quelques expériences, avant de conclure sur les applications possibles de ces recherches fondamentales.

- Pr. Serge HAROCHE (Collège de France)

Je suis très honoré et très heureux d'avoir l'occasion de venir m'exprimer ici devant votre Académie pour parler des recherches que je mène à Paris et qui ont été, comme vous l'aviez indiqué, reconnus au mois d'octobre dernier par le Prix Nobel. En fait, je

suis également très ému parce que ceci me donne l'occasion de revenir au Maroc après très longtemps. Je suis né à Casablanca comme vous l'avez rappelé et j'ai quitté le Maroc il y a plus de 50 ans à une époque où je ne savais pas du tout ce que c'était un photon. J'ai eu ensuite toute ma formation universitaire et scientifique en France mais j'ai gardé un souvenir du Maroc qui est extrêmement vivant et je suis heureux d'avoir l'occasion maintenant de revenir ici. J'irai à Casablanca demain et je suis un petit peu ému et effrayé parce que je pense que la ville a beaucoup changé depuis l'époque où je l'ai connue. Donc je vais vous parler des expériences que nous réalisons à l'Ecole Normale Supérieure à Paris. Je les ai symbolisés sur cette image :




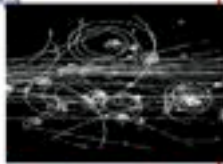
En fait, nous piégeons entre deux miroirs des particules de lumière, des grains de lumière qu'on appelle des photons, et nous étudions le comportement de ces systèmes qui illustrent les lois de la physique quantique. Donc je vais vous parler de cela et également du fameux chat de Schrödinger et la raison de son choix qui est plus psychologique que physique. Je pense qu'il a fait un bon choix puisqu'on en parle depuis plus de 90 ans.

Je vous rappelle ce qui a été dit par Madame Catherine Bréchnac tout-à-l'heure que cette physique quantique a révolutionné la compréhension du monde il y a maintenant près de 100 ans. Elle nous a introduits à un monde dans lequel les notions d'ondes et de particules qui sont si différentes pour un esprit classique sont en fait mêlées. Des atomes que l'on a l'habitude de considérer comme des systèmes discrets peuvent se comporter comme des ondes de matière et inversement la lumière qui depuis Maxwell est reconnue comme étant une onde électromagnétique est également constituée de corpuscules, des photons. Ce dualisme ouvre des perspectives extrêmement contre-intuitives, il introduit immédiatement la notion de superposition d'états. Si une particule peut être à plusieurs endroits à la fois comme c'est le cas d'une onde est bien elle est superposée entre différentes réalités classiques, et ceci est un des aspects fondamentaux de la physique quantique. Cette notion de superposition d'états, qui a été rendue quantitative par la théorie d'Heisenberg puis par l'équation de Schrödinger, est à l'origine de toutes les propriétés fondamentales de la matière et elle régit le monde à l'échelle microscopique.

Cependant, ce principe de superposition nous est contre-intuitif et nous paraît étrange parce que le monde macroscopique dans lequel nous vivons est un monde dans lequel on ne voit pas cette superposition. En fait, l'étrangeté quantique est voilée par un phénomène qu'on appelle la décohérence. Donc on ne voit pas ces phénomènes directement et pour les voir il faut travailler avec des systèmes beaucoup plus petits, il faut être capable de travailler avec un atome ou quelques atomes, un photon ou quelques photons et essayer d'agir sur eux.

Au début de la physique quantique ces manipulations étaient impossibles pour des raisons technologiques. Les fondateurs de la théorie (Einstein et Bohr) imaginaient qu'ils seraient capables de manipuler ces systèmes et ils inventaient des expériences que l'on appelle des «expériences de pensée» où ils supposaient que les systèmes quantiques (atomes ou photons) pouvaient être isolés du monde extérieur et qu'on pouvait les contrôler et les manipuler. La boîte à photons mise en place par Einstein était censée contenir un photon et ce photon pouvait être libéré, relâché à l'extérieur par une porte qui s'ouvrait et qui était commandée par une petite horloge. Bien entendu il y avait une part d'humour dans ces expériences et Bohr essayait de dessiner cela de la façon la plus réaliste possible, mais cette expérience était évidemment impossible. En fait, les fondateurs de la théorie pensaient qu'on ne serait jamais capables de manipuler des particules individuelles.

Expériences de pensée

 <p>Einstein, Bohr et leur boîte à photon</p> <p>« We never experiments with single electrons, atoms or small molecules. In thought experiments we assume that we do. It always results in ridiculous consequences... » (Schrödinger 1952)</p>	<p>Schrödinger savait que des particules individuelles pouvaient être détectées, mais, disait-il, c'était par des observations « post mortem », qui détruisaient l'objet observé.</p> <p>Chambre à bulles (CERN)</p>  <p>« ...It is fair to state that we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo. We are scrutinising records of events long after they have happened. » (Schrödinger, ibid)</p>
--	---

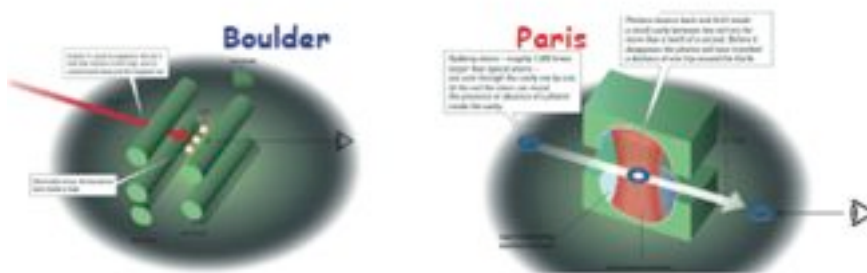
Schrödinger, en 1952, a dit explicitement dans un texte qui est resté célèbre : *on ne fait jamais d'expérience avec des électrons, des atomes ou des molécules isolés; dans les expériences de pensée, on suppose qu'on le fait mais ça conduit toujours à des conséquences ridicules*. Cette phrase de Schrödinger peut paraître étonnante parce qu'à l'époque où il l'a écrite il existait déjà des détecteurs de particules (les premiers accélérateurs existaient, les chambres à bulles ou les chambres à étincelles allaient exister) et Schrödinger le savait très bien. Il s'agit en fait d'une physique *post mortem*, on n'est pas en mesure d'agir sur les particules une fois qu'on les a détectées.

L'idée qui a émergé durant les 20 ou 30 dernières années est que: est-il vraiment impossible de faire ces expériences?

La technologie a beaucoup évolué depuis et on peut maintenant effectuer au laboratoire ces expériences de pensée et contrôler tout un zoo de particules. Personnellement, je travaille sur des photons isolés. Mon collègue et ami David Wineland et bien d'autres groupes dans le monde travaillent sur des ions ou des atomes isolés. Des expériences sur des molécules isolées ont également été effectuées et ces expériences se développent maintenant dans de nombreux laboratoires. Ce qui a permis évidemment l'émergence de technologies nouvelles, le fait qu'on a même les lasers accordables qui nous permettent de manipuler des atomes avec une très grande précision. Bien entendu que nous avons des ordinateurs rapides qui nous permettent d'analyser les signaux de ces expériences en temps réel de façon à être capable de réagir sur les systèmes à des échelles de temps suffisamment courtes et pour certaines expériences que l'on dispose de matériaux supraconducteurs (miroirs). Ces technologies sont des technologies quantiques. Le laser, les ordinateurs et la supraconductivité n'ont pu être développés au niveau technologique que parce qu'on a compris le comportement de la matière à l'échelle microscopique. Il y a là une espèce de cercle vertueux. La théorie quantique a permis de développer des technologies par des expériences nouvelles et d'approfondir les connaissances sur des phénomènes fondamentaux.

Les expériences que l'on fait maintenant, non seulement dans mon groupe et dans celui de David Wineland mais également dans de nombreux laboratoires dans le monde, permettent de contrôler les particules au niveau de la physique quantique. En fait, les expériences de David Wineland aux Etats Unis et les miennes sont les deux faces d'une même médaille. Dans son cas il manipule des atomes uniques avec des faisceaux de lumière, et nous nous faisons l'inverse en manipulant des photons uniques avec un jet d'atomes qui traverse la boîte dans laquelle les photons sont piégés.

Contrôle de particules dans un monde quantique



Les deux faces d'une même médaille:
manipulation non destructive
d'atomes uniques avec des photons ou
de photons uniques avec des atomes

Dans ces deux types d'expériences, nous essayons de le faire *in vivo* pour reprendre la métaphore de Schrödinger qui parlait de physique *post mortem*. Nous travaillons sur des systèmes que nous essayons d'observer sans les détruire, donc l'idée de mesures non destructives est essentielle dans ces expériences.

Les prémices de cette physique ont commencé il y a très longtemps lorsque les lasers ont commencé à être développés aussi bien sur les ions que sur les photons et ceci remonte à peu près aux années 1970.

Je voudrais rappeler mon parcours personnel dans cette histoire. La thèse que j'ai effectuée dans les années 1960-70 à l'Ecole Normale Supérieure sous la direction de Claude Cohen-Tannoudji a joué un rôle essentiel parce que c'était l'époque du pompage optique. Ce dernier consistait à manipuler des atomes à l'aide de lumière. A l'époque, il s'agissait d'une lumière créée par des lampes classiques mais l'idée que la lumière pouvait façonner l'état de la matière était une idée révolutionnaire développée par Kastler et Brossel et théorisée par Claude Cohen-Tannoudji à l'époque. Nous effectuons des expériences de pompage optique et à l'aide de faisceaux lumineux on observait la danse de ces moments magnétiques des atomes dans un champ de radiofréquence. Ces expériences portaient sur des collections énormes d'atomes, on travaillait sur des milliards d'atomes à la fois, mais le comportement de chaque atome était régi par la théorie quantique. Je me souviens déjà qu'à l'époque j'étais vraiment fasciné par l'idée que peut-être un jour on serait capable non pas de travailler sur des atomes collectivement mais sur des atomes isolés.

En même temps j'ai développé avec Claude Cohen-Tannoudji ce qu'on appelait le «formalisme de l'atome habillé» qui consiste à décrire le couplage des atomes au rayonnement en traitant le rayonnement en termes de photons. C'était une idée assez nouvelle à l'époque parce que le champ électromagnétique dans ces expériences contenait un nombre énorme de photons, et lorsque le nombre de photons est très grand un traitement classique en termes d'ondes est tout à fait adapté. Et je me souviens que de nombreux physiciens nous disaient : «pourquoi vous vous fatiguez à quantifier le champ électromagnétique alors que tous les effets que vous découvrez pouvaient être traités classiquement». Et c'est vrai je me disais à l'époque : est-ce qu'avec ce formalisme classique on ne pouvait pas un jour avoir à l'utiliser pour voir vraiment des effets qui ne seraient pas compréhensibles classiquement.

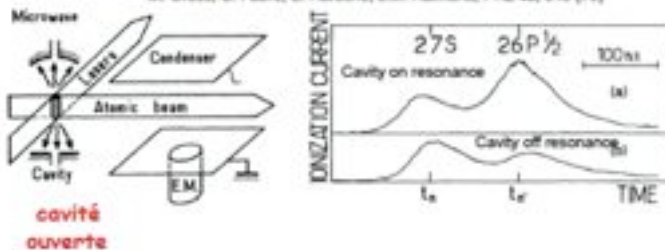
Après cette première phase de formation, je suis parti pour un stage postdoctoral en Californie dans le groupe du professeur Arthur Schawlow à Stanford et c'est là que j'ai été initié au laser alors que les lasers commerciaux se développaient et l'Université de Stanford recevait en priorité les premiers prototypes. J'ai alors commencé à étudier ce qu'on appelait les «battements quantiques» qui relevaient de la physique atomique. On a un atome dans son état fondamental que l'on excite par une impulsion lumineuse qui le porte dans un état superposé c'est-à-dire que l'on excite plusieurs états superposés de l'atome et lorsque l'atome réémet de la lumière ensuite c'est ce qu'on appelle de la fluorescence. On observe dans la fluorescence des battements, des modulations, qui sont liés au fait qu'on l'a excité dans une superposition d'états. A cette époque là, j'ai été sensibilisé à l'importance de la notion de superposition d'états. Ici aussi c'est un effet que l'on observe sur une collection d'atomes et qui est une interférence quantique qui se

produit à l'intérieur de chaque atome et c'était un défi expérimental qui a commencé à me préoccuper dès cette époque. Je rappelle que tant Claude Cohen-Tannoudji qu'Arthur Schawlow ont reçu un Prix Nobel et j'ai vraiment eu la chance d'être formé aux côtés de personnalités qui ont joué un rôle essentiel dans le développement de la physique quantique au cours des 30 à 40 dernières années.

Ce n'est qu'en rentrant à Paris, après ce stage postdoctoral, que les choses ont vraiment commencé. Comme je disposais de ces premiers lasers, j'ai été fasciné par le fait que ces lasers permettaient d'exciter des atomes tout près de la limite d'ionisation. Catherine Bréchignac a parlé tout-à-l'heure d'atomes de Rydberg, ce sont des atomes dont un électron est porté très loin du noyau et ces atomes on pouvait les exciter à l'aide de lasers dont la fréquence de résonance correspond aux fréquences de transition. On a commencé d'étudier systématiquement ces atomes et en particulier on a été frappé par leur sensibilité aux rayonnements micro-ondes qui permet d'effectuer des transitions entre niveaux de Rydberg voisins.

...mais l'aventure a vraiment commencé avec les premières études de masers à atomes de Rydberg à la fin des années 1970

M. Gross, C. Fabre, S. Haroche, J.M. Raimond, PRL 43, 343 (79)



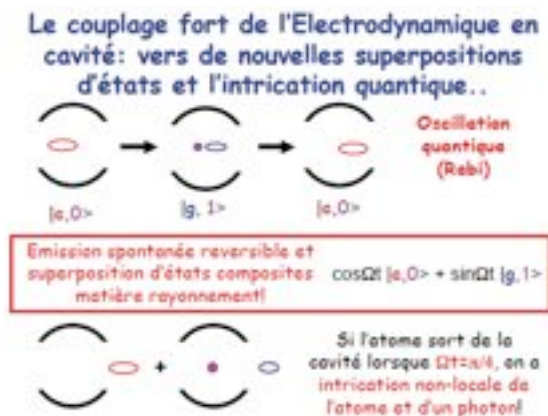
Un commentaire
prémonitoire...et le
début de
L'Electrodynamique
quantique en Cavité

More fundamentally, we believe that these experiments open the way to the study of even smaller emitting systems (i.e., samples smaller than the atomic wavelength or **with very small absolute atom number**), a domain where there is still no comparison available between experiments and theory.

Ce dont on s'est rendu compte dans ces expériences c'est que si l'atome était initialement excité, ce n'était même pas la peine d'appliquer de micro-ondes. Si la qualité avait la bonne longueur, les micro-ondes étaient générées spontanément par les atomes, c'est ce qu'on appelle un «effet maser». Mais la grande surprise c'était que cet effet maser fonctionnait avec très peu d'atomes. La grande sensibilité des atomes de Rydberg fait qu'alors qu'il faut d'habitude des milliards d'atomes pour obtenir l'effet laser ou l'effet maser, ici quelques milliers d'atomes étaient suffisants. Et si on pouvait améliorer nos qualités, on pourrait descendre ce seuil à un tout petit nombre d'atomes. Notre but était de réaliser ces expériences avec un atome isolé qui émettrait alors un photon dans la cavité, et ceci a constitué le début de l'électrodynamique quantique en cavité.



Quelques années plus tard, en remplaçant nos cavités en cuivre par du niobium supraconducteur, on a augmenté leurs qualités à un point tel qu'on est arrivé à observer l'effet avec un seul atome. Les atomes arrivant un à un donnent des clics qui s'ionisent dans des instants différents dans la rampe de champ. Ce qui montre qu'un seul atome voit son émission accélérée, il émet son photon plus rapidement dans la cavité et donc c'est un effet qui a été prévu théoriquement avant mais qui était observé ainsi pour la première fois. On voulait garder ensuite ce photon dans la cavité. En d'autres termes qu'est-ce qui arriverait au photon si la qualité de la cavité était encore meilleure et permettait au photon de survivre après sa création sans se perdre dans les parois de la cavité? On arrivait alors à ce qu'on appelle «le couplage fort de l'électrodynamique en cavité» qui conduit à l'étude des superpositions d'états et à l'intrication quantique dans un contexte nouveau. Ce phénomène conduit à une oscillation quantique ou oscillation de Rabi de l'atome. C'est un phénomène très intéressant qui mène à un instant arbitraire le système à être dans une superposition de deux états : un état où l'atome est excité en présence du vide et un état où l'atome est dans l'état inférieur de la transition avec un photon. L'atome se trouve à la fois dans ces deux états avec des amplitudes qui sont modulées dans le temps par le facteur $\cos t$ ou $\sin t$.



Si on arrête l'expérience par l'interruption du couplage lorsqu'on est à mi-parcours entre les deux états, on fabrique une intrication non-locale dans laquelle l'atome sort de la cavité dans l'état excité laissant la cavité vide et en même temps l'atome sort de la cavité dans l'état inférieur en laissant un photon derrière lui. La question suivante qui nous a intrigués : comment détecter ce photon sans le détruire? Une façon de détecter le photon c'est de

le faire absorber par un atome, mais à ce moment là le photon est détruit et si on veut le manipuler ce n'est pas la bonne méthode. Ceci nous amène à une question qui est essentielle et qui est liée à l'optique en général : la détection par absorption ou détection photo-électrique détruit le photon. Einstein en 1905, comme Catherine Bréchnignac l'a rappelé, a fait une théorie de l'effet photo-électrique qui montre comment, lorsque les photons heurtent une photocathode, des électrons sont éjectés et c'est l'éjection de ces électrons qui signale le fait qu'on avait un photon. En fait tous les photo-détecteurs, y compris notre rétine, travaillent suivant ce principe mais c'est une technique destructrice pour la lumière. La détection des photons est tout-à-fait analogue à cette physique *post mortem* dont parlait Schrödinger, on ne voit que les débris résultant de la disparition des photons. Mais ceci n'est pas une fatalité, on pourrait imaginer et nous avons cherché à réaliser une détection non destructive (*quantum non-demolition*) qui à la suite d'un clic laisse le photon toujours dans la cavité et nous permet de le remesurer à de multiples reprises.

Cette théorie de la détection non-destructive d'un oscillateur quantique d'un champ de lumière avait été effectuée par V. Braginsky dans les années 1970. Pour cela, on a besoin d'un détecteur non-destructif qui soit sensible à un photon unique et d'une boîte à photons qui garde le photon pendant un temps suffisant pour que l'on puisse le réobserver à plusieurs reprises.

On détruit les atomes après, mais on ne détruit pas les photons. Pour cela on utilise des atomes de Rydberg circulaires préparés selon une technique développée à MIT par Daniel Kleppner : l'électron est localisé sur orbite géante (1/10 de micron) par pulse micro-onde préparant une superposition de deux états de Rydberg voisins. Le paquet d'onde localisé tourne autour du noyau à 51 GHz comme l'aiguille d'une montre sur un cadran.

Quand un atome interagit avec de la lumière non résonnante, la fréquence de son horloge est légèrement modifiée par l'effet de **light shift** (Cohen-Tannoudji, 1961). En fait, on va s'arranger pour que l'atome ne soit pas résonant avec le champ parce qu'on veut éviter de l'absorption du rayonnement, donc on décale la fréquence de l'atome de celle du champ de la cavité, et dans le cas non résonnant les deux systèmes voient leurs fréquences caractéristiques légèrement changées. Ceci conduit à un déplacement du dipôle atomique. La sensibilité des atomes de Rydberg est telle qu'on peut faire un déphasage par photons de 180° . Pour mesurer ce déplacement de phase, on va utiliser un interféromètre de Ramsey. Ce dernier est le père des horloges atomiques.



Les sauts quantiques sont aléatoires d'une réalisation à l'autre puisque le champ décroît exponentiellement en moyennant un très grand nombre de marches aléatoires.

Suivant le type d'expérience que l'on réalise, on voit apparaître un aspect ou l'autre : corpusculaire (Particle) ou ondulatoire (Wave).



Je voudrais conclure en consacrant quelques minutes au fameux problème du chat de Schrödinger, qui lui dépend de l'aspect ondulatoire de la lumière. Schrödinger admettait l'idée de superposition d'états mais il se disait si un atome pouvait exister dans une superposition d'états, et si vous couplez cet atome à un objet macroscopique, l'objet macroscopique lui-même va se trouver dans une superposition d'états.

Histoire du chat de Schrödinge:
Un gros système couplé à un seul
atome finit dans une étrange
superposition...



$$a_{\text{vivant}} | \text{cat} \rangle + b_{\text{mort}} | \text{atom} \rangle$$



Notre version:
un champ
cohérent
couplé à un
seul atome se
projette dans
une
superposition
de deux
champs de
phases
opposées

Si vous prenez une onde électromagnétique, qui a une amplitude et une phase bien définies, cette onde va être représentée par un vecteur dans un plan que l'on appelle le **plan de Fresnel**. La longueur du vecteur donne l'amplitude de l'onde et la direction du vecteur est associée à la phase de l'onde. En physique quantique cette image reste valable à ceci près qu'il faut donner un certain flou à l'amplitude du vecteur et à sa phase, c'est ce qu'on appelle un **état cohérent du rayonnement**. Cette fonction porte un nom : **Fonction de Wigner** du champ. C'est une distribution réelle à 2D décrivant toutes les informations sur l'état quantique du champ classique.

En 1991, nous avons (S. Haroche, M. Brune, L. Davidovich, J.-M. Raimond et N. Zagury) proposé une expérience qui à l'aide d'un seul atome de Rydberg permettrait de transformer un état cohérent en une superposition de deux états cohérents de phases opposées. Il y a donc deux cercles opposés dans le plan de phase, l'un de ces cercles va représenter le chat vivant, l'autre le chat mort, et l'existence des franges entre les deux décrit la cohérence quantique. Ce que montre la théorie également, c'est que, si vous laissez ce système mijoter dans la cavité, très rapidement les franges vont s'évanouir parce qu'elles sont très sensibles à la perte d'information dans les miroirs : c'est la décohérence.

Quel est le mécanisme qui permet de préparer le chat de Schrödinger de notre expérience? On commence par préparer un état cohérent dans la cavité, donc une flèche dans une direction donnée. On envoie un seul atome que l'on prépare dans une superposition d'états et cet atome traverse la cavité. Suivant qu'il est dans l'état e ou dans l'état g, il va déphaser le champ dans une direction ou dans l'autre. L'atome a un effet extrêmement sensible sur le champ et on se trouve à ce moment dans une situation type chat de Schrödinger. L'atome est excité et le champ a une phase ou l'atome est désexcité et le champ a une phase opposée. La deuxième zone remélange les deux états de l'atome, ce qui fait que lorsqu'on détecte finalement l'atome, on n'a pas moyen de savoir si l'atome a traversé la cavité dans un état ou dans l'autre à cause de ce mélange, et ceci fait qu'on projette le champ dans une superposition des deux états de type chat de Schrödinger. Une fois que cet atome a été préparé, il faut évidemment mesurer le système et on envoie une succession d'atomes dans la cavité qui à l'aide d'une version modifiée de la mesure QND permettent de reconstituer le chat de Schrödinger et de sa **fonction de Wigner** c'est-à-dire la carte de son état du champ.

Toute la physique que l'on cherche à développer maintenant dans ce domaine, ce qu'on appelle la théorie quantique de l'information cherche à maintenir la cohérence quantique le plus longtemps possible pour essayer de fabriquer des dispositifs qui vont se servir de ces interférences quantiques et faire des choses que la physique classique ne permet pas. L'ordinateur quantique, en étant la limite extrême, serait un système constitué d'un grand nombre d'atomes ou de photons travaillant dans des superpositions d'états tels qu'à la fin la mesure d'une interférence convenablement choisie permettra de répondre à une question beaucoup plus rapidement que ne le ferait un ordinateur classique. Mais je n'ai pas le temps pour vous parler de cela. Je voudrais simplement en conclusion insister sur le fait qu'il s'agit d'un travail d'équipe. J'ai travaillé depuis plus de 30 ans avec Jean-Michel Raimond, plus de 20 ans avec Michel Brune et toutes les décisions que nous avons prises dans le groupe et toutes les idées que nous avons eues viennent de ce travail collectif, et certaines de ces idées viennent d'eux avant tout et je voudrais insister là-dessus.



Je voudrais également insister sur le rôle important de deux jeunes chercheurs, Igor Dotsenko et Sébastien Gleyes, qui ont joué un rôle essentiel dans les dernières expériences des travaux dont je vous ai parlé.

Enfin, je voudrais conclure sur l'atmosphère exceptionnelle du laboratoire Kastler-Brossel. C'est un laboratoire dans lequel les fondateurs Alfred Kastler et Jean Brossel ont insufflé un esprit de liberté de travail de physique fondamentale, sans avoir à chercher et à se préoccuper de l'application, qui est extrêmement fructueux. Dans la même salle, il y a 46 ans, nous avons pris cette photo le jour où le Prix Nobel d'Alfred Kastler a été annoncé en 1966, et vous voyez qu'il y a Claude Cohen-Tannoudji, Alfred Kastler et moi-même sur la même photo. Je trouve que c'est assez émouvant.



- Pr. Rajae EL AOUD (Directrice des Séances)

Merci M. Haroche de cette conférence qui nous coupe le souffle. Toutes mes félicitations pour ce parcours accompli. Nous sommes très touchés de ce partage du savoir avec la communauté marocaine et merci pour votre contribution à l'avancée de la science et des connaissances.

Notre prochain orateur est M. Cédric Villani. C'est un mathématicien français, très jeune comme vous pourrez le constater. Directeur de l'Institut Henri Poincaré et professeur à l'Université Claude Bernard à Lyon. Il a reçu la médaille Fields en 2010, il est spécialiste de l'analyse et a travaillé sur des problématiques issues de la physique statistique, de l'optimisation et de la géométrie riemannienne. Il va nous entretenir pendant une quarantaine de minutes par une conférence intitulée : «Les mathématiques et la physique, un mariage heureux : quelques réflexions sur les tribulations de l'entropie, allant et venant entre mathématiques et physique». La parole est à vous Mr. Villani.

**LES MATHÉMATIQUES ET LA PHYSIQUE :
UN MARIAGE HEUREUX
«QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LES TRIBULATIONS
DE L'ENTROPIE, ALLANT ET VENANT ENTRE
MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUE»**

Pr. Cédric VILLANI

*Professeur à l'Université Claude Bernard - Lyon 1,
Directeur de l'Institut Henri-Poincaré, Paris,
France*



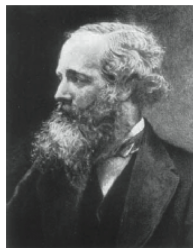
Monsieur le Secrétaire Perpétuel, Madame la Directrice des Séances, Chers collègues, Chers amis,

C'est un grand honneur pour moi de prendre la parole ici devant l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Comme ça a été rappelé par le Secrétaire Perpétuel, ma visite, la première au Maroc, s'inscrit dans le cadre d'une invitation faite par l'Institut Français au Maroc alliée à un ensemble de manifestations liées à la promotion des mathématiques. En particulier cette année verra la première édition de la manifestation «MATH.en.JEANS» effectuée pour la première fois au Maroc. C'est dans ce cadre là que je vais intervenir dans un périple qui passera par Rabat, par Marrakech et par Casablanca. Le Secrétaire Perpétuel a aussi rappelé ces questions de vulgarisation, d'éducation, de culture scientifique - culture mathématique dans mon cas - jouent un rôle important dans le développement des sciences. A ce sujet, je suis très heureux de saluer dans l'auditoire la présence d'Yves Coppens et de Philippe Taquet dont j'ai lu certains ouvrages avec fascination pendant ma jeunesse à une époque où j'étais fasciné par les ouvrages d'histoire naturelle.

D'autres choses ont également été rappelées par le Secrétaire Perpétuel comme le dosage entre la théorie et l'application, les relations de coopération entre les pays et entre les individus. Serge Haroche a parlé de certains des grands scientifiques qui ont influencé son parcours; en ce qui me concerne ça a aussi été le cas. Il y a eu en particulier l'influence de mon directeur de thèse, de mon tuteur à l'Ecole Normale Supérieure et d'autres à Toulouse et à Atlanta; ce genre de rencontres a façonné mon style. On va voir également dans cet exposé le rôle d'interactions entre individus et puis j'insisterais sur le rôle d'interaction entre disciplines. Mathématiques et physique était le thème naturel dans le cadre de cette rencontre puisque depuis fort longtemps elles sont des disciplines sœurs fortement associées à travers des figures emblématiques comme Galilée, comme Newton et d'autres.

Aujourd'hui, je vais insister sur un autre aspect de ce mariage, cette interaction, entre les mathématiques et la physique, notamment l'un des enfants de ce mariage, l'entropie, un concept dont on ne peut plus dire s'il s'agit à la fin d'un concept physique ou d'un concept mathématique, qu'il s'agit des deux à la fois. L'entropie est un concept qui traverse une bonne partie de mon œuvre. A un moment j'avais coutume de dire que le seul point commun entre mes différents articles était qu'il est toujours question d'entropie. Ce n'est plus tout à fait vrai, mais ça reste un sujet important dans les $\frac{3}{4}$ de mon travail, avec cette faculté exceptionnelle de l'entropie de passer d'un thème à l'autre.

Révolution conceptuelle 1865-1875



James Maxwell



Max Planck

Avancée majeure en modélisation : l'équation de Boltzmann

Avancée majeure en mathématique : l'entropie

Avancée majeure en EDP : étude qualitative en grand temps

Avancée majeure en physique fondamentale : irréversibilité

Pour parler de cette aventure, et d'abord qu'est-ce que c'est que cette entropie? Je vais évoquer une révolution conceptuelle. On a parlé tout-à-l'heure de la révolution qu'a constitué la mécanique quantique, la révolution de la relativité, des révolutions arrivées au début du 20^{ème} siècle. Il y a eu quelques décennies avant d'autres révolutions conceptuelles dont l'impact est tout aussi grand. A cette révolution sont associés principalement deux noms : le premier a déjà été très largement cité, James Clark Maxwell et puis le second Boltzmann, physicien autrichien.

La clé de la révolution se situe sur une décennie (1865-1875) au cours de laquelle les deux grands savants font progresser la discipline jusqu'à la faire approcher d'un niveau assez proche de la vision moderne des choses. On peut dater de cette époque plusieurs avancées majeures :

- Une avancée majeure en modélisation, c'est l'équation de Boltzmann sur laquelle j'ai effectué ma thèse et j'ai travaillé une bonne dizaine d'années.
- Une avancée majeure mathématique : la notion d'entropie.
- Une avancée majeure dans l'étude des Equations Dérivées Partielles (EDP) qui datent d'il y a plus longtemps (18^{ème} siècle). Mais avec l'équation de Boltzmann nous avons pour la première fois un exemple par lequel, en introduisant de bonnes quantités analytiques, on peut obtenir des résultats non triviaux sur le comportement en temps grand des solutions de ces équations.
- Une avancée majeure dans la physique fondamentale : la notion d'irréversibilité sur laquelle je reviendrais.

Comme toutes les révolutions, celle-ci a été installée dans un contexte qui a été préparé par d'autres avancées. On peut citer en particulier les tendances qui ont permis ces révolutions comme le développement des probabilités, Madame Bréchnac vient de nous rappeler quelques éléments fondamentaux de cette naissance des probabilités et de la grande aventure qui a conduit au cours des derniers siècles les scientifiques à domestiquer ce qui semblait justement imprédictible : le hasard et à établir les lois qui gouvernent ce hasard. Un élément fondamental dans cette aventure c'était vers 1800 la démonstration par Laplace du grand théorème dit «la loi des erreurs» et selon lequel une somme de variables aléatoires indépendantes a des fluctuations qui sont réparties selon une loi Gaussienne. C'était l'une des étapes fondamentales de cette avancée probabiliste et, comme je vais l'expliquer, la naissance de la physique statistique moderne s'inscrivait dans ce contexte.

Un autre contexte, selon lequel s'inscrivait la révolution de Maxwell et Boltzmann c'était le développement des sciences sociales et particulièrement l'appropriation par les sciences sociales des outils probabilistes et statistiques, appropriation qui est antérieure à l'appropriation par les sciences dites «dures».

Un troisième contexte dans lesquels s'inscrivait la révolution, c'était le développement de la thermodynamique. Avec Boltzmann, le développement de l'entropie prend un nouveau tour.

L'équation de Boltzmann est utilisée pour modéliser les gaz raréfiés sous une hypothèse de chaos moléculaire. Le mot raréfié est important, si vous voulez étudier un gaz plus dense, vous vous tournerez vers d'autres équations, mais l'équation de Boltzmann représente un régime particulier pour des gaz raréfiés. C'est une équation utilisée à la fois par des physiciens et par des ingénieurs. Comme je vais le rappeler, l'importance de l'équation de Boltzmann dépasse de loin le cadre de son application. Carlo Cercignani a été de loin le premier à s'intéresser à l'équation de Boltzmann et a publié des ouvrages fort intéressants à ce sujet (*The Mathematical Theory of Dilute Gases, Rarefied Gas Dynamics, The Boltzmann Equation and its applications*).

Dans l'équation de Boltzmann, on se représente un gaz comme une assemblée de particules. C'est une vision qui nous est maintenant familière mais qui à l'époque de Maxwell et Boltzmann était extrêmement audacieuse. L'existence des atomes n'a été définitivement admise par la communauté scientifique que vers les années 1910' avec la belle synthèse de Jean Perrain en particulier. Pendant peut-être une cinquantaine d'années, l'hypothèse atomique a été étudiée ainsi que ses conséquences et on a commencé à en tirer des lois de manière très audacieuse. C'est un grand jeu de billard auquel nous convie Maxwell et Boltzmann. A chaque instant des particules entrent en collision et au moment des collisions il y a des chocs qui forcent les vitesses des particules à changer. Cette modification des vitesses entraîne une modification des positions des particules du gaz.

Ces lois du billard sont des lois parfaitement classiques depuis le temps de Newton. Mais il n'empêche que le fait de les considérer en très grand nombre va conférer un tour tout-à-fait particulier à l'analyse. Les équations de Newton deviennent insuffisantes et il faut se doter de nouveaux outils. On ne peut même pas, ne serait-ce qu'écrire des équations correspondantes, il y'en aurait des milliards voire des centaines de milliards de milliards. Evidemment, il faut trouver un nouveau formalisme, une nouvelle écriture mathématique de l'objet que nous cherchons à modéliser. Ce qu'il nous faut c'est une description statistique.

dit Jean Perrain, dans son texte sur les atomes, il s'agit d'expliquer des phénomènes macroscopiques complexes par des phénomènes microscopiques cachés mais simples et répétés un très grand nombre de fois. En fonction des conditions dans lesquelles se fait l'observation, nous avons toute une zoologie d'équations macroscopiques statistiques qui permettent de décrire l'évolution d'une distribution de probabilités dans l'espace des phases, dans l'espace des états d'un ensemble de particules. L'équation de Boltzmann en est une et c'est également le cas de l'équation de Vlazov qui s'applique à la description des plasmas ou à la description statistique des galaxies ou encore de sa cousine l'équation de Fokker Planck qui décrit les mêmes objets avec plus de précision, ou encore les équations de mécanique des fluides.

La grande force de ces équations statistiques est qu'on peut grâce à elles oublier la nature microscopique de certains de ces phénomènes pour centrer sur des phénomènes macroscopiques. On peut ranger dans différentes cases des phénomènes qui nous intéressent, ceci est fondamental. Face à un problème météorologique, qui va faire intervenir de nombreux phénomènes couplés : l'océan, l'atmosphère et ainsi de suite. Si vous ne pouvez pas ranger chacun de ces phénomènes dans une sorte de boîte conceptuelle avec une équation correspondante macroscopique, vous ne pourrez jamais vous en sortir. Cette démarche de remplacer des phénomènes microscopiques par une équation macroscopique est donc fondamentale en sciences. Je note qu'aucune de ces équations n'est démontrée au sens mathématique du terme. Il y a là des problèmes ouverts considérables en physique mathématique : établir rigoureusement le passage de la dynamique de la physique microscopique à la physique macroscopique statistique. Même dans le cas des équations de Vlazov, qui constituent la base de la physique des plasmas, nous n'avons pas de démonstration rigoureuse du passage de la mécanique microscopique à la mécanique macroscopique. C'est encore plus rageant dans le cas de l'équation de la chaleur, utilisée par Fourier dès les années 1810, nous ne savons pas relier la dynamique microscopique des atomes dans un solide à cette fameuse équation de la chaleur. Il y a là des mystères considérables dont la solution recèle peut-être une avancée physique conceptuelle majeure. Nous ne le saurons qu'en résolvant le problème.

Du microscopique au macroscopique

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla_x f = \iint |v - v_*| [f(v') f(v'_*) - f(v) f(v_*)] dv_* d\sigma$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla_x f - \nabla V_{*x} \cdot \left(\int f dv \right) \cdot \nabla_v f = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla_x f + F[f] \cdot \nabla_v f = \varepsilon Q_L(f, f)$$

$$= \varepsilon \nabla_v \left\{ \int_{\mathbb{R}^3} \frac{\Pi_{(v-v_*)^\perp}}{|v-v_*|} (f(v_*) \nabla_v f(v) - f(v) \nabla_v f(v_*)) dv_* \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v}) &= 0 \\ \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v} \otimes \bar{v}) &= -\bar{\nabla} \rho + \bar{\nabla} \cdot \bar{f} + \rho \bar{f} \\ \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \bar{v}] &= \bar{\nabla} \cdot (\bar{f} \cdot \bar{v}) + \rho \bar{f} \cdot \bar{v} - \bar{\nabla} \cdot \bar{q} + r \end{aligned}$$

Autant de mystères !

Ces équations s'appliquent bien mais ne sont pas «démonstrées»

En 1973, Lanford établit un pas dans ce problème du passage de la mécanique microscopique à la mécanique macroscopique. Il résout un problème dont la solution était source de controverses chez les mathématiciens et chez les physiciens. Lanford, en 1973, démontre que l'on peut déduire rigoureusement l'équation de Boltzmann des équations de Newton sur un petit intervalle de temps. Il travaille sur un modèle avec N sphères dures, chacune est de rayon r . On s'intéresse à une limite où N est très grand, où le rayon est très petit, mais où la section efficace est de l'ordre de 1 de sorte que chaque particule rencontrera les autres environ une fois par unité de temps. C'est le régime dans lequel on s'attend à ce que l'équation de Boltzmann soit valide. Il utilise pour ce faire une hypothèse de chaos moléculaire fort consistant à dire qu'au début de l'expérience les particules sont distribuées au hasard et qu'il n'y a pas de corrélation entre elles. Il néglige complètement les effets quantiques et s'intéresse uniquement à une description classique. Il parvient à établir ce théorème, peut-être le plus important en physique mathématique statistique seulement sur un petit intervalle de temps alors que sur un grand intervalle de temps que l'équation de Boltzmann prend tout son intérêt. Nous sommes là face à de nombreuses énigmes qui demeurent dans la théorie des gaz. Son résultat laisse de nombreuses questions en suspens.

Théorème de Lanford (1973)

Lanford obtient rigoureusement l'équation de Boltzmann pour N sphères dures de rayon r , dans la limite $N \gg 1$ $r \ll 1$ $Nr^2 \sim 1$



Sous une hypothèse de chaos moléculaire fort au temps initial, et sur un petit intervalle de temps...

Un autre point que l'on peut noter et qui ne dit rien sur la propagation du chaos qui est probablement le moteur de l'équation de Boltzmann. Au fur et à mesure que les particules se rencontrent, ils apprendront à se connaître, les corrélations commencent à se faire. Malgré ces limitations, Lanford montre qu'il est possible d'établir un pont entre le monde microscopique inaccessible de Newton et le monde macroscopique, statistique et prévisible, de Boltzmann. Il y a là un résultat conceptuel fondamental.

Une autre des avancées considérables de cette révolution statistique est l'entropie. C'est un concept aussi profond que simple. La description statistique est forcément moins précise la description complète, elle établit un résumé et va donc laisser un nombre considérable de possibilités W pour l'état complet du système. Ce nombre de possibilités traduit l'incertitude que l'observation macroscopique peut nous laisser. Cette incertitude peut être plus ou moins grande, si toutes les particules sont dans le même état, l'observation d'une particule donnera des informations sur toutes les particules. Si en revanche elle couvre une palette d'états complètement différents, l'observation d'une particule ne donnera que peu d'informations sur les autres particules. Il y a donc en fonction des distributions statistiques une plus ou moins grande incertitude. Le paradigme de l'entropie : le principe consiste à prendre le logarithme de ce nombre d'états, disons qu'il mesure le nombre qu'il faut écrire pour compter tous les états, et on le multiplie par une constante, on obtient ainsi l'entropie :

$$\text{Entropie : } S = k \log W$$

C'est une formule concise et hautement profonde comme d'autres formules célèbres dans l'histoire des sciences ($E = mc^2$ ou d'autres). L'entropie mesure pour une précision fixée des observations macroscopiques, que nous pouvons faire, le volume ou le nombre de configurations microscopiques qui sont compatibles avec les observations. L'entropie consiste donc à se poser la question : dans quelle mesure la configuration que j'observe est exceptionnelle? Est-ce qu'elle correspond à beaucoup de possibilités ou à peu de possibilités? On peut jouer sur les mots en disant que cette entropie est un concept entropique, elle dépend de notre échelle et dépend des observations que nous pouvons faire. Une volonté toute puissante, toute connaissante, qui connaîtrait toutes les particules de l'univers ne connaîtrait pas l'entropie. L'entropie n'est pas une notion intrinsèque, elle dépend de l'observateur et de son échelle. Boltzmann, à travers un exercice génial mais lourd de conséquences, nous montre comment calculer cette entropie :

Exercice (Boltzmann)

On se donne des fréquences rationnelles f_1, f_2, \dots, f_k

Combien de façons de ranger N particules dans k boîtes en respectant ces fréquences ?

Environ $\exp(-N \sum f_i ; \log f_i)$

D'où la fonctionnelle H qui peut être analysée en pratique :

La fonctionnelle H de Boltzmann (1872)

$$S(f) = -H(f) := - \int_{\Omega_x \mathbb{R}_v^3} f(x,v) \log f(x,v) \, dv \, dx$$

Boltzmann continue à étudier cette quantité en association avec l'équation qu'il a établie et qu'il a perfectionnée. Il montre que cette quantité, l'entropie, qui mesure l'incertitude, augmente spontanément au cours du temps quand on l'a fait évoluer le long de l'équation de Boltzmann. C'était un accomplissement phénoménal conceptuellement parlant. On savait depuis des décennies qu'il y avait ce principe de la thermodynamique selon laquelle l'entropie ne peut qu'augmenter. Mais c'était une loi qui devait être acceptée sans discussion. Boltzmann le transforme en un théorème, un argument que vous n'acceptez que parce qu'on vous a convaincu de sa véracité.

Même si la validité de la Loi de Boltzmann ne concerne que les gaz raréfiés, un modèle parmi beaucoup d'autres, son importance conceptuelle est considérable. Elle montre qu'on peut démontrer ce second principe et vous convaincre de sa validité, un accomplissement dont Boltzmann était extrêmement fier. La formule que j'ai relatée ici relate l'évolution de l'entropie au cours du temps le long de l'équation de Boltzmann, elle ne peut qu'augmenter mais jamais diminuer. Plus généralement, et c'est la vision qu'on a depuis Boltzmann, sous l'effet de processus microscopiques aléatoires et réversibles comme l'est la dynamique de Newton, l'entropie va toujours augmenter à l'échelle macroscopique. Ce principe est une prédiction et c'est aussi une façon de comprendre le

monde, c'est un principe directeur. A la lumière de ce principe, considérons l'expérience bien connue dans laquelle on sépare une boîte en deux compartiments avec une cloison étanche. On met du gaz dans un compartiment, on met le vide dans l'autre compartiment, et on retire la cloison au temps initial. Que va-t-il se passer? Nous avons l'habitude de penser que le vide va aspirer le gaz. Boltzmann nous explique qu'il faut le comprendre d'un point de vue statistique. Si le gaz envahit toute la boîte, ce n'est pas parce que le vide aspire le gaz, c'est simplement parce que l'état dans lequel le gaz occupe toute la boîte est associé à une incertitude, à une entropie beaucoup plus grande que le gaz qui occupe la moitié de la boîte. C'est donc seulement des phénomènes aléatoires qui expliquent cette marche irréversible du gaz pour occuper toute la boîte.

Une analogie que j'aime utiliser dans la vie de tous les jours c'est les enfants qui sortent dans la cour de leur école vont se disperser au hasard les uns et les autres sans se concerter et occuper en quelques minutes toute la cour. Du fait des interactions indépendantes, ils vont occuper l'état d'entropie maximal. Vous allez dire qu'il y a un problème dans l'analogie. Il arrive par hasard que les enfants soient tous regroupés dans un coin de la cour. Si les gaz sont régis par des lois probabilistes, il va arriver que par hasard le gaz ne va pas occuper toute la boîte. Ce serait oublier les nombres formidables mis en jeu là dedans. D'abord les particules, il y en a beaucoup, on ne parle pas de 10 ou 30 élèves, on parle de 10¹⁷ particules, c'est considérable. Les probabilités qui vont être associées à cela vont typiquement être énormes et interviennent de manière combinatoire : la factorielle d'un grand nombre est un nombre gigantesque.

$$\text{Calcul : } N = 10^{17} \frac{\text{Nb possibilités (boîte entière)}}{\text{Nb possibilités (demi-boîte)}} > \left(\frac{\text{Vol (galaxie)}}{\text{Vol (proton)}} \right)$$

Contre de tels nombres, il n'est pas possible d'aller, c'est pourquoi cette loi de Boltzmann est irréversible.

Toute la théorie, toute la biologie, la préservation des êtres vivants, consiste à dépasser cette loi de la thermodynamique, à faire quelque chose qui semble impossible : préserver des états de basse entropie que nous sommes, des états très ordonnés. Dans des réflexions théoriques, au cours de la vie, effectuées par des physiciens et des biologistes, on retrouve cette question liée au paradoxe théorique du démon de Maxuelli : comment faire en sorte que des êtres vivants puissent propager ces états de basse entropie de la même façon que le démon hypothétique de Maxuelli qui va minutieusement à l'encontre du principe d'entropie en créant de manière astucieuse les états de basse entropie. Une interprétation de ce démon de Maxuelli est précisément le fait qu'on peut faire une sorte d'échange entre des questions d'information et des questions de désordre.

Boltzmann termine tragiquement, se suicide en 1906, convaincu qu'on ne parviendra jamais à observer les preuves expérimentales de l'existence des atomes, par une ironie tragique au même moment où l'on comprend que le mouvement brownien est précisément une observation des fluctuations statistiques liées à la nature atomique de la matière. Sur sa tombe se trouve la fameuse formule dont je vous ai déjà entretenus :

$$S = k \log W$$



Ses travaux ont été repris, utilisés et développés par de grands physiciens et mathématiciens comme : Einstein, Hilbert, Danshin, Mark Kac, Smulochowski, Perrain, et autres, et se sont avérés une source d'inspiration considérable. Parmi les quelques citations de mathématiciens que j'ai compilées, en voici de David Hilbert :

- [David Hilbert](#) (1900) : «Le travail de Boltzmann sur les principes de la mécanique suggère le problème de développer mathématiquement les limites (...) menant de la description atomiste aux lois des milieux continus.»

Marc Kac explique aussi comment le travail de Boltzmann est l'un des ouvrages les plus importants de toute l'histoire des sciences, Marc Kac était lui-même l'un des probabilistes les plus importants du siècle.

L'entropie de Boltzmann s'est retrouvée d'usage polymorphe et universel. Elle est distincte de l'entropie de Sinai-Kolmogorov et de sa complexité, mais toutes ces quantités quantifient la possibilité de décrire un système et ont envahi notre univers y compris dans ses développements informatiques et dans le développement de la transmission d'un langage. La théorie de la communication est basée en grande partie sur l'entropie de Shannon. La physique statistique d'équilibre, développée par Gibbs à partir du 20^{ème} siècle, elle aussi basée sur des notions d'entropie, est universelle aujourd'hui dans la compréhension du changement du temps.

Je terminerai par le transparent ci-après dans lequel je parlerai du destin exceptionnel de l'entropie en tant qu'objet physique mais aussi en tant qu'objet mathématique :

L'entropie, polymorphe et universelle

- Explique l'[approximation hydrodynamique](#) de Boltzmann
- Fondamentale en mécanique des fluides compressible (chocs !)
- Fonde la théorie de l'information, avec l'information de Fisher
- Explique le [théorème central limite](#) (Barron, Ball-Barthe-Naor...)
- Outil clé dans le grand théorème de régularité de [Nash](#)
- A permis à [Perelman](#) de résoudre la conjecture de Poincaré
- Utilisée par [Varadhan](#), Yau etc. pour la limite hydrodynamique
- Adaptée par [Voiculescu](#) pour les [algèbres de Bon Neumann](#)
- Base de la «courbure de Ricci synthétique» (Lott-Sturm-V)
- Base de l'[équation de diffusion](#) dans les espaces métriques-mesurés

A partir du moment où il s'agit d'un concept mathématique combinatoire, il s'agit d'un concept que les mathématiciens peuvent s'approprier et qui n'a pas manqué d'être utilisé dans de nombreuses situations. L'approximation hydrodynamique de Boltzmann, qui nous permet de remplacer les équations mécaniques des gaz par les équations de la mécanique des fluides, est basée sur la notion d'entropie. Et le fait que l'augmentation de l'entropie force le gaz à aller vers un état où la distribution des vitesses sera gaussienne. Ce phénomène de convergence vers un état gaussien est l'un des phénomènes sur lesquels j'ai travaillé pendant des années.

L'entropie sert aussi en mécanique des fluides compressibles à distinguer les chocs pertinents des chocs non-pertinents, elle fonde la théorie de l'information et peut être aussi utilisée pour expliquer le théorème central de Laplace. L'entropie a été d'une grande utilité dans le grand théorème de régularité de Nash dans les années 1950. On voit ici la puissance du concept, cette entropie a permis à Nash d'expliquer un phénomène qui n'avait aucune motivation au départ. Elle a permis plus récemment à Perelman de résoudre la fameuse conjecture géométrique de Poincaré et la compréhension des variétés de dimension 3. Elle a aussi été utilisée par Voiculescu pour les algèbres de Von Neumann.

Pour terminer sur des travaux dans lesquels j'ai participé, l'entropie est à la base d'une petite révolution récente dans la façon de comprendre la courbure de Ricci, courbure qui est un élément fondamental de la relativité générale dont a parlé Madame Bréchnignac. Une façon de quantifier cette courbure de Ricci consiste à étudier les interactions entre les problèmes d'optimisation, les problèmes de courbure et les problèmes liés à l'entropie. La façon dont l'entropie d'un gaz évolue au cours du temps, quand on le fait passer d'un état à un autre, est liée à courbure de Ricci. Ceci a constitué les bases d'un développement également mathématique : comment définir une équation de diffusion dans un espace métrique-mesuré sans aucune notion de régularité. Là encore l'entropie a joué un rôle fondamental en renversant le paradigme : au lieu de montrer qu'une équation de diffusion fait augmenter l'entropie, on définit l'équation de diffusion comme la méthode la plus efficace pour augmenter l'entropie.

On voit ici comment l'entropie a fait tout ce voyage, mathématiques-physique, physique-mathématiques et ainsi de suite et était une source d'inspiration extrêmement féconde entre disciplines.

Je vous remercie.

- Pr. Rajae EL AOUD (Directrice des Séances)

Merci Monsieur Villani. En tout cas c'était une conférence très intéressante et s'il y avait un mariage heureux entre physique et mathématiques, il était inéluctable. C'est ce qui a d'ailleurs préjugé à l'organisation de notre session plénière. Merci encore.

Désignation du nouveau Directeur des Séances

- **Pr. Rajae EL AOUAD** (Directrice des Séances)

Chers membres de l'Académie,

Nous reprenons notre session plénière, mais avant cela nous allons renouveler le Directeur des Séances, et je donne tout de suite la parole à notre Chancelier. Merci.

- **Pr. Mostapha BOUSMINA** (Chancelier)

Merci Madame la Directrice des Séances. J'aimerais tout simplement remercier Madame la Directrice qui a dirigé nos séances avec rigueur, avec beaucoup d'entrain et je vous invite à me joindre pour la remercier, pour l'applaudir.

- **Pr. Rajae EL AOUAD** (Directrice des Séances)

Pour le renouvellement de cette position, Monsieur Driss Ouazar est proposé à votre approbation.

“ Applaudissements de l'audience “



Je voudrais juste dire un petit mot, dire que j'ai pris plaisir à diriger nos travaux pendant cette année et j'espère que vous aurez le même plaisir avec le Pr. Driss Ouazar qui a promis d'être aussi rigoureux sur le temps. Merci.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Je vous remercie tous, je tiens à remercier Monsieur le Secrétaire Perpétuel, Monsieur le Chancelier et la Directrice des Séances.

J'essaierai, avec votre permission, d'être aussi rigoureux pour tenter de rattraper autant que possible le retard accusé sur la programmation des interventions.



Nous allons donc démarrer notre première séance plénière sur le thème «Physique des hautes énergies et sciences de l'Univers» par la présentation du Pr. Jean-Michel Alimi, Directeur au CNRS (France) et qui est au Laboratoire Univers et Théorie à l'Observatoire de Paris.

SESSION PLÉNIÈRE I :
PHYSIQUE DES HAUTES ENERGIES ET
SCIENCES DE L'UNIVERS

ORIGINE DE LA STRUCTURATION DE L'UNIVERS ET NATURE DE L'ÉNERGIE NOIRE

Pr. Jean-Michel ALIMI

*Laboratoire Univers et Théories et DEUS
(Dark Energy Universe Simulation)
Consortium Observatoire de Paris-Meudon, France*



Résumé

L'univers est devenu depuis la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, un objet physique comme les autres. C'est dans ce cadre théorique que la cosmologie moderne a pu déduire un des résultats les plus remarquables dans l'histoire des idées; l'univers est dynamique, il est en expansion. Récemment, il a été découvert, que cette expansion cosmique était accélérée. Quelle est l'origine de cette accélération? Ou en d'autres termes quelle est la nature de l'énergie noire? Composante mystérieuse qui représenterait plus de 70% du contenu énergétique de notre univers et serait la source de cette accélération est, avec l'origine de la structuration de notre Univers parmi les défis majeurs de la cosmologie moderne. Afin de tenter de répondre à ces deux questions qui s'interrogent l'une et l'autre, nous avons été conduit à réaliser les premières simulations au monde de la structuration de tout l'Univers observable en présence d'énergie noire, du Big Bang jusqu'à aujourd'hui. Cela n'a été possible qu'en disposant des ressources de calculs parmi les plus importantes qui n'aient jamais été réunies et après un effort d'optimisation numérique considérable.

Nous présentons dans cette conférence les différentes possibilités d'interpréter l'énergie noire qui toutes interrogent les principes fondamentaux de notre paradigme cosmologique. Nous discutons alors le schéma de formation des structures cosmiques et les moyens de le simuler dans un modèle cosmologique donné. Nous présentons enfin les premiers résultats que nous avons obtenus issus de nos simulations et ce qu'ils nous disent sur la nature de cette composante mystérieuse.

I. Introduction

Je tiens tout d'abord à remercier vivement Mr le Professeur Omar Fassi-Fehri Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques du Maroc, ainsi que l'ensemble du comité d'organisation de la session plénière solennelle 2013, de leur invitation. C'est un honneur et une immense satisfaction pour moi, d'avoir pu présenter devant une audience prestigieuse quelques uns de mes éléments de réflexions sur quelques grandes questions de la cosmologie moderne et les résultats préliminaires des premières simulations au monde que j'ai réalisées avec mon équipe de recherche², de la structuration de tout l'Univers observable du Big bang jusqu'à aujourd'hui en présence d'énergie noire [Alimi et al 2012].

Le statut scientifique de la cosmologie est aujourd'hui incontestable. On peut dater son émergence, avec la théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein. Dans ce cadre théorique nous avons réellement la capacité de décrire scientifiquement l'Univers, de mieux comprendre son origine, son évolution et sa structure. Bien évidemment la profonde difficulté d'aborder un tel objet singulier ne permet pas toutefois d'élaborer un modèle cosmologique sans zone d'ombre. Mais n'est-ce pas le cas de tous les objets de la réalité physique qui nous entoure?

Dans le cadre de la Relativité Générale d'Albert Einstein, une des propriétés, la plus remarquable qui ait été obtenue est la nature dynamique de l'Univers. Il est en expansion. Deux points pris au hasard dans l'Univers s'éloignent au cours du temps, et ils s'éloignent d'autant plus vite qu'ils sont distants l'un de l'autre. Cette expansion cosmique est le résultat de la nature auto gravitante de l'Univers, elle est une solution cosmologique dynamique standard des équations d'Einstein. L'observation du mouvement de récession des galaxies confirme cet état dynamique. Récemment il a été mis en évidence à l'aide de la mesure de distances de galaxies lointaines hôtes de supernovae (stade ultime d'étoiles massives) [Perlmutter et al 1998, Riess et al 1998] que cette expansion cosmique était, dans l'histoire plutôt récente de notre univers, accélérée. Ce résultat a valu à leurs auteurs, S. Perlmutter, A. Riess et B. Schmidt, le prix Nobel de Physique 2011³. Cette accélération cosmique est aujourd'hui confirmée à l'aide de mesures indépendantes, de distances cosmologiques, et/ou du contenu énergétique de l'univers [Amendola et Tsujikawa 2010, Astier et Pain 2012].

L'interprétation théorique de l'origine de l'accélération cosmique récente de notre Univers nécessite une discussion critique des principes fondamentaux de la cosmologie moderne⁴. Nous discuterons dans cet article ces principes fondamentaux, et la description standard de notre univers et au delà, de l'origine de sa structuration, qu'ils induisent. Nous présenterons ensuite les évidences observationnelles de l'accélération cosmique en insistant sur le renouvellement complet du contenu énergétique de notre univers

2- L'équipe du projet «Dark Energy Universe Simulation», DEUS réunit J.-M. Alimi, I. Balmes, V. Bouillot, P.-S. Corasaniti, Y. Rasera, V. Reverdy. Nous tenons également à remercier l'équipe d'assistance du TGCC (Très Grand Centre de Calcul) du CEA et du support de GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif) et en particulier, S. Requena (GENCI) et X. Delaruelle et J.-F. Richet (TGCC).

3- http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/advanced-physicsprize2011.pdf

4- De ce point de vue, c'est une situation qui rappelle celle du début du 20^{ème} siècle où les propriétés du rayonnement du corps noir et la constance de la vitesse de la lumière n'ont trouvé d'explication qu'avec l'élaboration d'un nouveau paradigme physique issu des révolutions conceptuelles de notre compréhension de la réalité physique qu'ont représenté la mécanique quantique et la relativité restreinte.

qu'elles impliquent. En assimilant l'origine de l'accélération cosmique à une composante mystérieuse, effectivement présente dans l'univers et que l'on nomme l'énergie noire ou seulement effective qui ne représenterait que l'effet d'une modification nécessaire des lois de la physique aux très grandes échelles, l'univers apparaît alors à 95% invisible. Environ 25% est sous forme de matière noire, nécessaire en premier lieu d'un point de vue cosmologique au processus de structuration de notre Univers, et 70% sous forme d'énergie noire responsable de l'accélération récente de notre Univers. Nous montrerons ensuite que chaque modèle d'énergie noire ou encore chaque interprétation de l'origine de l'accélération cosmique, résulte d'une relaxation d'un des principes fondamentaux du paradigme de la cosmologie moderne⁵. Mais de nombreux modèles sont cependant possibles [Copeland et al 2006, Amendola & Tsujikawa 2010]. Tous, sont capables d'expliquer avec une réussite comparable d'un point de vue statistique vis à vis des données observationnelles disponibles, respectivement la dynamique globale de notre univers (en reproduisant le diagramme de Hubble déduite de l'analyse des courbes de luminosité des supernovae), et les propriétés du fond de rayonnement cosmologique (en reproduisant le spectre de fluctuations primordiales observé), c'est-à-dire la dynamique de la matière dans l'univers faiblement perturbée. Comment alors les distinguer? C'est le croisement du problème de la nature de l'énergie noire avec celui de l'origine de la structuration de l'Univers qui le permet. Cette démarche fonde le projet DEUS (Dark Energy Universe Simulation), elle consiste à étudier conjointement la signature spécifique que l'énergie noire suivant sa nature peut laisser sur la structuration de l'univers et réciproquement d'inférer de la structuration de l'univers la nature de l'énergie noire. Mais tout ceci n'est réalisable qu'avec l'aide de la simulation numérique très haute performance.

Trois grandes classes de modèles cosmologiques ont été simulées, où l'effondrement gravitationnel de la matière noire tout au long de l'histoire de l'univers sur tout le volume de l'Univers observable a été calculé. Dans un tel volume, une large statistique d'objets formés et spécialement les objets les plus massifs sont accessibles, et les erreurs statistiques sur les échelles spatiales les plus grandes se réduisent à la variance cosmique (incertitude statistique inhérente à l'observation de l'Univers sur les très grandes échelles). Nous discuterons comment il a été possible de réaliser pour la première fois au monde de telles simulations. L'effort considérable d'optimisation qu'il a été nécessaire d'accomplir, non seulement sur l'aspect dynamique du calcul, c'est à dire la résolution du système Vlasov-Poisson dans un univers en expansion, mais sur tous les aspects d'une simulation numérique, c'est-à-dire, la génération des conditions initiales sur l'échelle de l'univers observable, la gestion mémoire sur un supercalculateur massivement parallèle à grains fins, la gestion et le traitement des données et des entrées sorties... Pour une simulation de cette taille, toutes ces tâches ont constitué des difficultés considérables auxquelles il a fallu faire face conjointement.

Comme nous le verrons enfin, les résultats préliminaires issus des simulations DEUS montrent que les moyens de contraindre la nature de l'énergie noire à partir de la structuration de l'univers sont réels. Même s'il n'est pas encore possible de déterminer le modèle d'énergie noire adapté à notre univers sans ambiguïté, nous montrerons que nos simulations favorisent une interprétation théorique de cette composante mystérieuse qui confirme le rôle clé de cette problématique sur l'évolution future de la cosmologie moderne et au delà de la physique.

5- Nous présenterons également l'hypothèse qui consiste à interpréter l'accélération cosmique récente comme résultant de l'effet induit des inhomogénéités de matière dans l'univers négligeables dans une application stricte du principe cosmologique.

II. Les Principes Fondamentaux du Paradigme Cosmologique

L'origine de l'accélération cosmique récente de notre univers ou en d'autres termes, la nature de l'énergie noire, pose explicitement la question des principes fondamentaux de notre paradigme cosmologique. En effet, les différentes interprétations de cette accélération cosmique que nous discuterons plus bas peuvent se concevoir comme une relaxation respectivement du principe d'équivalence ou du principe cosmologique ou comme l'introduction d'une composante énergétique à pression suffisamment négative sur les échelles cosmologiques dont l'origine physique doit résulter finalement de notre compréhension théorique de l'infiniment petit. Avant de discuter plus en détail ces interprétations, présentons donc brièvement ces principes fondamentaux.

II.1. Le principe d'équivalence

La masse d'un corps est associée à la quantité de matière ou d'énergie que ce corps renferme. Qu'il s'agisse d'une particule élémentaire, d'un objet macroscopique, d'un astre ou même de l'univers tout entier. Nous savons depuis Newton, que deux corps massifs s'attirent mutuellement, c'est ainsi que la Terre tourne autour du Soleil ou que la pomme tombe sur la Terre après s'être décrochée de l'arbre. Nous savons également qu'un corps soumis à une force est mis en mouvement du fait qu'il acquiert une accélération. En mécanique classique, les notions de masse mises en jeu dans ces deux phénomènes physiques sont indistinguables. Pourtant il s'agit de deux notions de masses de nature très différentes; la masse inertielle qui, intervient dans la seconde loi de Newton reliant accélération et force et qui mesure la résistance au mouvement et la masse gravitationnelle qui intervient dans l'expression de la loi de la gravitation universelle de Newton et mesure l'intensité de la force ressentie par une masse donnée du fait de la présence d'autres masses. Suivant l'expérience célèbre de Galilée au sommet de la tour de Pise (expérience fort probablement légendaire, que Galilée aurait tout au moins par la pensée envisagée et dont il aurait alors su déduire les conséquences théoriques sur la nature de la gravitation), deux corps, quelles que soient leur nature, leur composition, leur structure, leur forme... «tombent» de la même façon. Les deux masses inertielles et gravitationnelles, bien que de nature différente, sont égales, l'accélération acquise par une particule de masse m (mg ou m_i) plongée dans un champ de gravitation est donnée par :

$$\vec{a} = \left(\frac{m_g}{m_i} \right) \vec{g} = \vec{g} \text{ (si } m_i = m_g \text{)}$$

où \vec{g} est l'accélération gravitationnelle terrestre d'amplitude $9,80665 \text{ m.s}^{-2}$. Cette «équivalence» a été abondamment testée expérimentalement, successivement par Etvös (1889), Dicke (1964), ... [C.W. Misner & J.A. Wheeler, 1973, C. M. Will 2006]. Les expériences au sol les plus récentes ont permis d'établir l'égalité entre m_i et m_g à une précision de 10^{-13} soit une des précisions les plus élevées en physique. Les expériences spatiales (Microscope⁶) visent à tester l'égalité entre m_i et m_g , avec une précision de 10^{-15} . Cette universalité signifie qu'un champ gravitationnel ne peut être distingué d'un champ d'accélération, et alors qu'elle est fortuite en mécanique classique, elle est posée comme le principe fondamental de la Relativité Générale, c'est à dire le principe d'équivalence. On peut cependant distinguer (au moins) deux énoncés de ce principe d'équivalence, tout d'abord le principe d'équivalence faible, qui s'identifie au principe d'Einstein et qui établit l'universalité de la chute libre, quelles que soient les énergies de liaison non

6- Expérience spatiale MICROSCOPE : <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/2841-microscope.php>

gravitationnelles internes au corps. Ce principe établit ainsi que les lois de la physique sont en tout point de l'espace-temps les lois données par la relativité restreinte, et le second énoncé, le principe d'équivalence fort. Cette fois ce principe établit l'universalité de la chute libre, quelles que soient les énergies de liaison, y compris les énergies gravitationnelles. Bien que la Relativité Générale confonde ces deux énoncés, la construction d'une extension possible de la Relativité Générale consistant à introduire par exemple un degré scalaire supplémentaire à la métrique pour décrire la gravitation se fondent justement sur le respect du premier de ces principes, le principe d'équivalence faible mais sur une relaxation ou une violation du principe d'équivalence fort. Et comme nous le verrons ci-après, cela peut alors, constituer un cadre théorique adapté pour une modification nécessaire des lois de la physique aux grandes échelles c'est à dire une extension de la relativité générale à l'échelle de l'univers capable d'interpréter l'accélération cosmique récente (voir section IV.2), [Alimi & Fuzfa 2007-2009].

II.2. Le Principe de Covariance généralisée

Ce principe est la retranscription mathématique du principe d'équivalence. Du fait de l'universalité de la chute libre, l'accélération est identifiée à la gravitation, le principe d'équivalence pose alors par principe l'existence d'un référentiel localement inertiel, c'est-à-dire localement, dans une région suffisamment petit de l'espace et du temps, l'existence d'un référentiel où l'accélération pour une particule libre (soumis à aucune force) s'annule. Le principe de covariance peut s'envisager comme l'aboutissement conceptuel du principe de Galilée. Ce dernier s'applique à la mécanique classique, où l'invariance par transformation de Galilée des lois de la mécanique traduit la conservation de l'invariant géométrique que représente l'élément de longueur infinitésimal Pythagoricien $dl^2 = d_{ij} dx^i dx^j$. Le principe de relativité restreinte (qui traduit l'invariance par transformation de Lorentz des lois de la Relativité Restreinte en conservant le temps propre minkowskien $d\tau^2 = -\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = c^2 dt^2 - dx^2$ invariant) est une première extension du principe de Galilée, le principe de covariance se donne finalement pour objectif de construire des lois de la physique invariante selon toutes les transformations de coordonnées ou valables dans tous les systèmes de référence c'est-à-dire quel que soit le mouvement de l'observateur et/ou de la source. On parlera alors d'invariance par «difféomorphisme» où le temps propre $d\tau^2 = -g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ est conservé ($g_{\mu\nu}$ définit le tenseur métrique généralisé).

Avec le principe d'équivalence et le principe de covariance généralisé nous disposons de tout ce qui est nécessaire conceptuellement et mathématiquement pour construire les équations de la Relativité Générale.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

Ces équations permettent d'interpréter la gravitation en terme géométrique, elles identifient la forme au substrat, c'est-à-dire les propriétés géométriques et dynamiques de l'espace-temps (terme de gauche) à son contenu énergétique (terme de droite). La description de l'espace-temps-matière issu de la relativité générale est une description locale, et seule la courbure de l'espace-temps est effective, une même courbure est ressentie identiquement en tout point (cela traduit le fait que la constante de gravitation G est effectivement une constante dans le temps et dans l'espace). Ce n'est pas le cas dans une théorie scalaire-tenseur, extension de la relativité générale qui ne satisfait pas le principe d'équivalence fort (voir section précédente) où cette fois G dépend, en toute généralité du temps et de l'espace, il est l'inverse du champs scalaire supplémentaire introduit dans ces théories. Lorsque l'on applique la théorie de la relativité générale à

l'univers, celui ci devient dynamique, il est en expansion. Ce résultat est bien vérifié par l'observation du mouvement de récession des galaxies (Hubble 1929).

II.3. Le Principe Cosmologique : la dynamique de l'Univers

Le principe cosmologique traduit le principe de Copernic qui suppose que nous n'occupons pas de place privilégiée dans l'Univers (il s'agit en fait de notre position dans l'espace). Le principe cosmologique pose l'homogénéité et l'isotropie de l'univers aux grandes échelles. Ces symétries maximales de l'espace sont assez bien confirmées à la fois par l'observation du fond de rayonnement cosmique et par la distribution des galaxies dans l'univers. L'observation du fond de rayonnement cosmologique, relique des phases chaudes primordiales de l'univers confirme l'isotropie de la distribution de matière dans l'univers primordial (Satellites COBE (lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/), WMAP (map.gsfc.nasa.gov/), Planck (www.esa.int/planck/)). Les nombreux programmes de cartographie de l'univers consistant à repérer la position d'un très grand nombre de galaxies suggèrent l'homogénéité de la distribution de matière dans l'univers aux grandes échelles. Les plus grands catalogues sont bidimensionnels, seule la position sur le ciel des galaxies est alors connue. A partir de ces catalogues sont construits les catalogues tridimensionnels où est mesuré également le mouvement de fuite des galaxies, aujourd'hui de tels catalogues contiennent jusqu'à plus d'un million d'objets (SDSS (www.sdss.org/)). Au delà de quelques centaines de Mégaparsec, la distribution de matière et donc l'espace nous apparaît donc homogène et isotrope. La métrique adaptée pour décrire un tel espace-temps est la métrique FLRW (Friedman, Lemaître, Robertson, Walker), elle est à symétrie maximale et ne dépend que d'une seule constante, le paramètre de courbure k , qui peut prendre trois valeurs suivant que l'espace est, plat à géométrie Euclidienne ($k = 0$), sphérique à géométrie Gaussienne ($k = +1$) ou hyperbolique à géométrie Lobachevskyenne ($k = -1$).

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

Une telle métrique permet rigoureusement de définir un temps cosmique qui permet de mesurer l'âge de l'univers. Avec une telle métrique, les équations d'Einstein se simplifient et la dynamique de l'univers est alors donnée seulement à travers uniquement la fonction $a(t)$.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8 \pi G}{3 c^4} \sum_i \rho_i$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = - \frac{4 \pi G}{3} \sum_i \left(\rho_i + \frac{3 P_i}{c^2} \right)$$

La première équation ou équation de Friedman fixe l'évolution du facteur d'échelle suivant la nature de la matière et de l'énergie présente dans l'univers. Une équation d'état reliant la pression à la densité d'énergie qui spécifie la nature de cette matière/énergie est alors nécessaire pour déduire l'évolution du facteur d'échelle. La seconde équation, dite équation d'accélération sera pour notre propos essentielle. C'est elle qui est directement interrogé par les mesures observationnelles de grandes distances, c'est elle qui est éventuellement contestée si l'expansion de l'univers devait être accélérée. En effet, cette seconde équation d'Einstein nous dit que tant que l'univers ne contient qu'une matière

ou une énergie où $\rho+3P/c^2$ est positif, comme le confirme toutes les formes de matière et d'énergie observées en laboratoire (certaines expériences concernant l'effet Casimir par exemple permettent d'envisager des pressions négatives et peuvent faire cependant exception), la dérivée seconde du facteur d'échelle ne peut être que négative, l'expansion de l'univers ne peut donc être que décélérée. Une deuxième remarque importante concerne l'existence d'une singularité pour un univers homogène et isotrope (puisque'il satisfait le principe cosmologique). En effet, par définition le facteur d'échelle associé à une distance, est défini positif ($a(t)>0$), nous observons un mouvement de récession, de fuite des galaxies (la confirmation observationnelle de l'expansion de l'univers) donc la dérivée première du facteur d'échelle est positive, enfin comme nous venons de le dire tant que $\rho+3P/c^2$ est positif, la dérivée seconde du facteur d'échelle est donc négative. Le facteur d'échelle est donc une fonction définie positive, dont la dérivée première est positive et dont la dérivée seconde est négative, il s'annule donc obligatoirement à un temps qui sera posé comme l'origine des temps, et fixant ce que l'on peut appeler le big-bang. L'existence d'une telle singularité peut être également démontrée dans le cas d'univers inhomogène et anisotrope, c'est le fameux théorème dû à S. Hawking, R. Penrose, S. Glashow [Hawking et Ellis 1975].

Le cadre nécessaire à la description de l'évolution de l'Univers homogène et isotrope c'est-à-dire envisagé comme un tout ou assimilable à un point est donc complètement déterminé; il est donné par l'évolution du facteur d'échelle $a(t)$, lui-même fixé par le contenu et la nature du contenu énergétique de l'Univers. Mais nous le savons notre Univers est structuré, il s'est formé tout au long de son histoire, des galaxies, qui peuvent être isolées, regroupées en paires, en groupes, en amas de galaxies (objets les plus massifs observés dans l'Univers regroupant jusqu'à plusieurs centaines de galaxies). Toutes ces galaxies dessinent des structures filamenteires, elles sont réparties le long de feuilles délimitant de grands vides... L'origine de cette distribution hiérarchique ou morphologique selon le point de vue que l'on adopte, ne peut s'envisager dans une description limitée au principe cosmologique, qui réduit la dynamique de l'Univers aux équations de Friedmann. Comment aller plus loin?

III. L'Univers est structuré

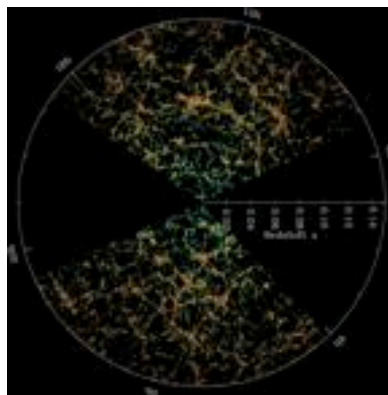


Figure 1. Le fluide de matière emplissant tout l'Univers apparaît aujourd'hui sous forme de galaxies réparties de façon très inhomogène comme nous l'observons sur les grands relevés de galaxies qui contiennent jusqu'à plusieurs millions d'objets (voir la représentation du SLOAN Digital Sky Survey (www.sdss.org)) ci-contre)

L'équation régissant la dynamique d'une distribution de matière inhomogène non relativiste, est obtenue en réécrivant la composante 00 en champ faible des équations d'Einstein, nous supposons pour l'instant la pression comme négligeable ($P \ll \rho c^2$) et la constante cosmologique nulle ($\Lambda = 0$), nous obtenons alors l'équation de Poisson :

$$\Delta_r^2 \Phi = 4 \pi G \rho$$

Comme le fluide de matière évolue dans un univers en expansion, il est nécessaire de réécrire cette équation en coordonnées comobiles ce qui permet également de séparer au premier ordre les effets d'expansion cosmique, des effets d'effondrement gravitationnel :

$$\vec{r} = a(t) \vec{x}$$

on obtient alors

$$\Delta_x^2 \Phi = 4 \pi G a^2 \bar{\rho}(t) \delta(\vec{x}, t)$$

où $\rho(t)$ est la moyenne sur l'espace de la densité, qui n'est plus fonction que du temps, et δ est le contraste de densité,

$$\delta(\vec{x}, t) = \frac{\rho(\vec{x}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$$

Ce contraste de densité qui mesure les écarts à l'homogénéité est maintenant la source du potentiel gravitationnel. Un univers homogène resterait donc homogène, seuls les écarts à l'inhomogénéité peuvent faire évoluer le potentiel gravitationnel. La densité de matière est reliée à la fonction de distribution à 1-point du fluide matériel $f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t)$ qui satisfait l'équation de Vlasov :

$$\rho(\vec{x}, t) = \int f(\vec{x}, \vec{p}, t) d\vec{p}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{a^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \vec{\nabla} \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = 0$$

III.1. Les fluctuations du fond de rayonnement cosmologique

Les structures cosmiques résultent donc de la croissance de fluctuations primordiales de matière. Ces fluctuations ont laissé une empreinte sur le ciel : le fond de rayonnement cosmologique dont l'amplitude et la forme sont de mieux en mieux connues. Ce fond de rayonnement cosmologique a été pour la première fois observé en 1964 par Penzias et Wilson (Prix Nobel de Physique 1978). Les fluctuations sur les différentes échelles angulaires de ce fond de rayonnement ont ensuite été mesurées successivement par les satellites COBE (lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/) (Prix Nobel de Physique 2006 J.C. Mather et G.F. Smoot), WMAP (map.gsfc.nasa.gov/) et plus récemment Planck (www.esa.int/planck) et ce avec une précision de plus en plus impressionnante comme il est illustré sur la figure 2.

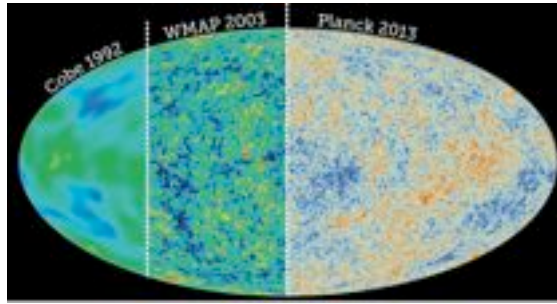


Figure 2. Carte des fluctuations respectivement observées par les satellites COBE, WMAP et Planck. On observe clairement le gain en résolution.

La distribution spatiale des fluctuations (figure 3b) est déduite de la distribution angulaire (figure 3a) directement mesurée par les satellites. La génération de ces fluctuations initiales résultent de la croissance des fluctuations primordiales quantiques [Linde 1990/2005], le spectre de puissance $P(k)$, suffit à caractériser initialement ce processus gaussien. $P(k)$ est la transformée de Fourier inverse de la fonction de corrélation à 2-points $\xi(r)$ du contraste de densité.

$$\xi(r) = \delta(r_1) \delta(r_1 + r) = \int d^3k |\delta_k|^2 e^{i\vec{k}\vec{r}} = 4\pi \int_0^\infty k^2 dk P(k) \frac{\sin kr}{kr}$$

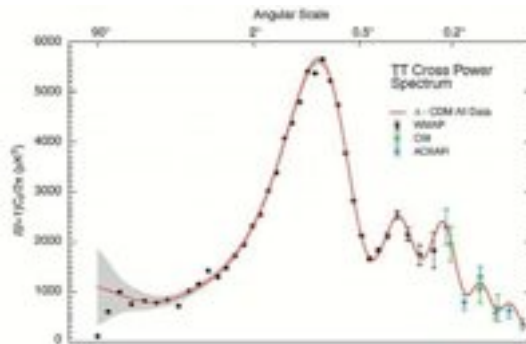


Figure 3a. Spectre angulaire des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique observées par le satellite WMAP. Les différentes échelles présentes dans ce spectre sous forme de pics nous renseignent sur le contenu et la géométrie de l'univers (voir plus bas).

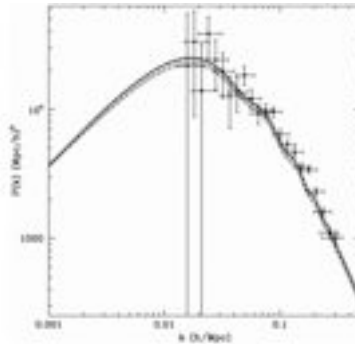


Figure 3b. Le spectre de puissance tridimensionnel déduit du spectre angulaire précédent à droite est comparé à quelques points observationnels issus de la distribution des structures cosmiques sur l'échelle des amas de galaxies et des galaxies.

III.2. La matière noire et le schéma de formation des structures cosmiques

Mais l'amplitude observée des fluctuations primordiales est très faible (10^{-5}) ! Comment former à partir de telles fluctuations des «galaxies» dans l'âge de l'Univers ? En effet ces fluctuations sont mesurées sur le fond de rayonnement cosmologique à une époque reculée de l'histoire de l'univers, au «redshift» 1000, à partir d'une telle amplitude elles croissent selon l'évolution linéaire comme le «redshift», elles ne peuvent donc gagner depuis cette époque, qu'un facteur 1000, et ne peuvent donc jamais dépasser l'unité et former non linéairement les structures que l'on observe aujourd'hui. Pour combler un tel retard de croissance, il nous faut donc supposer l'existence d'une composante de matière supplémentaire. Composante qui n'interagit ni avec les baryons ni avec les photons, et voit ces fluctuations continuer à croître alors que les fluctuations de matière ordinaire et de radiation restent gelées tant que ces deux composantes ne se sont pas découplées au cours de l'évolution de l'univers. L'analyse détaillée du spectre des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique observé permet de déduire la quantité précise de matière noire supplémentaire nécessaire (voir plus bas). Il est important de remarquer que seule la cosmologie suffit donc à justifier l'existence d'une composante de matière sombre, bien qu'il existe de nombreuses autres motivations astrophysiques à la présence d'une telle composante, que ce soit à l'échelle galactique avec les courbes de rotations plates ou à l'échelle des amas de galaxies pour expliquer leur stabilité et leur état dynamique [Peebles 1980].

Le schéma de formation des structures cosmiques se précise donc. Ces structures résultent de la croissance des fluctuations primordiales de matière noire et le schéma général de formation des structures cosmiques s'énonce alors de la façon suivante :

- L'Univers est spatialement homogène et isotrope, il est décrit par la Relativité Générale, sa dynamique est donnée par le facteur d'échelle $a(t)$ à travers l'équation de FLRW.
- Les fluctuations primordiales d'origine quantique sont gonflées sur les échelles cosmologiques par l'inflation [Linde 1990/2005].
- La forme et l'amplitude de ces fluctuations sont observées sur le fond de rayonnement cosmologique.
- Elles croissent par instabilité gravitationnelle dans un Univers en expansion et conduisent à la formation des structures cosmiques que nous observons aujourd'hui.

Les galaxies et les étoiles au sein de celles-ci se forment au sein des halos de matière noire lors de l'effondrement du gaz baryonique.

L'équation d'évolution linéaire du contraste de densité, qui fait explicitement apparaître le facteur d'échelle et sa dérivée première montre que la structuration est (au moins linéairement) une mesure indirecte du contenu et de la nature du contenu énergétique de l'Univers, donc de la quantité et de la nature de l'énergie noire.

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G \bar{\rho} \delta$$

Avant de contraindre la nature de l'énergie noire en étudiant justement son empreinte sur la formation des structures cosmiques, il nous faut remarquer que le contenu énergétique de l'Univers a récemment beaucoup évolué.

IV. L'accélération cosmique récente de notre Univers. l'énergie noire

Dès l'origine de l'élaboration de la Relativité Générale, la constante cosmologique a joué un rôle singulier. «Ironiquement» je pense, qualifiée par Albert Einstein comme «la plus grande erreur de sa vie», elle le préoccupait et la correspondance⁷ qu'il a entretenu avec W. de Sitter montrent s'il en était besoin l'acuité intellectuelle exceptionnelle du fondateur de la Relativité Générale sur cette question.

Albert Einstein en réponse à une lettre de Willem de Sitter, envisage dès 1917 les moyens de mesurer cette constante cosmologique. Cette intuition formidable a du «à distance» d'une certaine façon inspirer les travaux des astronomes d'aujourd'hui. Nous reproduisons ici une traduction «personnelle» de cette correspondance.

«On ne peut pas nier que l'introduction d'une constante [...] nuit à la simplicité et à l'élégance de la théorie originale [...] dont l'un des plus grands charmes, est sa capacité à décrire tellement de choses sans l'introduction d'une nouvelle constante empirique [...]»
(Lettre de W. de Sitter à Einstein, 1917)

«Il est vrai que la théorie de la relativité générale permet l'ajout de la [constante cosmologique] dans les équations de champ [...]. Un jour, notre connaissance réelle de la composition du ciel et du mouvement apparent des étoiles fixes, de la position des raies spectrales en fonction de la distance, sera probablement suffisante pour que nous soyons en mesure de décider empiriquement si cette constante doit disparaître [...]»
(Lettre à De Sitter 14 Avril 1917)

«Le point essentiel dans notre «différence de croyance», c'est que vous avez une croyance spécifique et que je suis un sceptique. Les observations ne seront jamais en mesure de prouver la disparition de cette constante mais seulement si elle est inférieure à une valeur donnée. Aujourd'hui, je dirais qu'elle est certainement inférieure à 10^{45} cm^{-2} et probablement inférieure à 10^{50} cm^{-2} . Peut-être qu'un jour, les observations fourniront une valeur spécifique, mais aujourd'hui je n'ai aucune connaissance de quoi que ce soit allant dans ce sens».

(Lettre de W. de Sitter à Einstein, 18 Avril 1917).

⁷ Je tenais à remercier mon collaborateur P.-S. Corasaniti pour m'avoir signaler cette référence. Pier-Stefano dit lui même qu'il la tient de notre collègue Robert Caldwell.

Les travaux récents de S. Permuter, A. Ries et B. Schmidt et de leurs collaborateurs ont finalement (une nouvelle fois) donné raison à A. Einstein en «démontrant» que cette constante ou ce qui joue un rôle semblable dans la dynamique de l'Univers est effectivement non nulle.

On peut ajouter à cette petite digression historique, que les travaux sur la conservation des écrits d'Albert Einstein⁸ de l'Université Hébraïque de Jérusalem et de l'Institute of Technology de Pasadena ont montré que dès ses premières conférences aux Etats-Unis, à l'université de Princeton en 1920, Albert Einstein propose à nouveau avec une perspicacité exceptionnelle, l'hypothèse d'un lien entre la constante cosmologique, ou au delà une composante cosmologique dynamique, et la physique microscopique (à l'époque le lien est plutôt fait avec la théorie de l'électron de Lorentz). Un lien qui rappelle aujourd'hui, de façon remarquable, l'hypothèse envisagée de la Quintessence (voir plus bas) pour interpréter l'énergie noire.

IV.1. L'Énergie Noire : Évidences Observationnelles

Deux équipes scientifiques autour respectivement du Professeur Saul Perlmutter (Supernova Cosmology Project), [Perlmutter et al. 1999] d'une part et des Professeurs Adam Riess et Brian Schmidt (High-z Supernova Search Team) [Riess et al. 1998] d'autre part ont en 1998 indépendamment l'une de l'autre, déduit à partir de collections de supernovae qui à l'époque étaient les plus grandes disponibles, de nouveaux diagrammes de Hubble. Ces diagrammes consistent à mesurer la magnitude apparente en fonction du «redshift» d'une source lumineuse. A condition de supposer que ces sources lumineuses sont bien des chandelles standards (hypothèse tout à fait raisonnable mais qui doit continuer à être testée dans le cas des supernovae) dont la luminosité intrinsèque est inchangée quels que soient l'époque et l'environnement où elles se trouvent, on en déduit leur distance et comme toute mesure de distance dans l'univers nous renseigne sur la dynamique de celui-ci, c'est un bon moyen de l'évaluer.

La distance d'une source lumineuse en terme de son «redshift» (tant que celui-ci reste faible par exemple) s'exprime en effet de la façon suivante,

$$D(z) = a(z) \int_0^z \frac{cdz}{a_0 H(z)} \approx \frac{c}{H_0} \left[z - \frac{1}{2} (q_0 - 1) z^2 + \dots \right]$$

Il apparaît explicitement dans cette expression, la valeur du paramètre de décélération aujourd'hui q_0 , lui-même fonction de la dérivée seconde du facteur d'échelle.

Les mesures de distances déduites de l'analyse des courbes de luminosité des supernovae lointaines ont convaincu la communauté scientifique que l'expansion cosmique récente était accélérée. Un tel résultat s'est révélé tout à fait cohérent avec les mesures du contenu énergétique de l'univers déduites spécialement de l'analyse des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique.

8- <http://www.alberteinstein.info/>

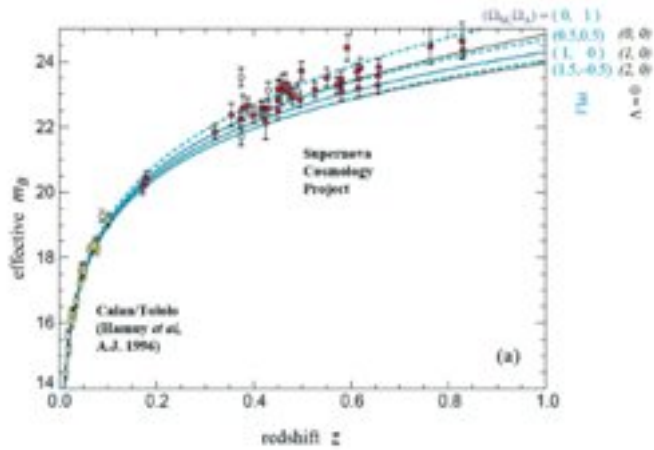


Figure 4a. Diagramme de Hubble déduit des 42 supernovae à hauts redshifts du Supernova Cosmology Project du Pr S. Perlmutter (1998) et 18 supernovae à bas redshifts issues du Calan/Tololo Supernova Survey. Les courbes pleines représentent différents modèles cosmologiques sans constante cosmologique et avec un paramètre de densité de matière respectivement égal à 0, 1, ou 2. Les courbes pointillées montrent différents modèles d'univers plats où $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$. Figure issue de S. Perlmutter et al., "Measurement of Ω_M and Λ from 42 high-redshift supernovae", *Astrophys. J.*, 517, 565-586, (1999).

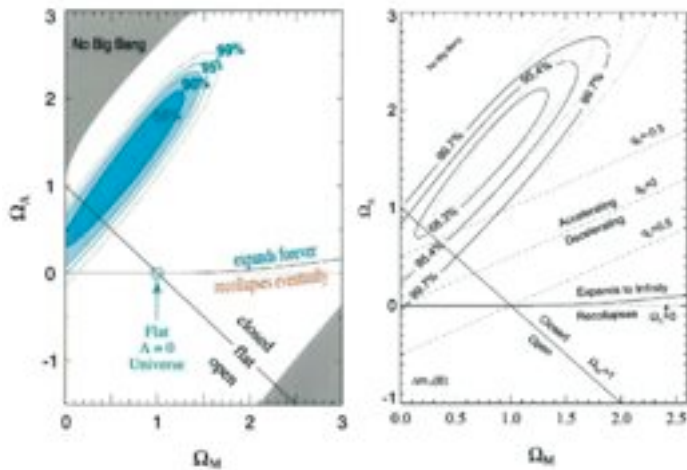


Figure 4b. L'espace des paramètres Ω_M et Λ résultant de l'analyse des données du projet SCP (à gauche) et du projet HST (à droite) respectivement issus de S. Perlmutter et al., "Measurement of Ω_M and Λ from 42 high-redshift supernovae", *Astrophys. J.*, 517, 565-586, (1999) et A.G. Riess et al., "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant", *Astron. J.*, 116, 1009-1038, (1998).

La dépendance du spectre angulaire des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique en fonction des paramètres cosmologiques est illustrée sur la figure 5, issue de [Wu & Dodelson 2002].

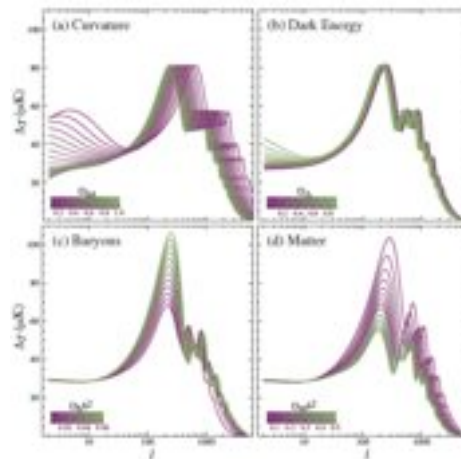


Figure 5. Dépendance des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique en fonction de la courbure, de la quantité d'énergie noire, de baryon et de matière noire dans l'Univers. Sur les grandes échelles, les petits «l» on observe une forte dépendance en fonction de la courbure, l'observation d'un plateau sur ces échelles angulaire est cohérente avec un univers plat. La quantité d'énergie noire influe peu la mesure des fluctuations, cela est normal puisque l'énergie noire influe principalement la dynamique de l'univers sur l'époque récente, alors que la mesure des fluctuations du fond cosmologique est une «image» de l'univers primordial. La quantité de baryon modifie les rapports d'amplitude entre les différents pics de fluctuations, la quantité de matière noire, enfin modifie principalement la hauteur du premier pic.

La comparaison des prédictions théoriques d'un modèle cosmologique donné avec les mesures observationnelles (voir figure 3a, où est comparé le modèle Λ CDM avec constante cosmologique aux mesures du satellite WMAP) permet alors de déduire le contenu énergétique de l'univers. Celui-ci apparaît plat, son contenu matériel se répartit en 25% de matière noire, 5% de baryons et environ 70% de son énergie est manquante. Cette proportion d'énergie manquante est justement la quantité de composante accélératrice nécessaire pour interpréter les diagrammes de Hubble déduit de l'observation des supernovae (figures 4). Nous disposons d'autres sondes cosmologiques comme l'analyse du spectre de puissance de la distribution des galaxies aux grandes échelles, la mesure du cisaillement gravitationnel, la mesure des oscillations baryoniques acoustiques (nous reviendrons sur cette observable par la suite), la fonction de masse des amas de galaxies... [Astier & Pain 2012]. C'est le croisement de toutes ces mesures indépendantes (qu'elles soient des mesures de distances ou des mesures de quantités d'énergie) qui conduit au modèle cosmologique dit de concordance, on parle alors de «complémentarité cosmique» où notre Univers apparaît essentiellement invisible, puisque plus de 95% de son contenu énergétique est sous forme de composante sombre que ce soit la matière noire où l'énergie noire, quelle que soit leur nature respective. La «complémentarité cosmique» est illustrée dans la figure 6a pour le modèle de concordance où l'estimation des paramètres de densité cosmologique pour la matière et pour la constante cosmologique résulte du croisement des analyses sur le fond de rayonnement cosmologique, l'analyse des supernovae et le nombre d'amas de galaxies. Il est important de noter que l'estimation des paramètres cosmologiques est dépendante du modèle fiduciel considéré lors de l'analyse «Monte Carlo» des données observationnelles. Un modèle qui envisage, par exemple, non pas une constante cosmologique, mais un processus dynamique pour l'énergie noire, comme dans le cas de la quintessence (voir plus bas) conduit à des valeurs légèrement différentes des différents paramètres cosmologiques.

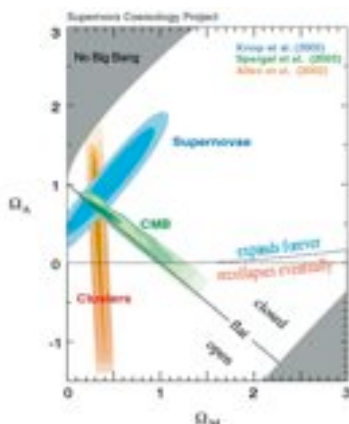


Figure 6a. Illustration de la «complémentarité cosmique». Les analyses Monte-Carlo avec comme modèle «fiduciel» le modèle de concordance avec constante cosmologique conduit lorsque l'on croise les résultats obtenus sur le fond de rayonnement cosmologique, les supernovae et le nombre d'amas de galaxies à estimer avec précision les paramètres de densité d'énergie dans l'Univers dû à la constante cosmologique et à la matière (quelque soit sa nature). Les valeurs obtenues pour ces paramètres cosmologiques sont en accord avec les mesures obtenues avec toutes autres sondes cosmologiques. De fait la cosmologie est entrée dans une ère de haute précision.

Tant que l'on se place dans l'hypothèse d'un univers plat, hypothèse à la fois motivé d'un point de vue théorique puisque notre description des phases très primordiales de l'univers dans le cadre des modèles d'inflation cosmique [Linde 1990/2005] conduit (le plus souvent) à cette propriété de l'Univers, et d'un point de vue observationnel (cette propriété semble en bon accord avec les données observationnelles aux très grandes échelles, le plus souvent issues de l'observation du fond de rayonnement cosmologique [Planck Collaboration 2013], notre Univers est essentiellement invisible. Les deux grandes questions qui émergent alors et ces questions sont parmi les questions les plus fondamentales de la cosmologie moderne sont : quelle est la nature de la matière noire? Et surtout, quelle est la nature de l'énergie noire ou tout au moins de la composante à l'origine de l'accélération récente de notre univers. C'est l'objet de la section suivante.

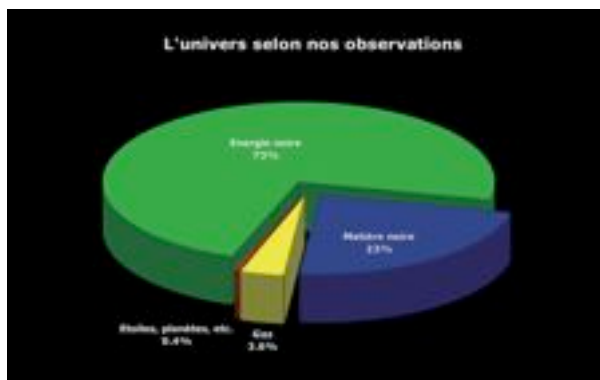


Figure 6b. Le contenu énergétique de l'Univers associé au modèle de concordance avec constante cosmologique. L'univers est alors invisible avec plus de 95% de son énergie sous forme de deux composantes sombres, la matière noire et l'énergie noire. Moins de 5% du contenu énergétique de l'Univers, sont sous forme de matière baryonique, dont un faible pourcentage est visible directement par nos télescopes actuels.

IV.2. Nature de l'énergie noire : interprétations théoriques

L'interprétation théorique de l'accélération cosmique interroge les principes fondamentaux de la cosmologie moderne. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le paradigme cosmologique est construit sur : (i) le principe d'équivalence et sa représentation mathématique le principe de covariance généralisé, (ii) le principe cosmologique et (iii) notre connaissance de la physique des hautes énergies nous permettant de décrire l'infiniment petit. Ces trois piliers théoriques déterminent trois axes d'interprétation de l'accélération cosmique récente.

La première option consiste à envisager une composante énergétique supplémentaire à la matière lumineuse et à la matière noire, dont la nature fondamentale est à trouver dans une compréhension étendue du modèle standard de la physique des hautes énergies. Ce substrat supplémentaire doit imprimer à l'échelle de l'univers une pression suffisamment négative pour permettre à la seconde dérivée du facteur d'échelle d'être positive.

C'est alors le terme de droite des équations d'Einstein qui est modifié, et pour un univers homogène et isotrope satisfaisant le principe cosmologique, cela permet à la seconde dérivée du facteur d'échelle d'être bien positive si le fluide emplissant tout l'univers est à pression suffisamment négative.

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} \left[T_{\mu\nu}^{SM} + T_{\mu\nu}^{DM} + T_{\mu\nu}^{DE} \right]$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \rho + \frac{3P}{c^2}$$

$$\ddot{a} > 0 \text{ si } w = \frac{P}{\rho c^2} < -\frac{1}{3}$$

Une deuxième option consiste à envisager une modification du terme de gauche des équations d'Einstein. La description géométrique de l'espace-temps résultant de la relativité générale est fondée sur le principe d'équivalence et sa transcription mathématique, le principe de covariance généralisé, doit être alors étendue.

$$\tilde{G}_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}^{Matter}$$

L'interprétation de l'accélération cosmique récente n'est plus alors envisagée comme un substrat supplémentaire mais comme une modification des lois décrivant l'infiniment grand. Cependant même dans cette option, il est toujours formellement possible de réécrire les extensions à la relativité générale envisagée sous forme d'un modèle effectif de type Friedmann, auquel on associerait une pression et une densité reliées par une équation d'état tel que la dérivée du facteur d'échelle soit bien positive.

$$w = \frac{\tilde{P}}{\tilde{\rho} c^2} < -\frac{1}{3}$$

Ainsi on peut d'un point de vue au moins phénoménologique, distinguer trois grandes classes de modèles qui supposent tous l'application du principe cosmologique mais qui

conduise de façon «réelle» ou «effective» à un paramètre d'équation d'état pour le fluide d'énergie noire «réel» ou «effectif» respectivement compris entre .

$-1 < w \leq -1/3$ (Cas d'une modification de la physique de l'infiniment petit ou de l'infiniment grand)

$w = -1$ (Cas de la constante cosmologique)

$w < -1$ (Seulement accessible par une modification des lois de la gravité aux grandes échelles).

Une dernière option consiste à relaxer le principe cosmologique. Il s'agit alors d'envisager que les inhomogénéités de matière sont suffisantes, pour imprimer sur la métrique des corrections qui l'éloignent alors de celle de FLRW. Deux cas se présentent alors. Soit, on envisage une solution inhomogène aux équations d'Einstein, du type Tolman-Lemaitre qui consiste à lever l'hypothèse de symétrie maximale des solutions FLRW mais qui conserve tout de même une propriété de symétrie à grande échelle. Nous serions dans ce cas au centre d'un grand vide dont la dynamique propre «mimerait» un effet d'accélération semblable à celui qui est observé si on suppose un Univers satisfaisant le principe cosmologique. Soit notre Univers est supposé homogène aux très grandes échelles, mais inhomogène aux petites échelles. L'effet de moyenne spatiale des inhomogénéités aux petites échelles suffit alors à identifier le domaine local spatial sur lequel au-delà l'univers serait homogène avec un univers homogène auquel s'ajouterait les effets combinés de 3-courbure de ce domaine spatiale plongé dans l'espace quadridimensionnelle décrit par la métrique générale et les effets de «backreaction» des inhomogénéités locales de matière et de métrique, sur la métrique globale [Buchert 2008]. Il est intéressant de noter qu'il a été montré qu'un tel univers inhomogène dont les fluctuations de densité et de métrique sont moyennées spatialement pouvait formellement se réécrire comme un univers homogène en présence d'un champ scalaire effectif, dénommé «Morphon» dont l'évolution est fixé par la dynamique moyenne des fluctuations de densité [Buchert, Larena & Alimi 2006, Larena et al 2008].

Ces trois interprétations possibles de l'origine de l'accélération cosmique récente, respectivement comme une modification du contenu énergétique de notre univers, comme une extension de la relativité générale ou comme une relaxation du principe cosmologique définissent trois axes de recherches dans lesquels de nombreux modèles cosmologiques sont en principe possibles [Copeland E. J., Sami M., Tsujikawa S., 2006]. Ces modèles cosmologiques peuvent être aussi divers que l'ajout d'une constante cosmologique, d'un champ scalaire de quintessence, que l'introduction de modifications des lois de la gravité aux grandes échelles correspondant à une relaxation du principe d'équivalence spécialement aux échelles cosmologiques, l'introduction de dimensions supplémentaires, ou encore résulter de l'effet moyenné sur un domaine spatiale limité des inhomogénéités de matière... De ce point de vue, les cosmologistes font preuve d'une imagination et d'une production considérables. Cependant il n'est pas suffisant de disposer d'un mécanisme d'accélération, ce que tous ces modèles sont capables de faire, il faut aussi que ces modèles puissent reproduire quantitativement avec précision les mesures issues spécialement de l'analyse des courbes de luminosité des supernovae et de l'analyse du fond de rayonnement cosmologique. Ainsi les modèles cosmologiques sont pleinement définis leurs éventuels paramètres libres sont fixés, on parle alors de modèles «réalistes». C'est à partir de tels modèles que nous avons réalisé l'étude de la structuration de l'Univers à l'aide de simulation numériques hautes performances.

IV.3. Nature de l'énergie noire et structuration de l'Univers

Les motivations théoriques et observationnelles sur la nature de l'énergie noire se rejoignent dans la notion de modèles cosmologiques «réalistes». Il s'agit alors de contraindre les modèles théoriquement possibles où une solution accélérée pour l'expansion cosmique est possible en exigeant que ces modèles reproduisent quantitativement à la fois les observations de la dynamique globale de l'univers, déduites de l'observation des courbes de luminosité des supernovae et la dynamique perturbée de notre univers déduite de la mesure des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique. Ces contraintes sont obtenues par une analyse Monte-Carlo appliquée à chaque modèle en tenant compte des données observationnelles connus sur les Supernovae et le fond de rayonnement cosmologique. Nous avons réalisé de telles analyses, et définit ainsi trois modèles «réalistes» correspondant respectivement au modèle dit de concordance où l'énergie noire se réduit à la présence d'une constante cosmologique (identifiable à un fluide d'équation d'état $w = -1$), un modèle de quintessence où l'accélération cosmique est due à la présence d'un champ scalaire. Pour ce modèle, la dynamique de l'univers déduite des équations d'Einstein et spécialement l'équation d'accélération se réécrit alors de la façon suivante.

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_m + \rho_Q + 3\frac{P_Q}{c^2})$$

les contributions énergétiques apparaissant dans le terme de droite de cette équation résultent du fluide de matière à pression nulle et du champ scalaire Q . Il suffit alors que

$$\frac{P_Q}{c^2} < -\frac{\rho_Q + \rho_m}{3}$$

et la dérivée seconde du facteur d'échelle devient positive. Cette condition fait explicitement intervenir le champ scalaire Q :

$$\begin{aligned}\rho_Q &= \frac{\dot{Q}^2}{2} + V(Q) \\ \frac{P_Q}{c^2} &= \frac{\dot{Q}^2}{2} - V(Q)\end{aligned}$$

qui satisfait l'équation d'évolution dite de Klein Gordon.

$$\ddot{Q} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{Q} + \frac{dV(Q)}{dQ} = 0$$

L'équation d'état associé à la présence de ce champ scalaire est

$$w_Q = \frac{P_Q}{c^2 \rho_Q} = \frac{\frac{\dot{Q}^2}{2} - V(Q)}{\frac{\dot{Q}^2}{2} + V(Q)}$$

Dans le cas d'un potentiel de self-interaction dit de Ratra-Peebles en loi de puissance négative en fonction du champ scalaire Q , il existe des solutions de «tracking» très faiblement dépendantes des conditions initiales [Ratra & Peebles 1998, Wetterich 1988],

$$V_{RP}(Q) = \frac{\lambda^{4+\alpha}}{m_{Planck}^{\alpha} Q^{\alpha}}$$

et la dynamique est proche de celle d'un fluide d'équation d'état $w_0 = -0.8$. Enfin nous avons également considéré un modèle fluide dit «fantôme» où le paramètre d'équation d'état est $w = -1.2$. Ce type de modèle peut résulter de la présence d'un terme cinétique anormale (de signe opposé) dans l'action associée au modèle, il peut également représenter une formulation effective de modification de la gravité au delà de la Relativité Générale.

Les trois modèles cosmologiques dont nous avons réalisé la simulation de la structuration de l'univers dans tout le volume de l'Univers observable du Big-Bang jusqu'à aujourd'hui sont résumés dans la Table ci-dessous.

Parameters	Λ CDM	RPCDM	SUCDM	W'CDM
H_0 (km/s/Mpc)	72	72	72	72
Ω_{dm}	0.26	0.23	0.25	0.275
$\Omega_b h^2$	0.02273	0.02273	0.2273	0.2258
$\sigma_8 h$	0.8	0.66	0.73	0.852
α	0	0.5	1	/
λ (eV)	2.4×10^{-3}	4.9	2.1×10^1	/
A_s	2.1×10^{-9}	2.0×10^{-9}	2.1×10^{-9}	/
n_s	0.951 (0.963)	0.951 (0.963)	0.951	0.963
w_0	-1	-0.87	-0.94	-1.2
w_1	0	0.08	0.19	0

Table 1. Les paramètres listés dans cette table résultent de l'analyse Monte-Carlo vis à vis des donnée Union de Supernovae et des données issues du WMAP (7^{ème} année) pour chacun des modèles Λ CDM, RPCDM et W'CDM (le modèle SUCDM est une option supplémentaire du modèle de quintessence tenant compte des effets de Supergravité, il a été également étudié, mais nous nous concentrons dans cette conférence sur les trois autres modèles). H_0 constante de Hubble aujourd'hui ($h=H_0/100=0.72$), CDM densité cosmologique de matière noire, Ω_b densité de matière baryonique, σ_8 amplitude des fluctuations de matière sur l'échelle de $8\ h^{-1}$ Mpc, α pente du potentiel d'auto-interaction du champ scalaire, λ échelle d'énergie du potentiel d'auto-interaction, A_s amplitude des fluctuations primordiales, n_s indice du spectre de fluctuations primordiales, w_0 paramètre d'équation d'état dans l'approximation fluide du modèle d'énergie noire à $z = 0$, w_1 paramètre d'équation d'état d'évolution linéaire en fonction du redshift de l'énergie noire dans l'approximation fluide du modèle.

Les trois modèles LCDM, RPCDM et W'CDM sont par construction «dégénérés» sur la dynamique globale (SN) et faiblement perturbée (CMB) de l'Univers. Mais, nous savons qu'une nature différente d'énergie noire entraine une expansion cosmique différente, et donc un taux de croissance linéaire des fluctuations de densité lors de la formation des

structures cosmiques différents (voir section III.2.). On s'attend alors à ce que le processus complet, linéaire et non-linéaire de structuration de l'Univers dans chacun de ces modèles puisse également être différent. Il s'agit alors de distinguer le processus de structuration de l'Univers propre à chaque modèle cosmologique en décelant la signature spécifique de la nature de l'énergie noire associée à chaque modèle sur celle-ci et en effet l'analyse de la structuration de l'univers comme nous le verrons dans les sections suivantes, va permettre de favoriser une classe de modèle en terme de son équation d'état.

V. Modélisation numérique de la structuration de l'Univers

V.1. Le problème à N-corps gravitationnel

La structuration aux grandes échelles de l'Univers résulte de la croissance de faibles fluctuations de densité de matière générées dans l'univers primordial globalement homogène en expansion rapide. Ces fluctuations sont amplifiées tout au long de l'histoire cosmique par la gravité, et évoluent pour donner les structures complexes que nous voyons aujourd'hui autour de nous. Le schéma général de croissance hiérarchique des structures gravitationnelles prévoit la formation d'un grand nombre de petits grumeaux qui se rejoignent progressivement pour former de grands halos et des filaments. C'est au coeur de ces halos de matière noire que se formeront les galaxies (figure 7).

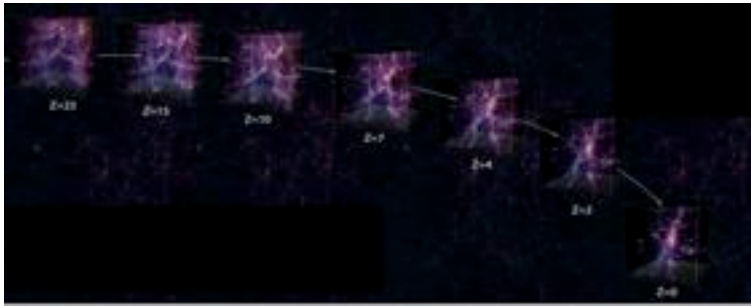


Figure 7. Evolution temporelle du champ de matière noire, Sous l'effet de sa propre gravitation, la matière noire s'effondre pour former les halos de matière noire que l'on observe clairement dans le dernier cube, au sein de ces halos, se forment les galaxies.

Alors que la croissance initiale, linéaire, des perturbations de densité, peut être calculée analytiquement, l'effondrement des fluctuations et la croissance hiérarchique des structures qui en découle est un processus hautement non-linéaire, qui ne nous est accessible qu'à travers les simulations numériques. La matière noire froide, qui constitue la composante principale de la masse, est supposée constituée de particules qui n'interagissent qu'à travers la gravitation. L'évolution de ce fluide de matière noire non-collisionnel est alors régit par les équations de Vlasov-Poisson réécrites dans un univers en expansion (voir section III). Cette équation est difficile à résoudre directement du fait de sa dimensionnalité élevée, il s'agit d'une équation aux dérivées partielles à 6+1 dimensions, et du fait du processus de mélange multiple des couches de matière («multistreaming») lors de l'effondrement des structures par instabilité de Jeans. C'est pourquoi la résolution numérique consiste à discrétiser cette équation en terme de «pseudo» particules qui vont évoluer selon les caractéristiques de l'équation Vlasov-Poisson.

$$\frac{d\vec{x}_i}{da} = \frac{\vec{p}}{a^2}, \frac{d\vec{p}_i}{da} = \frac{-\vec{\nabla}\phi}{a}$$

La précision d'une telle représentation augmente avec le nombre de particules dans la simulation. Pour être capable de suivre la dynamique de l'effondrement gravitationnel de la matière tout au long de l'histoire de l'Univers sur le plus grand des volumes possibles, le défi est donc de compter le maximum de résolution à la fois en masse et en nombre de point de calcul. Un très bon moyen est alors de raffiner la grille de calcul, là où cela paraît nécessaire. Comme nous suivons un effondrement autogravitant de matière, la densité augmente de façon considérable mais dans des zones spatiales occupant un volume total relativement réduit. Il s'agit donc de raffiner la grille de calcul partout où la densité devient élevée. Ce type de dynamique est obtenu avec l'algorithme PM-AMR, qui consiste tant que la densité reste inférieure à un seuil donné à résoudre la dynamique par la méthode «Particule-Mesh» (voir ci-dessous) et là où la densité devient supérieure à un seuil donné à raffiner la grille autant que nécessaire au cours du processus d'effondrement.

Les méthodes N-corps basées sur les grilles, telles que la méthode standard «Particle-Mesh» (PM), sont particulièrement efficaces et ont démontré leur robustesse [Hockney & Eastwood 1981, Alimi & Scholl 1993]. Dans la méthode PM, l'espace où les champs sont calculés et discrétisés sur une grille, alors que les particules évoluent, du fait de la dynamique des champs, dans un espace continu. Cette méthode est composée de sept étapes itératives :

1. Calculer la densité de masse sur la grille, en utilisant un schéma d'interpolation à partir de la position des particules. Nous avons utilisé un schéma de type Cloud-In-Cell (CIC) dans notre calcul ; la masse d'une particule est réparti au delà de la cellule contenant la particule sur les huit cellules environnantes.
2. Calculer le potentiel sur la grille en utilisant l'équation du champ. Dans le cas de la gravité, il s'agit de l'équation de Poisson, qui a été résolue par une méthode multi-grille.
3. Calculer l'accélération sur la grille. Une approximation standard, par différences finies a été utilisée.
4. Calculer l'accélération de chaque particule, en utilisant le schéma d'interpolation inverse de l'étape 1.
5. Calculer la nouvelle vitesse de chaque particule, connaissant son accélération.
6. Calculer la nouvelle position de chaque particule, connaissant sa vitesse.
7. Vérifier la conservation de l'énergie, et passer au pas de temps suivant.

Lors du calcul de la densité, l'opération de raffinement de la grille est idéale pour suivre la formation de structures anisotropes comme les filaments et il procède de la façon suivante. Chaque cellule est divisée en 8 nouvelles cellules si la densité est supérieure à un seuil fixé, ces nouvelles cellules sont de taille deux fois plus petite. Notre «solveur» gravitationnel ne permet à 2 cellules adjacentes de différer que d'un seul niveau de grille, l'arbre des cellules ainsi développé est totalement non-structuré, cet arbre contient de façon récursive, 1 «oct», c'est à dire, une petite grille de 8 cellules qui pointent vers 1 «cellule parente», 6 cellules parentes voisines, 8 «cellules filles» [Teyssier 2002]. Le pas de temps décroît d'un facteur 2 à chaque niveau de grille et l'équation de Poisson est résolue sur un domaine aux Conditions aux Limites fixées, en utilisant la méthode de relaxation de Gauss-Seidel et une correction du type «Successive Over Relaxation» [Press et al. 1992].

Afin de disposer du maximum de ressources et permettre ainsi de suivre le plus grand nombre de particules, il est nécessaire d'implémenter de tels calculs sur les

supercalculateurs massivement parallèles les plus puissants disponibles. Une telle implémentation est basée sur une décomposition du calcul c'est à dire une répartition du suivi d'un sous ensemble de particules et d'un sous ensemble de l'espace dans lequel elles évoluent sur les différents nœuds de calcul d'un supercalculateur. Cette répartition est réalisée pour notre calcul en utilisant une décomposition de domaine dynamique, basée sur la courbe de Peano-Hilbert, qui a la propriété de pouvoir paver tout l'espace. Une telle décomposition permet d'optimiser l'équilibrage de charge (chaque nœud de calcul est sollicité de façon équilibré) durant le calcul et sur la courbe de Peano-Hilbert, deux particules proche dans l'espace sont proches sur la courbe et donc facilement identifiées. Cette méthode de parallélisations a été testée, elle est opérationnelle, et très efficace pour des systèmes complexes de grandes tailles (très bonne scalabilité jusqu'à 80 000 cœurs [Alimi et al 2012]).



Figure 8. En partant de la gauche, la structure imbriquée des cellules suite au raffinement dans le solveur PM-AMR, puis l'effet du raffinement illustré sur un halo super massif, la grille apparaît de plus en plus fine là où la densité augmente, ainsi les sous-structures de cet halo sont résolues lors du calcul. Enfin la décomposition suivant une courbe de Peano-Hilbert de l'espace de calcul, chaque couleur est attribuée à un nœud de calcul spécifique, le calcul pour ces régions est divisé alors en tâches spécifiques à chaque nœud, si nécessaire les nœuds voisins communiquent entre eux.

Mais les efforts d'optimisation lorsque l'objectif est de simuler un très grand volume d'Univers vont bien au delà de la seule optimisation du solveur dynamique. En effet dans ce cas, tous les aspects nécessaires au déroulement de la simulation sont alors critiques. Ils doivent être abordés de façon cohérente au sein d'une application globale. Nous avons développé et optimisé une telle application, il s'agit de l'application AMA-DEUS (A Multiple Purpose Application for DEUS) [Alimi et al 2012].

VI.1. Un effort d'optimisation considérable qui a permis la première simulation de tout l'Univers observable

Tant que le nombre de particules et le nombre de points de calcul n'est pas gigantesque (aujourd'hui avec les moyens numériques disponibles, supérieur à dix milliards), la principale difficulté pour réaliser une simulation numérique cosmologique de structuration de l'Univers est la résolution du système Vlasov-Poisson qui gère la dynamique non collisionnelle de la matière noire dans un Univers en expansion. Mais au-delà, les aspects auparavant périphériques de la simulation deviennent de tailles comparables sinon supérieures et peuvent chacun séparément accaparer les ressources disponibles sur le supercalculateur utilisé. Lors de la réalisation des simulation DEUS FUR de structuration de tout l'Univers observable en présence d'énergie noire (voir section suivante), les efforts d'optimisation ont concerné toutes les facettes du calcul haute performance («HPC») et les difficultés rencontrées ont du être résolues en même temps [Alimi et al 2012]. La gestion des ressources nécessaires concernant à la fois le temps cpu, la mémoire, les communications, la gestion du volume gigantesque de données, le traitement des

données qui se déroule nécessairement au cours du calcul, sinon le stockage nécessiterait des espaces inaccessibles voir inexistant même dans les centres de calculs les plus performants au monde, ont conduit à envisager, la simulation comme une expérience scientifique de grande taille. A cette expérience il a été associée une application globale capable de gérer de façon optimisée le “pipe-line” de codes, et une organisation de type projet. Nous avons construit l’application, il s’agit de l’application **AMADEUS** (**A** Multiple purpose Application for **D**ark Energy Universe **S**imulation). Elle permet successivement, (i) de construire les modèles réalistes suite à une analyse Monte Carlo des données observationnelles disponibles vis à vis des prédictions théoriques spécifiques à chaque modèle, (ii) de générer le champ de particules réparti sur tout le volume de l’univers observable, (iii) de calculer l’évolution du champ de matière à l’aide du solveur dynamique PM-AMR, (iv) de «post-processer» quasi «on the fly» le volume gigantesque de données généré tout au long du calcul et (v) de gérer et stocker les données numériques. Nous ne discuterons pas dans ce document les développements logiciels spécifiques qu’il a été nécessaire d’effectuer pour permettre la réalisation de la première simulation numérique de la structuration de tout l’univers observable, nous renvoyons le lecteur pour cela spécialement à la référence [Alimi et al 2012], nous illustrerons simplement le défi réalisé à l’aide de cette application en le situant dans l’histoire récente de la cosmologie numérique.

L’augmentation rapide de la mémoire et de la puissance de calcul des ordinateurs est souvent décrite par la fameuse «Loi de Moore». Pour les simulations numériques N-corps d’intérêt cosmologique la croissance résulte à la fois des progrès algorithmiques et des développements matériels qui ont permis une augmentation en résolution spatiale et en masse de plusieurs ordres de grandeur spécialement ces vingt dernières années. La cosmologie numérique est en fait un champ d’activité en croissance exponentielle portée par les développements des supercalculateurs. Les simulations cosmologiques avec un milliard de particules évoluant sur une fraction significative du volume de notre Univers sont maintenant réalisables. Dans de telles simulations, il s’agit de suivre à la fois la formation d’un halo de matière avec une très haute résolution et de disposer d’une taille de boîte de calcul suffisamment large pour simuler la distribution spatiale de tels halos modélisant ainsi la formation des grandes structures de l’Univers. Mais l’objectif suprême qui consistait à simuler l’effondrement gravitationnel d’un nombre de particules suffisamment élevé pour évaluer à la fois la fonction de masse (c’est-à-dire le nombre de halos de masse donnée dans un élément de volume) des halos les plus massifs, la structure fine interne de ces halos et leur distribution spatiale sur les échelles où l’empreinte de l’énergie noire est dominante sur toutes les autres empreintes d’origine cosmologique était un défi de taille très supérieure. Pour atteindre un tel objectif, nous avons réalisé une simulation de la formation des structures cosmiques dans TOUT l’Univers Observable TOUT au long de son histoire avec une résolution spatiale et en masse suffisante pour décrire finement tous les halos de matière de masse supérieure au moins à 1014 masses solaires. Notre calcul a développé plus de 2500 milliards de points en suivant 550 milliards de particules, chacune de ces particules ayant alors une masse égale à celle de notre Voie Lactée. Nous illustrons sur la figure 8 ci-dessous comment une telle simulation se situe vis-à-vis des autres calculs réalisés jusqu’à présent. Une sélection de simulations cosmologiques est présentée, depuis la fameuse et historique simulation de Jim Peebles de l’Université de Princeton au début des années 1970 avec 300 particules jusqu’à quarante années plus tard les simulations numériques en cosmologie les plus performantes (la liste n’est pas exhaustive, elle est juste indicative pour illustrer comment les performances en terme du nombre de particules ont évolué durant cette période). Nous voyons tout d’abord qu’une loi de type Moore qui envisage une croissance d’un facteur

2 tous les 18 mois sous-estime l'accélération de l'état de l'art en cosmologie numérique. La progression moyenne est également tracée, elle est extraite de [Springel et al. 2005], et envisage un facteur de croissance de 10 toutes les 4.55 années. La progression des simulations réalisées dans le cadre du projet DEUS durant ces sept dernières années est la plus impressionnante. Elle a conduit à la simulation DEUS Full Universe Run (DEUS FUR, simulation record de tout l'univers réalisé sur le supercalculateur Curie installé au TGCC au sud de Paris) qui se situe tout en haut de ce classement.

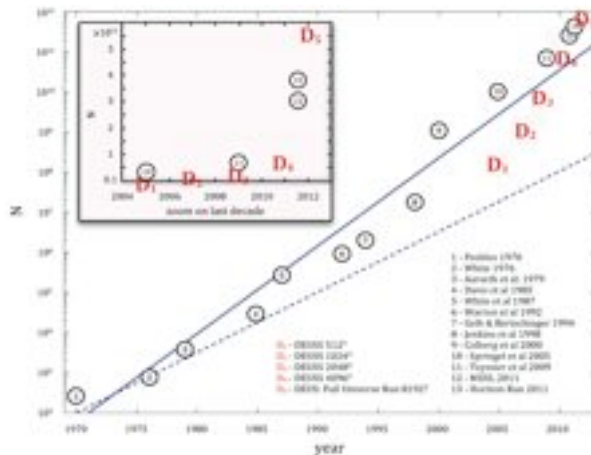


Figure 8 : Évolution du nombre de particules dans les simulations N-corps en fonction de l'année de leur réalisation. Les symboles D (en rouge) repèrent les simulations PM-AMR réalisés par notre groupe. Nous nous concentrons sur la période réduite à la dernière décennie dans le graphique en haut à gauche pour mettre en évidence la récente accélération des performances et spécialement celles réalisées par la collaboration DEUS. On peut noter en particulier la position de la simulation Millennium Run (Springel et al. 2005 #10 ; 10 milliards de particules, taille de boîte de 500 h⁻¹Mpc), et la récente simulation Millenium XXL [Angulo et al 2012]; 303 milliards de particules, taille de boîte de 3000 h⁻¹Mpc) ainsi que la simulation Horizon Run [Kim et al 2011] ; 375 milliards de particules, taille de boîte 10800 h⁻¹Mpc). La droite bleue représente l'évolution moyenne de la taille des simulations (extraite de [Springel et al. 2005]) et la droite en pointillé est une évolution de type «Loi de Moore» correspondant à une augmentation d'un facteur 2 tous les 18 mois.

Nous représentons sur la figure 9, la comparaison des tailles de boîtes de calcul des trois plus grandes simulations numériques en cosmologie. La représentation respecte les échelles spatiales. Nous voyons clairement la progression impressionnante réalisée par la simulation DEUS FUR par rapport aux simulations Millenium XXL Run [Angulo et al 2012] et Horizon Run [Kim et al 2011]. Quoique notre taille de boîte de calcul soit la plus grande, nous avons été capable de suivre la dynamique gravitationnelle grâce à un schéma de grille adaptatif avec une résolution spatiale exceptionnelle sur plus de 6 ordres de grandeur de l'échelle de la taille de notre Voie Lactée à la taille de l'Univers observable avec une «coarse» grille de 81923 cellules (21 h⁻¹ Gpc) ce qui correspond à une résolution formelle de 5242883 (40 h⁻¹ kpc).

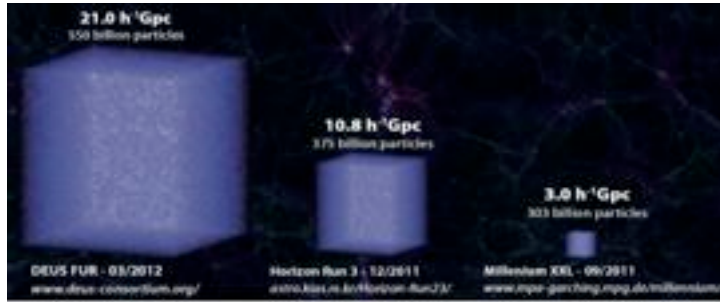


Figure 9 : Comparaison des tailles de boîtes de calcul de la simulation DEUS sur tout le volume de l'Univers observable et les deux plus performantes simulations réalisées auparavant. La simulation DEUS FUR a une résolution spatiale formelle équivalente à 524288^3 cellules.

VI. Pourquoi et Comment simuler Tout l'Univers?

De la mesure, des courbes de luminosité des supernovae dans des galaxies lointaines, des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique et du comptage des amas de galaxies (figure 6a) nous avons déduit que l'expansion cosmique récente de notre Univers était accélérée. Mais aujourd'hui, nous disposons de nombreux modèles physiques capables de reproduire de telles observables et d'interpréter cette accélération (section IV.2.), il est donc nécessaire de développer de nouvelles sondes cosmologiques capables au delà de la mise en évidence de ce phénomène cosmique, de nous donner les moyens de mesurer plus finement les propriétés physiques de l'énergie noire réelle ou effective (voir section IV.2.) et ainsi d'être capable de discriminer entre les différentes natures de cette composante.

Deux observables sont spécialement sensibles à la nature de l'énergie noire : la mesure à très haute précision des oscillations baryoniques acoustiques (figure 10) et la statistique des événements rares aux valeurs extrêmes comme l'amas de masse maximale lors de la formation des structures cosmiques.

Avant le découplage entre la matière et le rayonnement (au «redshift» $z = 1100$) les fluctuations primordiales de densité ont donné lieu à des ondes de pression dans le fluide photons-baryons. Au découplage, ces oscillations ont été gelées, laissant leur empreinte sur le CMB, et dans la distribution des baryons et de la matière noire [Peebles & Yu 1970]. Cette empreinte dans la fluctuation du fond diffus cosmologique, correspond au pic principal dans le spectre de puissance du fond de rayonnement cosmologique (figure 3a), et se retrouve sur l'échelle d'environ $150 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ dans la distribution à grande échelle des galaxies au «redshift» $z \approx 0.3$, c'est l'excès de corrélation observé sur la fonction de corrélation de la distribution des galaxies (Figure 10a) [Eisenstein et al 2005]. Le spectre de puissance de cette fonction de corrélation exhibe donc une succession de pics dont les positions respectives, les hauteurs respectives, et la décroissance suivant les échelles sont caractéristiques du contenu énergétique de l'univers, de la nature de l'énergie noire, du taux de croissance des fluctuations... Lorsque ce spectre est mesuré à partir de la distribution de matière dans tout le volume de l'univers (environ $21 \text{ h}^{-1} \text{ Gpc}$) soit 140 fois l'échelle sur laquelle est observée l'excès de corrélation, l'erreur statistique sur la mesure des oscillations baryoniques acoustiques se réduit alors à la «variance cosmique». A la condition de disposer de la résolution en masse et spatiale suffisantes pour réduire également, les effets systématiques dus à la simulation numérique, à la même précision, soit 1% [Rasera et al 2013], les «BAO» seront alors mesurés avec une précision, qui

devrait être atteinte par les grands projets observationnels cosmologiques à l'horizon 2020 (Euclid (<http://sci.esa.int/euclid/>), BigBoss (http://bigboss.lbl.gov/docs/BigBOSS_NOAO_public.pdf)...), suffisante pour discriminer entre les modèles cosmologiques réalistes que nous avons simulés (voir section VII).

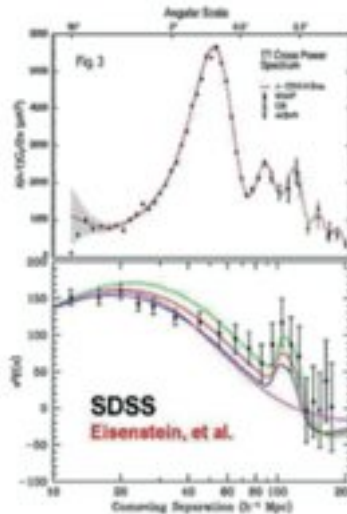


Figure 10a : Le pic principal dans les fluctuations du fond diffus cosmologique (figure du haut) entraîne un excès de corrélation dans la distribution des galaxies qui a été effectivement observé, originellement dans le catalogue SDSS [Eisenstein et al 2005] (figure du bas). Ces oscillations «BAO» dans le spectre de puissance des galaxies (transformée de Fourier de la fonction de corrélation représentée ici) peuvent être utilisées comme sondes cosmologiques et en particulier pour déterminer le paramètre d'équation d'état de l'énergie noire (voir section VII).

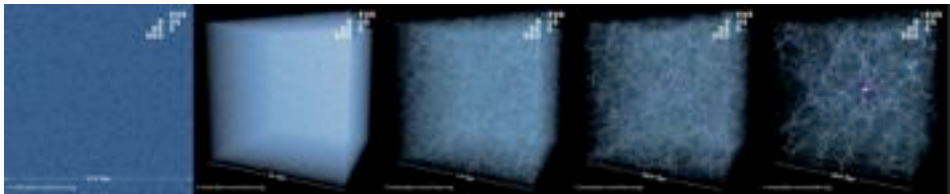
Le champ initial de matière dont va résulter après effondrement gravitationnel la distribution de matière actuelle, dans lequel on reconnaît les halos de matière noire, lieux de formation des structures cosmiques résulte d'un processus gaussien [Linde 1990/2005, Peebles 1980, Peebles 1993]. Tant que l'évolution est linéaire, la nature gaussienne de ce champ est conservée, la dynamique non linéaire à l'origine effectivement de la formation des halos de matière noire entraîne l'apparition de propriétés non gaussiennes du champ de matière. Le caractère non gaussien est spécialement marqué lorsque l'on va s'intéresser aux halos les plus massifs, c'est à dire les événements les plus rares aux valeurs extrêmes («EVS statistics»). Pourtant ces objets super massifs, et spécialement le halo le plus massif qui résulte de l'effondrement de la plus grande quantité de matière sur les échelles spatiales les plus larges, tout au long de l'histoire de notre Univers sera un marqueur particulièrement efficace de l'évolution cosmologique et donc de la nature de l'énergie noire. Mais pour s'assurer de la meilleure garantie de former un tel objet de masse extrême, cela exige à nouveau de simuler tout l'Univers observable et ainsi accéder à la statistique des halos les plus massifs formés à chaque instant dans l'histoire de l'Univers.

Les raisons de simuler tout le volume de l'Univers observable sont donc clairement établies, mais en terme de performances numériques, comment se traduit une telle simulation?

Tout d'abord que représente, l'Univers observable ? Il s'agit du volume d'univers qui inclut toutes les distances parcourues par la lumière dans l'âge de l'Univers. Dans un Univers avec constante cosmologique, en 13,7 milliards d'années (l'âge d'un tel univers) du fait de l'expansion cosmique, la lumière parcourt plus de 47 milliards d'années lumières soit en échelle comobile un volume d'univers de $(21 \text{ h}^{-1} \text{ Gpc})^3$. Pour suivre l'effondrement de la matière dans un tel volume avec la possibilité de décrire un halo de masse minimum $10^{14} \text{ h}^{-1} M_{\text{Solaire}}$ avec au moins cent particules, il nous faut résoudre la dynamique auto-gravitante de 550 Milliards (81923) de particules, de telle façon que la masse de chaque particule se réduit alors à la masse de notre galaxie (soit environ $10^{12} \text{ h}^{-1} M_{\text{Solaire}}$). Enfin pour atteindre une résolution spatiale d'environ 40 kpc (environ la taille de notre galaxie) soit un rapport (L_{box}/Dx) à la taille de la boîte ($21 \text{ h}^{-1} \text{ Gpc}$) de 525 000. C'est seulement grâce à l'algorithme PM-AMR, qu'une telle résolution a pu être atteinte, elle correspond à générer plus de 2,5 «trillions» de points de calcul (voir section VI.1.). Nous présentons dans la section suivante les premiers résultats de nos simulations et comment ceux-ci laissent penser qu'une classe d'interprétation de l'énergie noire peut être privilégiée.

VII. Représentation de Tout l'Univers Observable

Nous représentons sur les Figures 11, la distribution de matière issue de la simulation du modèle avec constante cosmologique dans l'espace comobile, espace dans lequel est effectivement réalisé le calcul lors de la simulation. Sur le plus grand volume (figure 11a), la distribution de matière est très faiblement perturbée, de façon cohérente avec l'hypothèse d'un univers homogène et isotrope originellement et dont l'évolution satisfait les équations de Friedmann. Nous observons ensuite aux échelles inférieures un réseau de filaments analogues à celui observé sur la distribution des galaxies, l'effondrement gravitationnel conduit à une distribution de matière de plus en plus structurée. A l'intersection des filaments, il apparaît des concentrations de matière, lieux de formation des amas de galaxies ou des galaxies les plus massives. Lorsque l'effondrement a été suffisant, le réseau isole de grands vides. Le nombre d'halos de matière noire qui peut être reconnu est gigantesque, il apparaît dans l'espace comobile aujourd'hui pour le modèle de concordance, plus de 144 millions d'halos de masse supérieure à cent mille milliards de masses solaires ($10^{14} \text{ h}^{-1} M_{\text{Solaire}}$), le premier objet de ce type apparaît alors que l'univers n'avait que 2 milliards d'années soit à un redshift proche de 4, et l'halo le plus massif pèse plus de 15 millions de milliards de masses solaires ($1.1 \cdot 10^{16} \text{ h}^{-1} M_{\text{Solaire}}$). Ce halo le plus massif est représenté dans son environnement dans la figure 11e.



Figures 11 : Distribution de la matière à $z=0$ dans l'espace comobile à différentes échelles pour le modèle de concordance avec constante cosmologique. Il apparaît au centre de l'image la plus à gauche l'objet le plus massif formé dans un tel modèle dans son environnement.

La simulation de tout le volume d'univers observable tout au long de l'histoire de l'Univers, nous permet également de reconstruire tout au long de la simulation, la distribution de matière dans l'espace des «redshifts» (Figure 12a) comme elle peut-être

effectivement observée dans les télescopes, c'est à dire pour un observateur. Il s'agit de la distribution de matière là où elle se trouve au moment où elle s'y trouve dans l'histoire de l'univers, c'est à dire en tenant compte du fait que la lumière nous parvient avec un décalage temporel d'autant plus grand que l'objet est plus distant (figure 12b). A partir de cette distribution, bien que le calcul de l'effondrement gravitationnel était fait dans une approximation quasi-newtonienne, qui est justifié pour suivre l'évolution du potentiel gravitationnel, car celle-ci est quasi indistinguishable de l'évolution relativiste du potentiel gravitationnel [Chisari & Zaldarriaga 2011], nous pouvons corriger les positions de chaque particule en tenant compte des corrections relativistes. Cette distribution de matière tient compte alors spécialement des effets de cisaillement faible gravitationnel, induit par la déviation des rayons lumineux par le potentiel gravitationnel local (figure 12c).

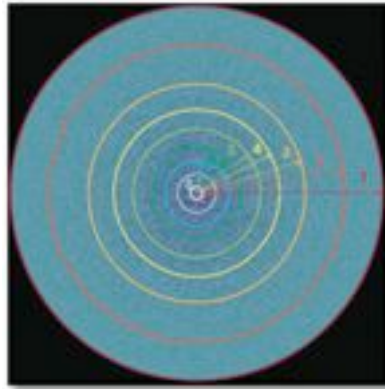


Figure 11a : Au cours de la simulation nous pouvons conserver à chaque pas de temps de calcul, les coquilles spatiales contenant la distribution de matière dans l'espace des «redshifts». A la fin de la simulation en additionnant toute ces coquilles pour lesquelles sont conservées les particules, positions et vitesses, le champ de densité et le potentiel gravitationnel sur la grille raffinée, nous disposons alors de la distribution de matière brute dans l'espace des redshifts.

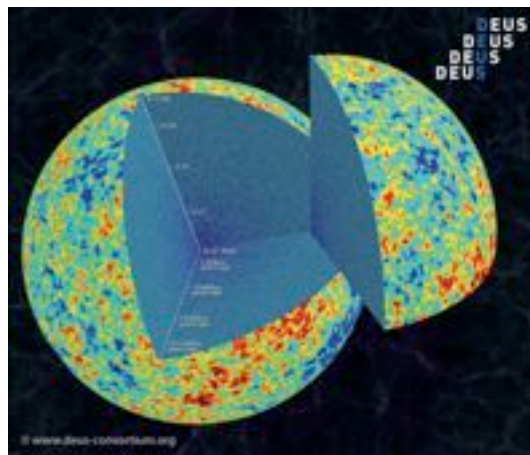


Figure 12b : Première image de la distribution tri-dimensionnelle de matière noire dans l'espace des «redshifts» résultant de l'évolution des perturbations de densité de matière observés par le satellite WMAP dans le modèle cosmologique de concordance avec constante cosmologique, LCDM.

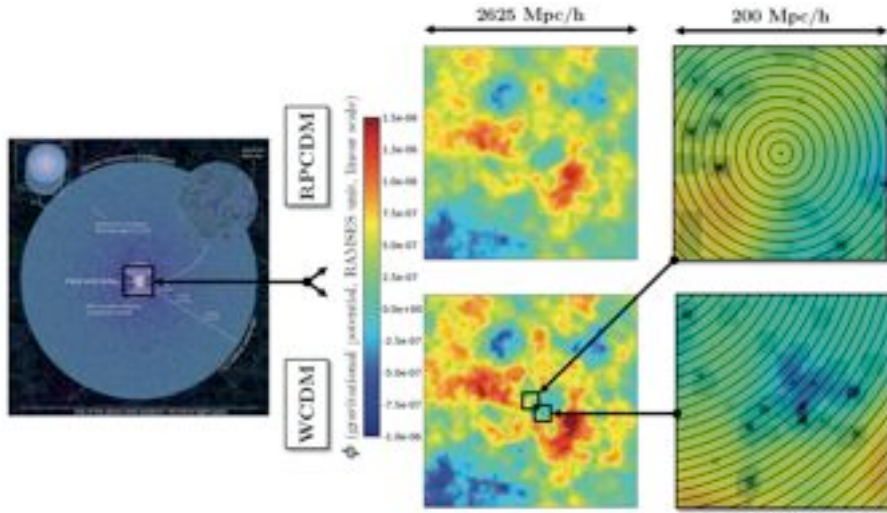


Figure 12c : Nous illustrons ici la qualité de la résolution spatiale avec laquelle peut être reconstruite la distribution de matière dans l'espace des redshift. Notamment au centre, soit proche de $z=0$, la représentation des potentiels gravitationnels montre à la fois sur les échelles de 2.625 Gpc et de 250 Mpc des différences sur les deux modèles simulés.

VIII. Pouvons nous conclure sur la nature de l'énergie noire ?

Les distributions de matière à différents temps, tout au long de l'histoire de l'univers sont obtenues pour chacun des modèles simulés, à la fois les positions des particules qui tracent cette distribution de matière, mais également les vitesses de ces particules, ainsi que l'ensemble des halos de matière noire qui peuvent être reconnus dans ces distributions, le champ de densité et le potentiel gravitationnelle. Tout cela constitue une masse d'informations considérable, plus de 1.5 Peta-octets de données qui sont l'objet d'analyses scientifiques détaillées et diverses dans le cadre de multiples collaborations au sein du consortium DEUS (www.deus-consortium.org). Dès à présent la représentation des champs de matière à l'échelle des halos de matière noire extraite du champ total de matière pour chacun des modèles simulés, comme elle apparaît sur la figure 13 montre quelques différences. Ces différences qualitatives pour l'instant, confirment les objectifs initiaux des simulations réalisées.

En effet, il est important de rappeler que les modèles simulés sont originellement totalement indistinguables, c'est uniquement le déroulement du processus de structuration résultant de l'effondrement gravitationnel, lui-même contraint par le modèle cosmologique qui a conduit à ces différences. Celles-ci sont illustrées ici, sur l'échelle environnant un halo de matière noire, soit quelques dizaines de Mpc, mais au delà des différences existent également qui peuvent être quantitativement évaluées.

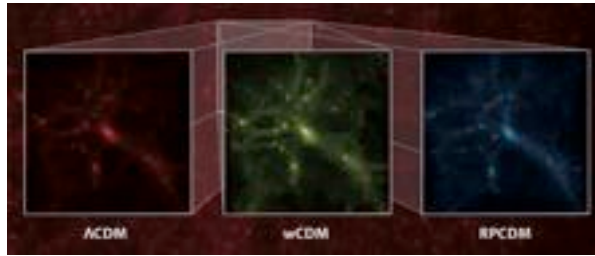
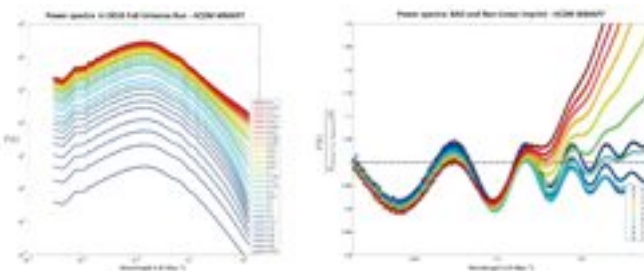


Figure 13 : Il est représenté ici le champ de matière tracé par les particules autour du même halo de masse $10^{15} h^{-1} M_{\text{Solaire}}$ apparaissant dans chacun des modèles cosmologiques simulés. L'halo lui-même est déjà différent, il apparaît plus concentré dans le modèle LCDM que dans le modèle RPCDM où le processus d'effondrement semble moins efficace. L'environnement de ce halo apparaît également différent d'un modèle à l'autre, les filaments à l'intersection desquels se forment ce halo sont significativement plus marqués dans le modèle WCDM que dans les deux autres modèles.

La distribution de matière à plus grandes échelles peut-être sondée à l'aide du spectre de puissance. A partir de cette quantité (figure 14a) nous pouvons déduire les oscillations baryoniques acoustiques (figure 14b), c'est à dire les fluctuations dans la distribution des galaxies à l'échelle de 150 Mpc, en normalisant le spectre de puissance obtenu par celui résultant de l'évolution de conditions initiales où l'influence due à la présence des baryons a été supprimée.



Figures 14 : (à gauche)(a) le spectre de Puissance à différents redshift tout au long de la simulation. On observe clairement dès $z=10$, c'est à dire dès une phase très primordiale de l'univers, la déformation aux petites échelles (grands modes k) du spectre de puissance due à la dynamique non-linéaire. Ces effets de dynamique non-linéaire conduisent à bas redshift à un excès de puissance aux petites échelles. Les oscillations dans le spectre de puissance sont également visibles. (à droite)(b) en normalisant par le spectre évolué résultant d'un spectre de puissance initiale sans baryons, les oscillations baryoniques acoustiques apparaissent clairement, la dynamique non-linéaire entraîne un excès de puissance et une déformation importantes du spectre sur les échelles à partir du 3^{ème} pics. La dynamique de nos simulations permet cependant d'obtenir jusqu'au 4^{ème} pic.

Les oscillations baryoniques acoustiques sont mesurées avec une précision de moins de 1%. Pour la première fois nous pouvons mesurer ces fluctuations jusqu'à $z=0$, elles restaient du fait des fluctuations statistiques innaccessibles à ce «redshift» dans une simulation aussi performante que la simulation Millenium [Jeong & Komatsu]. La prise en compte rigoureuse et contrôlée [Rasera et al 2013] des effets de dynamique non-linéaire sur l'effondrement gravitationnel montre que ceux-ci ne peuvent pas être reproduits exactement (spécialement si on exige une précision inférieure au pour-cent) par les approximations linéaires (bien-sûr, même sur ces échelles) et non-linéaires déduites de la théorie perturbative (figures 14).

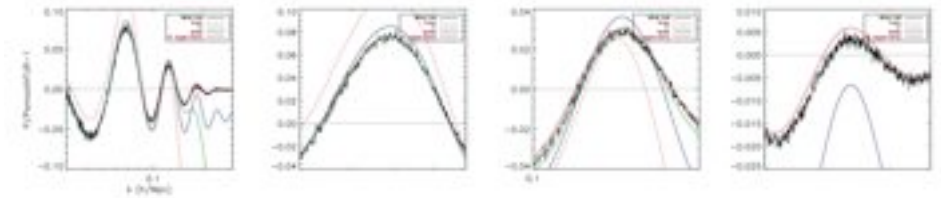


Figure 15 : Comparaison du spectre sur l'échelle des oscillations baryoniques acoustiques, les différences avec la théorie linéaire (pointillé rouge) montre des différences dans la position, la hauteur dès le premier pic, au delà du 2^{ème} pic, la théorie linéaire échoue totalement à reproduire la dynamique non linéaire des «BAO». Les écarts avec les prédictions de la théorie perturbative (trait vert) et le «bien connu» halo modèle (trait bleu) dû à Smith et ses collaborateurs sont plus faibles mais déjà significatifs sur le premier et le deuxième pic. Les figures suivantes zoom autour respectivement du premier, second et troisième pics.

Disposant maintenant d'une mesure précise des «BAO», nous pouvons comparer les résultats obtenus pour chaque modèle (figure 16). Nous observons alors effectivement des différences pour chacun de ces modèles qui pourront être mesurées, à la condition d'atteindre une précision comparable. Mais comme, il a été montré [Angulo et al. 2008] qu'une différence dans la position du premier pic des «BAO» de moins de 1% entraîne une erreur de plus de 4% sur l'estimation du paramètre d'équation d'état, les données futures devront atteindre une telle précision pour permettre de contraindre suffisamment la nature de l'énergie noire pour privilégier une des options possibles, entre une extension de notre description de l'infiniment petit (du type du modèle RPCDM simulé dans ce travail) ou plutôt une extension des lois de la gravité à grande échelle, du type du modèle WCDM simulé dans ce travail.

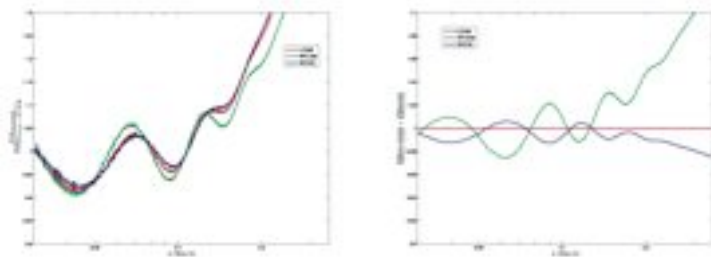


Figure 16 : (à gauche) Mise en évidence des «BAO» pour les trois modèles simulés. (à droite) Rapport des spectres de puissance sur l'échelle des «BAO» à la mesure obtenue dans le modèle de concordance avec constante cosmologique Λ CDM. Une précision de l'ordre de 1% suffit à distinguer sur un large domaine d'échelle ces trois modèles initialement et aux très grandes échelles totalement indistinguables puisque capable de reproduire précisément, la dynamique de l'univers déduite de l'observation des Supernovae, et les fluctuations du fond de rayonnement cosmologique.

Dans la distribution de matière nous reconnaissons des halos. Le calcul de la fonction de masse de ces halos (figure 17a) permet pour la première fois à nouveau, d'atteindre des structures, inaccessibles dans les simulations numériques jusqu'à aujourd'hui, de masses supérieures à $10^{16} h^{-1} M_{\text{Solaire}}$. A partir de cette fonction de masse $F(M,z)$, on peut extraire la fonction dite de multiplicité f .

$$f(\ln(\sigma^{-1})) = F(M, z) \frac{M}{\rho_m(z)} \frac{d \ln(M)}{d \ln(\sigma^{-1})}$$

$$\sigma^2(M, z) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 P(k) W^2(k, R(M)) dk$$

Une telle décomposition (séparant la dépendance cosmologique et la dépendance liée seulement au processus d'effondrement gravitationnel) induit une universalité de la fonction de multiplicité, c'est à dire une indépendance en fonction de la cosmologie et explicitement en fonction du temps [Tinker et al 2008]. Spécialement aux grandes masses (figure 17b), nous confirmons ici qu'une telle universalité ne tient pas [Courtin et al 2010], les écarts à cette universalité deviennent considérables et ils exhibent la signature de l'énergie noire.

La comparaison des mesures de cette quantité pour chaque modèle cosmologique simulé montre de grandes différences (figure 17c).

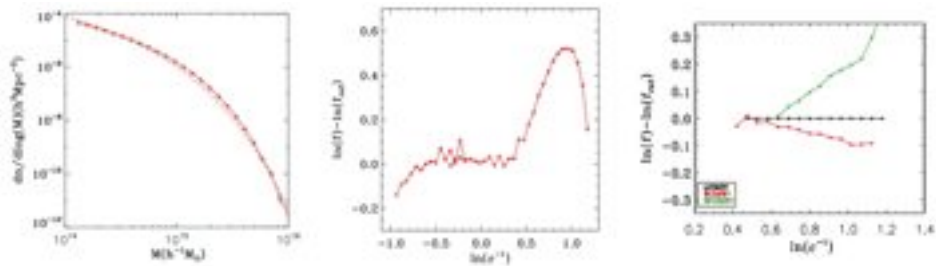


Figure 17 : Le plus à gauche, figure 17a, la fonction de masse des halos de matière noire à $z=0$, dans le modèle de concordance avec constante cosmologique. Pour la première fois, des halos de masse supérieure à $1016 h^{-1} M_\odot$ apparaissent. Au milieu, figure 17b, la mesure du rapport de la fonction de multiplicité à la prédiction de Tinker et al 2008 qui prévoit une universalité montre que l'universalité est brisée spécialement aux grandes masses. Le plus à droite, figure 17c, le rapport des fonctions de multiplicité des modèles cosmologiques simulés à la fonction de multiplicité dans le modèle de concordance avec constante cosmologique. Le déroulement du processus de structuration se déroule de façon significativement différente dans chaque modèle et conduit à des fonctions de masses des halos de matière noire spécifiques à chaque cosmologie.

Disposant de la distribution de matière dans l'espace comobile, et de son évolution, mais également dans l'espace des «redshifts» jusqu'au redshift élevés, nous mesurons la masse du halo le plus massif qui apparaît à différents redshifts et la probabilité de former un tel halo pour chaque modèle simulé. Ces quantités ne sont accessibles qu'à la condition de disposer d'une simulation de tout l'univers observable. Les figures 18 permettent de comparer les probabilités.

Les amas de galaxies effectivement observés jusqu'au redshift $z=1$ sont également portés sur ces figures. Le modèle Λ CDM montrent de réelles difficultés à reproduire la formation des halos supermassifs.

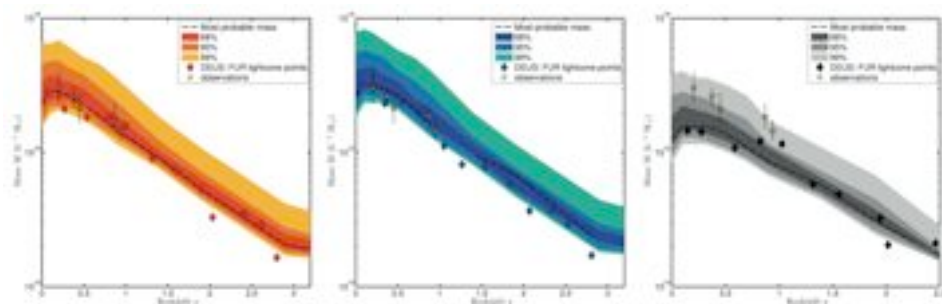


Figure 18 : Pour chaque modèle, il est représenté la probabilité d'obtenir un halo de masse maximale donnée en fonction du redshift. Les surfaces de confiance à 1, 2 et 3 σ sont portées sur ces figures. Les étoiles sont les amas de galaxies effectivement observés, nous n'avons considéré ici les données observationnelles que jusqu'à $z=1$. Les masses effectivement observées sont bien au dessus des masses des halos obtenus dans le modèle Λ CDM. La probabilité de former de tels objets dans un tel modèle est réduite. A 3σ , soit une probabilité supérieur à 99% de tels objets ne peuvent apparaître dans un tel modèle.

La statistique d'évènements rares aux valeurs extrêmes permet de contraindre fortement la nature de l'énergie noire. Plutôt qu'étudier les halos les plus massifs, nous pouvons également calculer et mesurer la probabilité pour chaque modèle de générer une vitesse de paire (vitesse de chute l'un vers l'autre entre deux halos) la plus élevée possible [Bouillot et Alimi 2013]. A nouveau, il serait très improbable de reproduire les vitesses de paires observées dans un modèle du type Λ CDM, à l'origine d'événement comme le Bullet Cluster.

Plus généralement une interprétation de type extension de notre description microscopique caractérisée par un paramètre d'équation d'état w compris entre $-1/3$ et -1 entraîne un effondrement gravitationnel qui paraît insuffisant pour reproduire le nombre de structures cosmiques observées, par contre pour permettre jusqu'à l'occurrence d'événements rares comme des halos supermassifs, un effondrement gravitationnel plus efficace est nécessaire. Celui-ci semble plus propice aux modèles cosmologiques avec un paramètre d'état w plus négatif que -1 correspondants à une extension de notre compréhension des lois de l'infiniment grand.

Si cette conclusion encore incertaine pour l'instant se confirmait, grâce à la poursuite des analyses de simulations numériques très haute performance, aux développements théoriques et à la confrontation avec des données observationnelles plus abondantes, l'interprétation de l'accélération cosmique récente de notre univers, c'est à dire la nature de l'énergie noire nous conduira alors effectivement à une refonte nécessaire du paradigme cosmologique construit aujourd'hui sur la Relativité Générale, c'est à dire sur le principe d'équivalence. En d'autres termes, l'observation de l'accélération cosmique récente serait la signature que tous les corps en principe ne tombent plus de la même façon tout au moins à l'échelle de l'Univers.

Références :

- [1] [Alimi & Scholl 1993] Alimi, J.-M. & Scholl, H., «Formation of Large Scale Structures of the Universe on the Connection MACHINE-2», International Journal of Modern Physics C, Volume 4, Issue 01, pp. 197-205 (1993).
- [2] [Alimi & Füzfa 2008] Alimi, J.-M. and Füzfa, A. «The Abnormally Weighting Energy Hypothesis: the Missing Link between Dark Matter and Dark Energy», JCAP 0809:014, 2008, arXiv:1002.4715.
- [3] [Alimi & Fuzfa 2009] Alimi, J.-M. and Füzfa, A. «The Abnormally Weighting Energy Hypothesis: The origin of the cosmic accélération», AIP proceedings of the «Invisible Universe International Conference», UNESCO-Paris, June 29-July 3, 2009, Volume 1241, Page 854, arXiv:1002.4721.
- [4] [Alimi et al 2012] Alimi J.-M. et al 2012, «First-Ever Full Observable Universe Simulation», Supercomputing 2012, SC12 – The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage an Analysis, Salt Lake City, Utah, USA, 10-16 November 2012. Article 73, IEEE Computer Society Press Los Alamitos, CA, USA ©2012. arXiv:1206.2838.
- [5] [Amendola & Tsujikawa 2010] Amendola Luca and Tsujikawa Shinji, 2010 «Dark Energy: Theory and Observations» Cambridge University Press, ISBN-10: 0521516005, ISBN-13: 978-0521516006.
- [6] [Angulo et al 2008] Angulo, R. E., Baugh, C. M., Frenk, C. S., & Lacey, C. G., «The detectability of baryonic acoustic oscillations in future galaxy surveys», MNRAS, 383, 755, 2008.
- [7] [Angulo et al 2012] Angulo, R.E., Springel, V., White, S.D.M., «Scaling relations for galaxy clusters in the Millennium-XXL simulation», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 426(3), 2046-2062, 2012, arXiv:1203.3216.
- [8] [Astier & Pain 2012] Astier Pierre and Pain Reynald, 2012, arXiv:1204.5493. «Observational evidence of the accelerated expansion of the universe», volume spécial des «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences» à propos de l'énergie noire et la matière noire.
- [9] [Bouillot & Alimi 2013] Bouillot, V. and Alimi, J.-M., «Extreme pairwise velocities of galaxy clusters as a cosmological probe», To be submitted to M.N.R.A.S., 2013.
- [10] [Buchert, Larena & Alimi 2006] Buchert, T., Larena, J. and Alimi, J.-M., «Correspondence between kinematical backreaction and scalar field cosmologies - the 'morphon field'», Class. Quant. Grav. 23:6379-6408, 2006, arXiv:gr-qc/0606020.
- [11] [Buchert 2008], Buchert T., «Dark Energy from structure : a status report». Gen. Rel. Grav. 40 : 467-527, 2008, arXiv:0707.2153.
- [12] [Chisari & Zaldarriaga 2011] Chisar, N., E., & Zaldarriaga, M., «Connection between Newtonian simulations and general relativity», Phys. Rev. D83: 123505, 2011, arXiv:1101.3555.
- [13] [Clowe, Gonzales & Markevitch 2004] Clowe D., Gonzalez A., Markevitch M., «Weak lensing mass reconstruction of the interacting cluster 1E0657-556: Direct evidence for the existence of dark matter», ApJ, 604, 596, 2004.
- [14] [Copeland, Sami, Tsujikawa 2006] Copeland E.J., Sami M., Tsujikawa S., Int. J. Mod. Phys. D, «Dynamics of Dark Energy», 15, 1753, 2006.

- [15] [Courtin et al 2010] Courtin, J., Rasera, Y., Alimi, J.-M., Corasaniti, P.-S., Boucher, V., Füzfa, A., «Imprints of dark energy on cosmic structure formation: II) Non-Universality of the halo mass function», *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 410 : 1911, 2011, arXiv:1001.3425.
- [16] [Eiseinstein et al 2005] Eisenstein, D. J., et al., «Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies», *ApJ*, 633, 560, 2005, arXiv:astro-ph/0501171.
- [17] [Füzfa & Alimi 2007] Füzfa, A. and Alimi, J.-M., «Toward a Unified Description of Dark Energy and Dark Matter from the Abnormally Weighting Energy Hypothesis», *Phys. Rev. D* 75: 123007, 2007, arXiv:astro-ph/0702478.
- [18] [Hawking & Ellis 1975] Hawking, S.W. and Ellis, G.F.R., «The large scale structure of space-time», 1975 Cambridge University Press, ISBN-10: 0521099064 | ISBN-13: 978-0521099066.
- [19] [Hockney & Eastwood 1981] Hockney, R.W. & Eastwood, J.W. 1981, «Computer Simulation Using Particles» New York : McGraw-Hill, 1981, ISBN-10: 0852743920, ISBN-13: 978-0852743928.
- [20] [Hu & Dodelson 2002] Hu Wayne and Dodelson Scott «Cosmic Microwave Background Anisotropies», *Ann.Rev.Astron.Astrophys.* 40:171-216, 2002, arXiv:astro-ph/0110414.
- [21] [Jeong & Komatsu 2009] Jeong, D. and Komatsu E., «Perturbation theory reloaded. II Nonlinear bias, baryon acoustic oscillations, and Millenium Simulation in real space», *ApJ*, 691: 569-595, 2009, arxiv:0805.2632.
- [22] [Kim et al 2011] Kim J. et al, «The New Horizon Run Cosmological N-Body Simulations», *Journal of The Korean Astronomical Society*, 44, 6, 217, 2011.
- [23] [Larena et al 2008] Larena, J. Alimi, J.-M., Buchert, T., Kunz, M. and Corasaniti, P.-S., «Testing backreaction effects with observations», *Phys. Rev. D* 79: 083011, 2009, arXiv:0803.1401.
- [24] [Linde 1990/2005] Linde, Andreï, «Particle Physics and Inflationary Cosmology», Harwood, Chur, Suisse, (1990), hep-th/0503203.
- [25] [Misner & Wheeler 1973] Misner, Charles W. and Wheeler John A., «Gravitation», Edition W. H. Freeman & Compagny, 1973, ISBN-10: 0716703440, ISBN-13: 978-0716703440.
- [26] [Peebles & Yu 1970] Peebles, P. J. E., Yu, I.T., «Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe», *ApJ*, 162, 815, 1970.
- [27] [Peebles 1980] Peebles P. J. E., 1980, «The Large Scale Structure of the Universe», Princeton University Press, Princeton, NJ., ISBN: 9780691082400.
- [28] [Peebles 1993] Peebles P. J. E., 1993, «Principles of Physical Cosmology», Princeton University Press, Princeton, NJ., ISBN 10: 0691074283 / ISBN 13: 9780691074283.
- [29] [Perlmutter et al. '99] Perlmutter, S., «Measurement of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae», *Astrophys. J.*, 517, 565-586, 1999, arXiv:astro-ph/9812133.
- [30] [Planck Collaboration 2013] «Planck 2013 results. XXII. Constraints on inflation», arXiv:1303.5082.

- [31] [Press et al 1992] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., «Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing», Cambridge : University Press, 1992, 3rd Ed., 2007, ISBN-10: 0521880688.
- [32] [Prunet et al 2008] Prunet, S., Pichon, C., Aubert, D., et al., «Initial Conditions For Large Cosmological Simulations», *ApJs*, 178, 179, 2008,, arXiv:0804.3536.
- [33] [Ratra & Peebles 1998] Ratra B., Peebles P. J. E., «Cosmological Consequences of a Rolling Homogeneous Scalar Field», *Phys. Rev. D*, 37, 3406, 1998.
- [34] [Rasera et al 2013] Rasera, Y, Corasaniti, P.-S., Alimi, J.-M., et al., «Cosmic Variance Limited Baryon Acoustic Oscillations from the DEUS-FUR Λ CDM Simulation», submitted to *M.N.R.A.S.* (2013).
- [35] [Riess et al 1998] Riess et al., «Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant», *Astron. J.*, 116, 1009-1038, 1998, arXiv:astro-ph/9805201.
- [36] [Springel et al. 2005] Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al., «Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars», *Nature*, 435, 629, 2005, arXiv:astro-ph/0504097.
- [37] [Teyssier 2002] Teyssier, R, *A&A*, «Cosmology Hydrodynamics with adaptive mesh refinement. A new high resolution code called RAMSES», 385, 337, 2002, arXiv:astro-ph/0111367.
- [38] [Tinker et al 2008] Tinker, J. et al., «Toward a halo mass function for precision cosmology: the limits of universality», *Astrophys. J.* 688, 709-728, 2008, arXiv:1001.3162.
- [39] [Wetterich 1988] Wetterich C., «Cosmology and the fate of dilatation symmetry», *Nucl. Phys. B*, 302, 668, 1988.
- [40] [Will 2006] Will, Clifford, W., «The Confrontation between General Relativity and Experiment», *Living Rev. Relativity*, 9, 3, 2006, <http://www.livingreviews.org/lrr-2006-3>.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Je vous remercie pour ce tour d'horizon. C'est normal, en peu de temps on ne peut pas montrer la simulation sur des milliards d'années. Nous allons enchaîner les présentations tout en demandant aux orateurs d'écourter leur temps de parole de quelques minutes pour gagner un peu plus de temps.

Maintenant, notre orateur est le Pr. Ellis de King's College de Londres, de l'Institut de Physique et qui est conseiller du Directeur Général du CERN en Suisse.

A LA RECHERCHE DU BOSON DE HIGGS ET AU-DELÀ

Pr. Jonathan R. ELLIS

*Membre de la Société Royale de Londres
et de l'Institut de Physique, Royaume Uni,
Conseiller du Directeur Général de l'Organisation
Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN)
au Large Hadron Collider -LHC-, Suisse*



Abstract

One of the most ambitious and largest scientific experiments ever, the Large Hadron Collider (LHC) at CERN in Geneva tries to address the most fundamental questions of physics and the cosmos. It investigates the structure of matter, and tries to find new insights into the history and fate of our Universe. Thus it addresses the questions posed in Paul Gauguin's famous painting «What are we? Where do we come from? Where are we going? This talk will review the prospects for finding the answers.

Merci Monsieur le Directeur des Séances. Membres de l'Académie, merci pour cette invitation, ça me donne l'occasion de revenir au Maroc, la première fois c'était il y a 32 ans, le pays a beaucoup changé depuis.

Vous venez d'écouter un exposé très intéressant sur la structure de l'univers à la plus grande échelle. Maintenant je vais parler de ce qui se passe à la plus petite échelle et de quelques liens entre la plus grande et la plus petite. Ça passe évidemment par Mr. Higgs qui en 1965 élaborait sa théorie sur l'origine des masses des particules élémentaires. Comme j'ai dit, il y a des liens étroits entre la physique des particules et la cosmologie. Pour décrire ce qui c'est passé depuis le début de l'univers, il faut comprendre le comportement des particules élémentaires et ces particules seraient peut-être aussi à l'origine de la formation des structures dans l'univers actuel.



Peter Higgs (1965)

Je vais vite rappeler ce que nous connaissons déjà de la structure intime des particules. Donc, nous savons que toute la matière visible dans l'univers est appliquée à des mêmes constituants. Nous savons qu'il y a des atomes, que les atomes contiennent des électrons, que les électrons orbitent autour des noyaux, que les noyaux sont fabriqués de particules que nous appelons des protons et des neutrons. Et nous savons aussi que ces protons et ces neutrons ne sont pas des objets élémentaires et en fait sont constitués de particules encore plus petites qui s'appellent les quarks.

En physique des particules nous essayons de comprendre les constituants des quarks, les électrons, etc. et de mieux comprendre les interactions des forces fondamentales qui agissent entre ces constituants de la matière. Il faut constater qu'au début du siècle passé beaucoup de progrès ont été réalisés dans ce domaine avec des observations des rayonnements cosmiques, en fait ces rayonnements ont été découverts il y a un siècle. Ainsi, il a été possible d'observer de nouvelles particules élémentaires en faisant des expériences dans des conditions contrôlées par le biais des accélérateurs et c'est ce qui a motivé la création du CERN en 1954. Les expériences avec les accélérateurs nous donnent la possibilité d'observer avec plus de précision et de pouvoir statistique les interactions des particules.

Ces observations au laboratoire nous ont permis d'établir le «Modèle Standard» de la physique des particules qui a été proposé pendant les années 1960 par Abdu Salam (originaire du Pakistan) et par deux physiciens théoriciens américains : Jerry Glashow et Steve Weinberg. Les premières confirmations de quelques prédictions de ce modèle standard ont été faites par des expériences au CERN pendant les années 1970. Pendant les décennies suivantes, il y a eu beaucoup d'études plus détaillées qui ont vérifié beaucoup de prédictions précises du modèle standard; à titre d'exemple, ces expériences nous ont permis d'établir le nombre total des particules élémentaires.

En quoi consiste le modèle standard? D'un côté il y a les particules de la matière et il y a 4 forces fondamentales qui agissent entre ces particules : la gravitation, le magnétisme, la force nucléaire forte qui tient les noyaux et la force faible qui engendre des interactions radioactives. Ces particules, par leurs propriétés et leurs interactions, suffisent pour créer toute la matière visible dans l'univers, mais il reste des questions ouvertes à ce sujet, par exemple :

- D'où viennent les masses des particules?
- Pourquoi y-t-il tellement de types de particules?
- De quoi est constituée la matière noire postulée par les astrophysiciens?
- Comment unifier les forces fondamentales?
- Comment quantifier la gravitation par la mécanique quantique?

Les expériences conduites au LHC s'attaquent à tous ces problèmes fondamentaux. Nous avons réalisé des progrès récemment surtout concernant l'origine des masses des particules. Nous savons que certaines particules ont des masses comme les électrons, d'autres particules n'en ont pas comme les photons par exemple.

D'où viennent les masses des particules?

Nous savons que la masse est liée au poids (d'après Newton) et nous savons que la masse est liée à l'énergie (Einstein l'a démontré). Malheureusement ces deux savants ont «manqué» de nous expliquer l'origine de la masse et c'est là où intervient monsieur Higgs. Selon la théorie de Higgs il y aurait un champ universel partout dans l'univers et il y aurait des fluctuations quantiques dans ce champ que nous appelons le boson de Higgs. Il faut noter que Higgs n'était pas le seul à proposer une telle théorie. En fait l'idée que l'univers soit rempli d'un champ qui donne des masses aux autres particules a été proposée pour la première fois par F. Englert et R. Brout avant Peter W. Higgs, et quelques semaines après Higgs a été proposée par G. Guralnik, C. Hagen et T. Kibble. Mais seul Higgs a commenté les distances d'un boson scalaire massif associé à ce mécanisme et c'est pourquoi ce boson prend l'appellation de boson de Higgs.

Je voudrais vous proposer une analogie de l'action de ce mécanisme. Imaginons un champ universel de neige infini, isotrope et homogène. Si un skieur va vite sans interagir avec la surface de neige, c'est comme une particule qui n'interagit pas avec le champ de Higgs, elle va à la vitesse de la lumière (ex : un photon). Avec des raquettes on va plus lentement que le skieur, c'est comme une particule qui a une masse (ex : électron). Finalement, si on n'a pas d'équipement de neige, on s'enfonce profondément dans le champ de neige d'où une interaction plus forte et on va très lentement, on acquiert une grande masse.

Comment tester cette théorie? De quoi est fabriquée la neige? Evidemment la neige est fabriquée de flocons de neige et on peut considérer le flocon de neige comme l'analogie du quantum du champ de Higgs et ça ce que nous avons sans doute repéré au LHC tout récemment. Comme je l'ai déjà mentionné, il y a d'autres grandes questions dans la physique des particules. A titre d'exemple : pourquoi et comment il y a une différence entre la matière et l'antimatière? L'existence de l'antimatière a été proposée par Dirac. Je pense qu'il imaginait qu'elle serait la même avec des charges opposées que les particules de la matière. Dans les faits, des expériences ont montré qu'il y a des petites différences. Le physicien Sakharov a suggéré que cette différence soit liée à l'origine de la matière. Bien évidemment il y a les expériences qui essaient de faire ce lien. Il est bien possible

que la matière noire soit constituée de particules élémentaires qui n'ont pas de charges électriques. Il y a plusieurs candidats pour être cette matière noire comme par exemple des particules supersymétriques dont il est question par la suite lors de cette séance. Finalement, parmi les grandes questions, je cite le problème d'unifier les interactions fondamentales, c'était effectivement le rêve d'Einstein mais il n'a jamais réussi, mais il a avancé l'idée qu'il y a des dimensions supplémentaires de l'espace.

Venons maintenant au projet LHC au CERN. C'est un accélérateur, collisionneur de particules situé dans un tunnel avec une circonférence de 25 km et une profondeur d'environ une centaine de mètres. Dans ce collisionneur on provoque des chocs entre des protons avec des énergies chacun de 4 TeV ($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV} \sim 1000$ fois la masse du proton). On fait jusqu'à un milliard de collisions par seconde et lors de ces collisions on espère comprendre mieux l'origine de la masse, l'origine de la matière noire et le plasma primordial qui a rempli l'univers pendant ces premières secondes.



Collisionneur proton-proton.

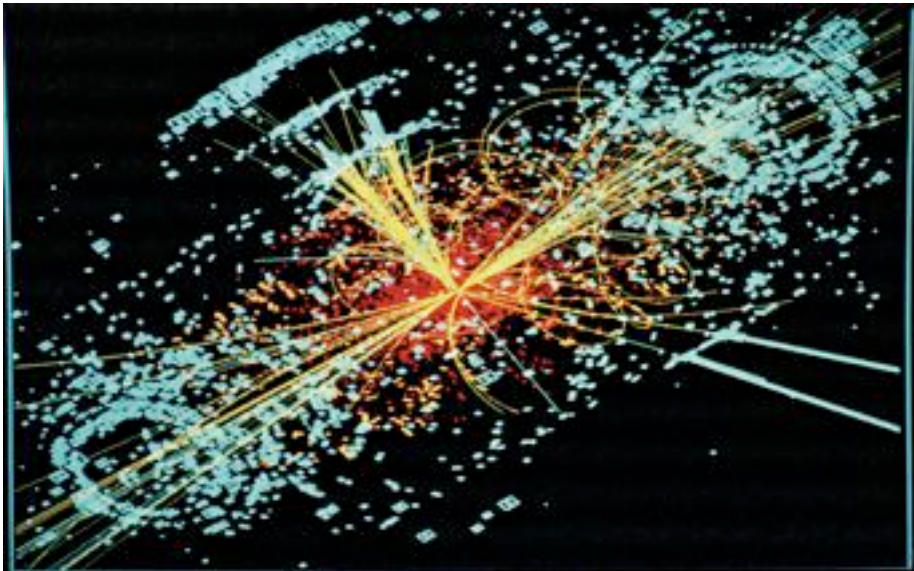
Je fais remarquer qu'il y a un bon nombre de collaborateurs marocains qui participent à l'expérience ATLAS du CERN. Cette expérience se déroule dans une caverne souterraine à une profondeur d'une centaine de mètres. Vous constatez que cette caverne est aussi grande que l'intérieur de la cathédrale de Notre Dame à Paris, son diamètre est à peu près 25 m et sa longueur de près de 50m. Il a fallu la collaboration de beaucoup de scientifiques et ingénieurs pour sa construction, jusqu'à 3000 scientifiques venant d'une quarantaine de pays y compris le Maroc.



Construction de l'expérience ATLAS.

Actuellement, il y a un millier de doctorants qui analysent les données. C'est un projet mondial : il y a environ 11.000 physiciens et ingénieurs qui travaillent au CERN et qui viennent d'une soixantaine de pays dont le Maroc. Il faut noter que la plupart des physiciens travaillent chez eux et font la navette entre leurs institutions et le CERN. Que cherchent ces scientifiques ?

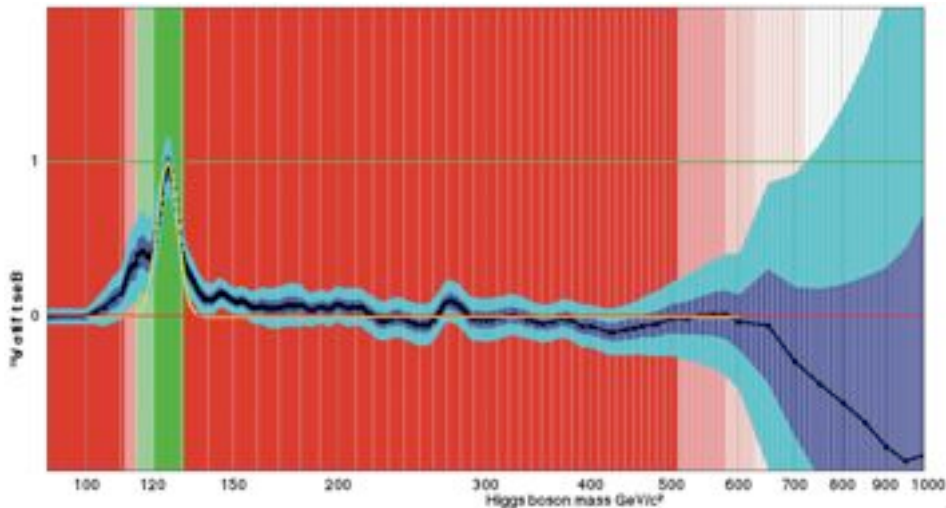
Ils cherchent d'abord le boson de Higgs. Le boson n'est pas visible parce que c'est une particule neutre qui se désintègre très rapidement et pourrait se révéler comme suit :



Pour rechercher la matière noire, les physiciens recherchent des événements où de l'énergie invisible s'échappe de la collision et est emportée par des particules invisibles de la matière noire.

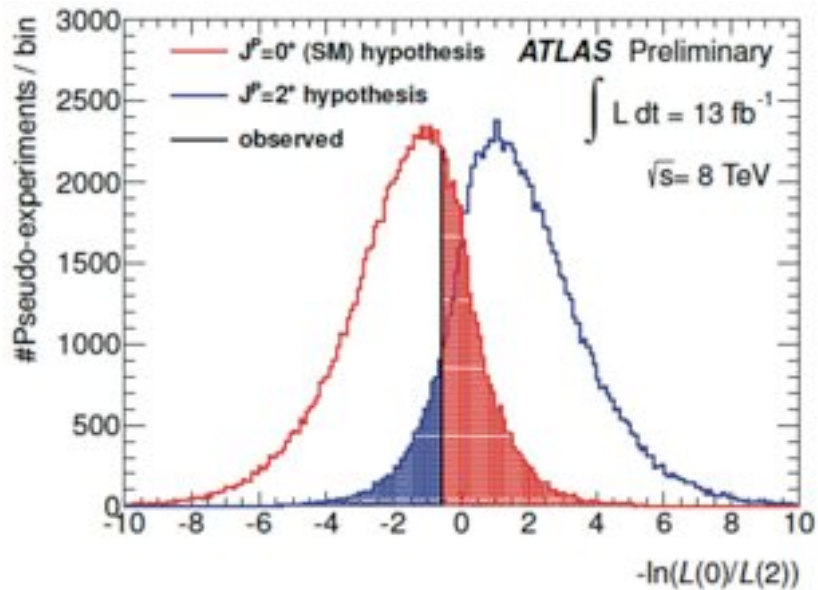
J'ai parlé tout à l'heure des théories avec des dimensions supplémentaires de l'espace. Dans quelques unes de ces théories il y a la possibilité que la gravitation devienne une force forte à l'échelle d'énergies du LHC. Dans ces conditions il est possible qu'un mini trou noir soit fabriqué par la collision des constituants du proton. Evidemment ces trous noirs seraient microscopiques et se désintégreraient tout de suite, donc pas de danger pour l'humanité.

L'annonce de la découverte du boson de Higgs a été faite le 4 juillet 2012. C'était une journée mémorable et pleine d'émotion, des doctorants ont attendu toute la nuit pour accéder à la salle et assister à l'annonce des résultats. Les deux grandes expériences au LHC (ATLAS et CMS) ont observé des événements intéressants. Le 13 décembre 2012 il y a eu une mise à jour des résultats : on observe un pic aux alentours de 125 GeV qui pourrait bel et bien être le boson de Higgs.



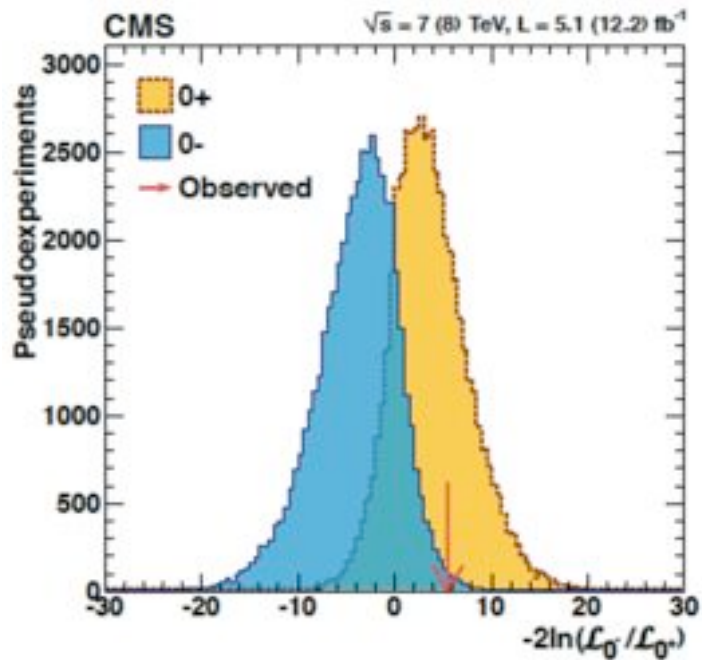
Est-ce bien la pièce manquante du puzzle des particules élémentaires?

Il y a eu la première indication, montrée par la collaboration autour du projet ATLAS, que le spin (moment angulaire) de cette nouvelle particule est sans doute zéro.



La distribution angulaire des événements $\gamma\gamma$ défavorise spin 2 à 91%

Il y a aussi une indication que ce boson a sans doute la parité + comme prévu par la théorie de Higgs (observation par CMS).



La distribution des événements ZZ^* défavorise 0- @ 97%

Avec mon étudiant, Tevong You, nous avons analysé les informations sur les couplages de ce boson aux autres particules pour voir si ces couplages sont proportionnels à leurs masses mais je n'ai pas le temps pour aller dans les détails.

Pour terminer, je voudrais vous montrer quelques images de la participation marocaine dans l'expérience ATLAS.



Le Maroc participe également à des conférences internationales sur les résultats du LHC (Conférence "Partager le savoir" à Malte). Le CERN a encouragé cette collaboration avec le Maroc par l'envoi récemment de quelques centaines d'ordinateurs qui pourraient servir pour les analyses des données LHC.

En conclusion, sans le boson de Higgs, il n'y aurait pas de masse, ça veut dire qu'il n'y aurait pas d'atomes. Si les électrons n'avaient pas de masses, ils s'échapperaient des noyaux à la vitesse de la lumière. Aussi, les interactions faibles ne le seraient pas. Il est donc évident que l'existence du boson de Higgs est un élément clé non seulement pour la physique des particules mais aussi pour le comportement de l'univers comme nous le connaissons.

Merci.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Merci Pr. Ellis pour cet excellent exposé : Une promenade à la recherche du Boson de Higgs. Je remets tout de suite la parole au Pr. El Hassan Saidi, membre résident de l'Académie, qui, pour la continuité, va nous parler de l'univers supersymétrique. Les questions seront regrouppées à la fin de cet exposé.

INTRODUCTION TO STANDARD MODEL OF ELECTRO-WEAK INTERACTIONS

Pr. El Hassan SAIDI

*Lab Of High Energy Physics, Modeling and
Simulations, Faculté des Sciences,
Mohamed V-University, Rabat, Morocco,
CPM, Centre of Physics and Mathematics, Morocco*



Abstract

Standard model (SM) of electroweak interactions is an advanced realistic quantum physical prototype describing the unification of electromagnetism and the weak nuclear force at energies around 100GeV; and which successfully passed many tests. The quantum field theory description of this model is an extension of the well established Maxwell theory of electromagnetism to high energies by implementing as well the weak force responsible for the radioactive decays. From gauge theory view, SM is a spontaneously broken electroweak theory, quantum mechanically consistent, answering several fundamental questions, and predicting the existence of neutral scalar particle H that explains the origin of mass of leptons, quarks and the W^\pm ; Z^0 vector bosons mediating the short rang weak interactions. Despite spectacular success, SM leaves also many un-answered questions indicating that is just a part of the world particle's reality at very high energies.

In this introductory presentation, we review the main lines of the field theoretical engineering of the SM of interacting elementary particles around the electroweak scale. After recalling general results on electromagnetism and relativistic fields including vectors potential vectors, Dirac particles and chirality, we develop key ideas behind guiding principles of SM by keeping the analysis as much as closer to Maxwell theory formulation, and mainly focussing on the classical formulation.

Key Words:

Electromagnetism and Einstein special relativity, weak interactions, gauge symmetry and unification, spontaneous symmetry breaking, SM and predictions.

1. Introduction

Since its proposal in 1960-th [1, 2, 3], the idea of unification of electromagnetic and nuclear weak forces, at electroweak energy scale M_w , has been subject to great theoretical and experimental deals that culminated by the engineering of a realistic SM of electroweak interactions, for reviews see [4]-[8] and refs therein. This quantum field model constitutes a great achievement in modern physics as it has successfully overcome many tests, a recently one by the Large Hadron Collider, LHC where a candidate for the hypothetical Higgs particle of SM has been observed [9, 10]. It provides an elegant framework describing known experimental facts with high precision and is considered as the basis for possible extensions that implement the two other fundamental forces of universe: the nuclear strong force and gravity [11]-[17] and refs therein.

In this general review, we describe basic aspects on the field formulation of the SM around the electroweak scale. We shall think about this model as an extension of Maxwell theory of electromagnetism to high energies implementing as well the nuclear weak force describing radioactive decays such as β -decay. To make these notes as much as useful for those who are not familiar with methods of relativistic quantum field theory (QFT) and gauge symmetry, we begin by describing general results on electromagnetism that we use to introduce tools needed in the derivation of the SM such as Einstein special relativity, Maxwell gauge invariance and its non abelian extensions as well as spontaneous symmetry breaking used in Higgs mechanism [18, 19]; one of the corner stones of SM.

These notes are organized into 8 sections. In section 2, we review briefly useful features on the structure of basic matter at high energies and fundamental interactions. In sections 3 and 4, we recall particular features of electromagnetic field such as $U_{em}(1)$ gauge symmetry and special relativity; then use them to implement interactions with Dirac matter. In section 5, we show how to extend interacting Dirac matter with Maxwell field to the case of Yang-Mills fields with a non abelian $U(N)$ gauge invariance. An explicit illustration is given for the interesting example of $U(2)$ gauge model. In section 6, we study the spontaneous symmetry breaking and Higgs mechanism, first for the case of a spontaneously broken abelian symmetry; and second for the interesting case of non abelian symmetries. In section 7, we describe the engineering of minimal SM of electroweak interactions and describe some of its main predictions. Last section is devoted to conclusion and few comments.

2. Structure of matter at high energies

According to current experimental knowledge and phenomenological observation at accessible energies, the elementary particles of universe are of 2 types: (i) *fundamental* particles making atoms of known matter and (ii) *gauge quanta* mediating particle's interactions.

2.1 Fundamental particles

Thought of as elementary entities, the today known fundamental particles appear to be all having spin $\frac{1}{2}$ under the isotropy symmetry of 4D space-time; that is relativistic fermions with quantum numbers as exhibited in table (4.3). The set of these particles is divided into 2 remarkable sectors:

- a subset containing 6 *quarks* [9]:

These are: the quarks up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t) and bottom (b) carrying fractional units of the electric charge e and having non zero masses as shown on the following table.

u	d	c	s	t	b
$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$
1.7-3 MeV	4.1-5.8 MeV	~ 1.27 GeV	~ 101 MeV	~ 172 GeV	~ 4.2 GeV

(2.1)

These elementary particles make hadrons like the proton $p = uud$ and the neutron $n = udd$ with respective electric charge $Q_{\text{proton}} = 2 \times \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$ and $Q_{\text{neutron}} = \frac{2}{3} - 2 \times \frac{1}{3} = 0$. Each quark species, called *flavour*, is described by a space-time *spinor* field $\Psi_\alpha(x)$ ($\equiv \Psi$ for short) and appears under three forms, commonly known as colours; for example the quark $u_\alpha(x) \equiv u$ may be one of the three following

$$u_1, u_2, u_3 \equiv u_a \quad (2.2)$$

and same thing for the others. So quarks may be represented collectively by a space time spinor field with two extra indices like $\Psi_\alpha^{ia}(x)$ with $i = 1, \dots, 6$ to distinguish the flavours; and $a = 1, 2, 3$ for colours. Because of their electric charges, quarks interact *electromagnetically*; but also in other manners in particular in a *strongly* way in order to make hadrons.

- a second subset containing 6 *leptons* l :

These particles, which have *no strong* interactions contrary to quarks, are : the electron e^- , the myon μ^- , the tau τ^- together with the respective neutrinos with electric charges Q_i and masses m_i as:

l	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ
Q	-1	0	-1	0	-1	0
m	0.511 MeV	<15 eV	106 MeV	<15 keV	1.78 GeV	<18.2 MeV

(2.3)

Though no deep explanation is known yet for the why these number of particles, quarks q and leptons l exhibit other remarkable features; for example they are ranged into 3 families as follows

families	leptons	quarks
1st	e^-, ν_e	u_a, d_a
2nd	μ^-, ν_μ	c_a, s_a
3rd	τ^-, ν_τ	t_a, b_a

(2.4)

Why this organization and why three families are the kinds of questions to answer in models building of elementary particle physics at high energies. The standard model of electroweak interactions we are interested in here is an important step to that purpose.

2.2 Gauge quanta

Generally, the particles of table (2.2) interact among themselves into 4 different manners with different coupling strengths: electromagnetically, weakly, strongly and gravitationally. In gauge theory approach whose key idea will be reviewed later (see sections 3, 4 for abelian theories; and 6 for non abelian extension), all these interactions are assumed to be produced by the exchange of quanta of gauge particles having integer spins: *gauge bosons*.

For the electromagnetic, the weak and the strong interactions, the corresponding quanta are respectively given by the photon γ ; the 3 gauge bosons W^\pm , Z^0 and 8 *gluons*. These gauge particles are described by *spin-one vector fields*.

interaction	quanta	number	gauge symmetry	
electromagnetism	the photon γ	1	$U^{em}(1)$	(2.5)
weak	the bosons W^\pm , Z^0	3	$SU_L(2)$	
strong	the gluons	8	$SU_C(3)$	
gravitation	graviton ?	1	diffeomorphisms	

with the remarkable property that photon and gluons are massless; but W^\pm, Z^0 are massive; they are associated with a short range interaction

quanta	charge	mass	
photon γ	0	$M_\gamma = 0$	(2.6)
bosons W^\pm	± 1	$M_w = 80.4 \text{ GeV}$	
boson Z^0	0	$M_z = 91.2 \text{ GeV}$	

For gravitation, the corresponding quanta, namely *the graviton*, is assumed to be described by a spin-2 tensor field; this is an hypothetic gauge particle of *quantum gravity* theory, the quantum version of the classical Einstein general relativity. Notice also the following features:

- confinement: although basic entities, quarks and gluons do not exist as free particles, they form a large number of bound states namely the hadrons,
- the sum of all electric charges inside any family of (2.4) is equal to zero; the total charge $Q = 0 - 1 + 3 \times \frac{2}{3} + 3 \times \frac{-1}{3}$,
- along with the particles of tables (2.4-2.5), the SM of electweak interaction requires moreover a *Higgs particle* H that plays a central role in giving masses to W^\pm , Z^0 , to charged leptons and to quarks. This is a neutral spin zero field to be further explored in sections 6 and 7.

In what follows, we first describe the main lines of the gauge theory behind the Maxwell theory of electromagnetism. Then, we consider its non abelian Yang-Mills (YM) extension and after we pass to the building of the SM of electroweak interactions.

3. Electromagnetic interaction

As the SM of the electroweak interactions is mainly an extension of the Maxwell theory where geometry of space time and internal symmetries of the fields play a central role,

we review in this section results on basic features of the electromagnetic interaction. We begin by describing the electrostatic and magnetostatic fields \vec{E} and \vec{B} . Then, we consider the time dependent regime of the (\vec{E}, \vec{B}) fields as well as their link with Einstein special relativity in 4D space time. After, we introduce the Dirac field Ψ including its left and right chiralities, describing electrically charged matter particles as well as the interaction of Ψ with Maxwell field \mathcal{A}_μ .

3.1 Maxwell theory

In a classical approach to the electromagnetic field (\vec{E}, \vec{B}) propagating in vacuum with the usual permittivities ε_0 and μ_0 , one distinguishes: (i) permanent static regime, (ii) quasi-static with slow time variation of \vec{E} , \vec{B} , and (iii) dynamical regime involving fast variations of electromagnetic fields. Obviously, the two first situations are particular limits of the 3rd one.

3.1.1 Electrostatic and magnetostatic fields

In the time independent description of \vec{E} and \vec{B} , the electrostatic vector field $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ and the magnetostatic $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$, having altogether $3 + 3 = 6$ components, obey the following first order *spacial* partial differential eqs.

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{E} &= \frac{\varrho}{\varepsilon_0} & , & & \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{0} & , & & \text{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

with the real $\varrho = \varrho(r)$ and the real 3-vector $\vec{j} = \vec{j}(r)$ standing respectively for the density of electric charges and the density of permanent currents. Being uncoupled relations as clearly shown on (3.1), the above differential eqs are quite simple to handle; and are used in computing the static \vec{E} and \vec{B} fields as follows

$$\begin{aligned} \int_{S=\partial\mathcal{V}} \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} & : & \text{ Gauss theorem} \\ \oint_{C=\partial\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 I & : & \text{ Ampère theorem} \end{aligned} \quad (3.2)$$

In these non local relations, $S = \partial\mathcal{V}$ stands for the *Gauss surface* (in practice a 2-sphere) enclosing a volume \mathcal{V} . The curve $C = \partial\Sigma$ is the *Ampère curve* (a closed curve, generally a circle or a rectangle) bordering a surface Σ . Eqs (3.2) are very helpful in the case where the integrals in (3.2) are easy to compute; this happens for systems with symmetries. As an example of the way to use (3.2), recall that radial symmetry and Gauss theorem allows to directly compute the electrostatic field \vec{E} created at point M of space by a charge Q located at the origin of a Galilean frame.

$$E \times 4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0} \Rightarrow \vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \vec{r}, \quad \vec{r} = \overrightarrow{OM} \quad (3.3)$$

The Gauss surface is a 2-sphere of centre O and radius r . Similarly, the magnetostatic field $\vec{B}(z)$ created by a permanent current I in a straight long wire along \overrightarrow{OZ} axis of a 3D-space frame has a cylindric symmetry; its value follows easily by using Ampere theorem.

$$B \times 2\pi r = \mu_0 I \Rightarrow \vec{B}_{\text{wire}}(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\varphi \quad (3.4)$$

here the curve \mathcal{C} is a circle in xHy plane, it has radius r and axis \overrightarrow{OZ} . The magnetostatic field $\vec{B}(z)$ created by a circular current loop I of centre O and radius R at a point $M = (0, 0, z)$ belonging to its symmetry axis \overrightarrow{Oz} is:

$$\vec{B}_{loop}(z) = \frac{\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \vec{e}_z \quad (3.5)$$

this expression needs more work; it follows from use of Biot and Savart law.

Notice also that the second line of (3.1) allows to express the static \vec{E} , \vec{B} fields as follows

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\vec{\nabla} V \\ \vec{B} &= \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \end{aligned} \quad (3.6)$$

with the new fields V and \vec{A} standing for the usual *scalar* and *the 3-vector potentials*, having altogether $1 + 3 = 4$ components. We will turn back to these potentials.

3.1.2 Time dependent fields and Maxwell eqs

The above relations change when allowing the electric densities (ϱ, \vec{j}) and the fields (\vec{E}, \vec{B}) to depend as well on time coordinate t . By taking into account time variations of the electromagnetic fields, that is

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \neq \vec{0}, \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \neq \vec{0} \quad (3.7)$$

the field eqs (3.1) get modified as:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\varrho}{\varepsilon_0} & : \text{Maxwell - Gauss} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & : \text{Maxwell - Faraday} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & : \text{Maxwell - Thompson} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & : \text{Maxwell - Ampère} \end{aligned} \quad (3.8)$$

with $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$ and $c = 3 \times 10^8$ m/s the speed of light. From these relations, called *Maxwell eqs*, one learns several informations; in particular:

(a) the fields \vec{E} and \vec{B} are no longer two independent fields; they are coupled vectors as shown by 2nd and 4th equations. Because of $\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ they are also intimately related with properties of light manifested in (3.8) by the fundamental constant c , the speed of light.

(b) using the mathematical identity $\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{B}) = 0$ and (3.8), one can easily show that we have the following conservation law

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0 \quad (3.9)$$

This law of continuity teaches us:

- the densities ϱ and \vec{j} are not independent and, like eq(3.6), may be thought of as the components of 4-vector. Thus the apparition of the 4-component quantities in electromagnetism such as

$$(\varrho, j_x, j_y, j_z), \quad (V, A_x, A_y, A_z) \quad (3.10)$$

is an indication that Maxwell eqs do have a *relativistic* 4D space-time description.

- eq(3.9) is a conservation law that capture a second important property. From *Noether theorem* of field theory, which states that to each continuous symmetry one has a conservation law, it follows that Maxwell equations do have a *continuous symmetry*. This symmetry is a 1-parameter group given by

$$U_{em}(1) = \{g(\theta) = e^{i\theta}, \quad \theta \in \mathcal{R}\} \quad (3.11)$$

and to which we refer below as the Maxwell gauge symmetry.

It happens that the extension of this invariance to the case of several parameter symmetries with typical $g(\theta_1, \theta_2, \dots)$ plays a crucial role in Yang-Mills theory and in the building of SM of electroweak interactions.

(c) From eqs (3.8), we also learn that for time dependent electromagnetic fields \vec{E} , \vec{B} , eqs(3.6) extend as

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \end{aligned} \quad (3.12)$$

where now \vec{E} has as well a dependence in the vector potential \vec{A} . These potentials, which plays an important role in the study of alternating current, are defined up to the arbitrariness

$$\begin{aligned} V &\rightarrow V + \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \quad \forall \alpha = \alpha(t, r) \in \mathbb{R} \\ \vec{A} &\rightarrow \vec{A} - \vec{\nabla} \alpha \end{aligned} \quad (3.13)$$

showing that V and \vec{A} potentials cannot be observable physical quantities.

3.1.3 Special relativity and gauge symmetry

Under the change (3.13), the electromagnetic fields \vec{E} and \vec{B} remains invariant as shown below,

$$\begin{aligned} \vec{E} &\rightarrow \vec{E} + \delta \vec{E} \\ \vec{B} &\rightarrow \vec{B} + \delta \vec{B} \end{aligned} \quad (3.14)$$

with

$$\begin{aligned} \delta \vec{E} &= \frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \alpha - \vec{\nabla} \frac{\partial}{\partial t} \alpha = \vec{0} \\ \delta \vec{B} &= -\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \alpha = \vec{0} \end{aligned} \quad (3.15)$$

In using \vec{E} and \vec{B} to study the properties of electromagnetic interaction, space time symmetry and gauge invariance of Maxwell equations are therefore hidden and so one loses a power tool for a deepen exploration.

In relativistic theory, one uses rather the gauge potentials V and \vec{A} despite they are not physical observables; this is the price to pay for exhibiting space time and gauge symmetry. Observables are then given by gauge invariant space time scalars.

a. Special relativity in 4D

Einstein special relativity is formulated on the 4D Minkowski space time \mathbb{M}_4 with (1,3) signature. Homogeneity and isotropy properties of \mathbb{M}_4 are nicely encoded into the Poincaré \mathcal{P}_4 symmetry. This is a 10 dimensional parameter space time symmetry group given by the semi-direct product

$$\mathcal{P}_4 = T_4 \times SO(1, 3) \quad (3.16)$$

with T_4 standing for the subgroup of space time translations (4 parameters); and $SO(1, 3)$ for the subgroup of space time rotations (6 parameters). They extend the usual T_3 and $SO(3)$ of classical mechanics in \mathbb{R}_3 leading to conservation of impulsion \vec{p} and the angular momentum: $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$.

T_4 is generated by the 4-component energy- momentum P_μ and the isotropy subgroup $SO(1,3)$ by the 6 rotation generators $J_{[\mu\nu]}$. In relativistic quantum mechanics, these generators may be realized as

$$P_\mu = i\hbar\partial_\mu, \quad J_{[\mu\nu]} = x_\mu P_\nu - x_\nu P_\mu \quad (3.17)$$

Other realizations are also possible; particular ones are those involving creation and annihilation operator's of QFT's.

b. gauge symmetry

Elements $g(\alpha)$ of the $U_{em}(1)$ Maxwell gauge symmetry we referred to above are continuous functions of α whose explicit expression read as

$$g(\alpha) = e^{i\alpha Q_{em}}, \quad \alpha \in \mathbb{R} \quad (3.18)$$

with $g(0) = I_{id}$. These elements are invertible and satisfy the group law $g(\alpha) \times g(\beta) = g(\alpha + \beta)$. The operator Q_{em} is the generator of $U_{em}(1)$; its eigenvalues on eigenvectors $|v_i\rangle$ are given by the electric charges Q_i . Notice that since we have the equality:

$$\begin{aligned} g(\alpha) \times g(\beta) &= g(\beta) \times g(\alpha) \\ \Updownarrow \\ [Q_{em}, Q_{em}] &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

the group $U_{em}(1)$ is abelian. Notice by the way that for multi-parameter symmetries; for example the three parameter group with generators T_1, T_2, T_3 and typical elements $g(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ of the form

$$e^{i(\alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \alpha_3 T_3)} \quad (3.20)$$

the above commutativity property does not hold in general

$$\begin{aligned} g(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \times g(\beta_1, \beta_2, \beta_3) &\neq g(\beta_1, \beta_2, \beta_3) \times g(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \\ \Updownarrow \\ [T_i, T_j] &\neq 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

In this case we say that the symmetry group is non abelian.

For later use, let us recall other helpful aspects on these two features by starting from a) and turn back to b) in section 4.

3.2 More on electromagnetic eld and special relativity

In 4D Einstein special relativity, the local coordinates of the Minkowski space \mathbb{M}_4 are given by 4-vectors with a component time $x^0 = ct$ and a spatial coordinate $\vec{r} = (x, y, z)$ generally denoted as $\vec{x} = (x^1, x^2, x^3)$. So point coordinates x^μ in \mathbb{M}_4 are as:

$$\mathbb{M}_4 = \{x^\mu = (x^0; \vec{x}) = (ct; x, y, z)\} \quad (3.22)$$

with non positive definite metric $g_{\mu\nu}$ for rising and lowering indices given by

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix}, \quad g_{\mu\nu} g^{\nu\sigma} = \delta_\mu^\sigma \quad (3.23)$$

As such the \mathbb{M}_4 space is the pseudo-euclidian space $\mathbb{M}^{1,3}$, and then one has to distinguish between x^μ and x_μ , which related to each other like

$$x_\mu = g_{\mu\nu} x^\nu = (x^0; -\vec{x}) \quad (3.24)$$

The metric $g_{\mu\nu}$ allows also to build relativistic scalars; that is space time quantities invariant under the isotropy group $SO(1, 3)$. As an example, the analogue of $SO(3)$ invariant distance $\vec{r}^2 = \vec{r} \cdot \vec{r}$ of the 3- space \mathbb{R}^3 reads in 4D space time $\mathbb{R}^{1,3}$ as

$$x^2 \equiv g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu = (ct)^2 - \vec{r}^2 \quad (3.25)$$

This is a real $SO(1, 3)$ invariant number x^2 ; but it is a non positive quantity capturing a basic difference with the classical physics in \mathbb{R}^3 where $\vec{r}^2 \geq 0$. In special relativity, $x^2 = x^\mu x_\mu$ may be negative and can take a zero value even if $x^\mu \neq 0$. The non positivity of space time $SO(1, 3)$ scalars turns out to be the source of serious difficulties in quantum physics; in particular the unitary property, but fortunately we know how they can be overcome.

3.2.1 electromagnetic matrix $F_{\mu\nu}$

In 4D space time, the $(3 + 3)$ components of the electromagnetic fields \vec{E} and \vec{B} are precisely the 6 components of a 4×4 antisymmetric matrix, called the electromagnetic tensor field strength and denoted as

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -E_z \\ E_x & 0 & -B_z & B_y \\ E_y & B_z & 0 & -B_x \\ E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} = -F_{\nu\mu} \quad (3.26)$$

that is

$$E_i = F_{0i}, \quad B_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} F_{jk} \quad (3.27)$$

where ε_{ijk} is the completely antisymmetric Levi-Civita tensor of 3D space. Maxwell equations of the fields \vec{E} , \vec{B} can be also expressed in 4D space time by help of the matrix

$F_{\mu\nu}$. To that purpose, it is interesting to introduce two quadri-vectors: the 4- vector potential A^μ and the 4-vector electric density J^μ defined as

$$\begin{aligned} A^\mu &= (cV, \vec{A}) & , & \quad A_\mu = (cV, -\vec{A}) \\ j^\mu &= (\rho c, \vec{j}) & , & \quad j_\mu = (\rho c, -\vec{j}) \end{aligned} \quad (3.28)$$

in a similar manner to the space time coordinates $x^\mu = (ct, \vec{r})$. By help of (3.12), it is not difficult to check that the electromagnetic tensor $F_{\mu\nu}$ is nothing but 4D curl of the 4- vector potential namely

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu = -F_{\nu\mu} \quad (3.29)$$

with the gauge symmetry property

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \alpha \quad (3.30)$$

living $F_{\mu\nu}$ invariant due to the property $\partial_\mu \partial_\nu \alpha = \partial_\nu \partial_\mu \alpha$. Using (3.18), the above gauge transformation reads also like

$$A_\mu \rightarrow UA_\mu U^{-1} + U \partial_\mu U^{-1} , \quad U \equiv g(\alpha) = e^{i\alpha} \quad (3.31)$$

The 4 Maxwell field equations (3.8) in presence of a space time electric current density J^μ are expressed in Minkowski space time simply as

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu \quad (3.32)$$

This matrix field obeys as well the following topological conservation law that is related to the Jacobi identity of Lie algebra

$$\partial^\mu F^{\nu\rho} + \partial^\nu F^{\rho\mu} + \partial^\rho F^{\mu\nu} = 0 \Leftrightarrow \varepsilon_{\sigma\mu\nu\rho} \partial^\mu F^{\nu\rho} = 0 \quad (3.33)$$

with $\varepsilon_{\sigma\mu\nu\rho}$ the completely antisymmetric tensor in 4D Minkowski space time. Because of antisymmetry of $F_{\mu\nu}$, we rediscover the conservation law (3.9) which reads in space time formulation like $\partial_\mu J^\mu = \partial_\mu \partial_\nu F^{\mu\nu} = 0$.

3.2.2 $F_{\mu\nu}$ as a gauge symmetry curvature

Due to gauge invariance under (3.30), the antisymmetry property of $F_{\mu\nu}$ captures a geometric property allowing to define it as a commutator like

$$\begin{aligned} [D_\mu, D_\nu] &= (D_\mu D_\nu - D_\nu D_\mu) \\ &\equiv ieF_{\mu\nu} \end{aligned} \quad (3.34)$$

with e the electric charge unit (electric coupling constant) and D_μ standing for the gauge covariant derivative

$$D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu \quad (3.35)$$

This derivative transforming covariantly under (3.30-3.31) like

$$D_\mu \rightarrow U D_\mu U^{-1} \quad (3.36)$$

Notice the two following:

- abelian gauge symmetry :

By substituting back into (3.34), we get

$$\begin{aligned} [D_\mu, D_\nu] &= [\partial_\mu, \partial_\nu] + ie (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) + (ie)^2 [A_\mu, A_\nu] \\ &= 0 + ie F_{\mu\nu} + (ie)^2 [A_\mu, A_\nu] \end{aligned} \quad (3.37)$$

In the case of Maxwell theory where A_μ are real commutative fields (\mathbb{C} -numbers), $A_\mu A_\nu = A_\nu A_\mu$, the gauge field commutator in right hand side of above relation vanishes identically

$$[A_\mu, A_\nu] = A_\mu A_\nu - A_\nu A_\mu = 0 \quad (3.38)$$

So the commutator $[D_\mu, D_\nu]$ reduces to $ie (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)$ which is precisely the gauge curvature $ie F_{\mu\nu}$ of the abelian $U_{em}(1)$ gauge symmetry.

- *non abelian gauge symmetries:*

In non abelian gauge theories to considered in section 5, the Yang-Mills gauge fields are no longer \mathbb{C} -numbers; they are valued in a Lie algebra of the gauge symmetry; this means that the vector gauge potential \mathcal{A}_μ is a matrix that can be expanded as

$$\mathcal{A}_\mu = \sum_a T_a \mathcal{A}_\mu^a \quad (3.39)$$

In this case, we have $\mathcal{A}_\mu \mathcal{A}_\nu \neq \mathcal{A}_\nu \mathcal{A}_\mu$; the commutators of the non abelian Yang-Mills gauge potentials are no longer zero; they are proportional to the structure constants $f_{ab}^c = -f_{ba}^c$ of the Lie algebra

$$\begin{aligned} [T_a, T_b] &= f_{ab}^c T_c \\ [\mathcal{A}_\mu, \mathcal{A}_\nu] &= f_{ab}^c \mathcal{A}_\mu^a \mathcal{A}_\nu^b T_c \neq 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

These non zero commutators lead to new kinds of interactions; these are the tri-fields $\mathcal{A}_\mu \mathcal{A}_\nu [\mathcal{A}_\nu \mathcal{A}_\mu]$ and the quartic $[\mathcal{A}_\nu \mathcal{A}_\mu]^2$ vector field self interactions as given by eqs(5.33).

3.3. Lagrangian density

In lagrangian formulation, the Maxwell equations (3.8-3.32) are recovered as Euler-Lagrange field equations following from minimizing the Maxwell field action

$$\mathcal{S}_0 = \int_{\mathbb{M}_4} d^4 x \mathcal{L}_{kin} \quad (3.41)$$

with

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{kin}[A] &= -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ &= -\frac{1}{4}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)(\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu)\end{aligned}$$

In the unit system where the speed of light c and the Planck constant \hbar are set to one i.e: $c = 1 = \hbar$, the Maxwell Lagrangian density \mathcal{L}_{Max} is just the electromagnetic energy density $\frac{\epsilon_0}{2}(\vec{E}^2 + \vec{B}^2)$. A possible mass term for the gauge field

$$\mathcal{L}_{mass} = \frac{1}{2}M_\gamma^2 A_\mu A^\mu \quad (3.43)$$

is forbidden because it violates gauge invariance of \mathcal{L}_{kin} . Therefore gauge symmetry forbids a mass to the photon in agreement with experiments that estimates a mass M bounded by $6 \times 10^{-17} eV \sim 0$. \mathcal{L}_{kin} is the most general gauge invariant and renormalisable expression of the lagrangian density of the electromagnetic field. Using the scaling properties:

objects	:	scaling	
x^μ		L (length)	$\equiv M^{-1}$
$\frac{\partial}{\partial x^\mu}$		L^{-1}	$\equiv M$ (mass)
A_μ		L^{-1}	$\equiv M$
$F^{\mu\nu}$		L^{-2}	$\equiv M^2$
d^4x		L^4	$\equiv M^{-4}$

From these dimensions, it follows that the lagrangian $\mathcal{L}_{kin}[A]$ scales as $(length)^{-4}$; all renormalisable Lagrangian densities $\mathcal{L}[A, \Psi, \Phi, \dots]$ we will encounter below scales as $(Mass)^4$. We end this section by making two comments.

3.4. Photon propagator

First notice that up to a total space time derivative $\partial_\mu [\Lambda^\mu]$, the Maxwell lagrangian density (3.42) can be put into the quadratic form

$$\mathcal{L}_{kin}[A] = \int d^4y \frac{1}{2} A_\mu(x) K^{\mu\nu}(x, y) A_\nu(y) \quad (3.45)$$

with kinetic operator $K^{\mu\nu}(x, y)$ as

$$K^{\mu\nu}(x, y) = (\square g^{\mu\nu} - \partial^\mu \partial^\nu) \delta_4(x - y) \quad (3.46)$$

where the box is the 4-dimensional Laplacian $\square = \partial_\nu \partial^\nu = \partial_0^2 - \vec{\nabla}^2$ and $S(x - y)$ is the dirac delta distribution in 4D space time.

3.4.1 free propagator of photon

To get the propagator of the photon, one has to quantize the Maxwell field $A_\mu(x)$; this can be achieved in different, but equivalent, ways; eg by using canonical quantization or Feynman path integral method. As this kind of propagator is useful later on especially when we consider the phenomenological Fermi model for weak interaction, let comment rapidly comment these 2 methods; for more details see [21]-[23].

In the relativistic covariant canonical quantization, exhibiting manifestly the $SO(1,3)$ Lorentz symmetry of space time, the classical wave function $A_\mu(x)$ with free field equation

$$\square A_\mu - \partial_\mu (\partial^\nu A_\nu) = 0 \quad (3.47)$$

is mapped to a field operator $A_\mu(x)$ acting on Fock space \mathfrak{F} ; it acts by creation and annihilation of particle states: photons. Thinking about $A_\mu(x)$ as given by the following plane wave expansion in the reciprocal space

$$A_\mu(x) = \int_{H_0} \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \left[a_\lambda(k) \varepsilon_\mu^\lambda(k) e^{-ik_\nu x^\nu} + a_\lambda^\dagger(k) \varepsilon_\mu^\lambda(k) e^{ik_\nu x^\nu} \right] \quad (3.48)$$

with $H_0 = \{k_\mu / k^2 = 0\}$, $\varepsilon_\mu^\lambda(k)$ the photon polarization and where the creation and annihilation operators $a_\lambda^\dagger(k)$ and $a_\lambda(k)$ obey the usual canonical commutation relations of free quantum harmonic oscillators

$$\begin{aligned} [a_\lambda(k), a_\sigma^\dagger(q)] &\sim g_{\lambda\sigma} \delta_3(k-q) \\ [a_\lambda(k), a_\sigma(q)] &= 0 \end{aligned} \quad (3.49)$$

they act on the Fock space \mathfrak{F} of particle states with vacuum state $|0\rangle$ annihilated by $a_\lambda(k)$. Particle states $|k_1, \dots, k_n; \lambda_1, \dots, \lambda_n\rangle$ are obtained by acting on $|0\rangle$ by monomials $\prod_{i=1}^n a_{\lambda_i}^\dagger(k_i)$. In this quantization method, the *free photon propagator* of the photon is given by the following vacuum expectation value of the T-product $\langle 0 | T\{A_\mu(x) A_\mu(y)\} | 0 \rangle$; known also as the Feynman-Green 2-point function $G_{\mu\nu}^{(2)}(x, y)$. The computation of *n-point Green functions* $G_{\mu_1 \dots \mu_n}^{(n)}(x_1, \dots, x_n)$ follow by using Wick theorem [G1].

In the path integral method, that turns out to a powerful approach to deal with the quantization of non abelian gauge theories to be considered in section 5, the free propagators of vector gauge fields like the photon propagator, are directly read from the quadratic part of the Lagrangian density up on fixing the gauge symmetry. In the case of Maxwell theory (3.46); the propagator is $G_{\mu\nu}^{(2)}(x, y)$ noting but the inverse of $K^{\mu\nu}$ namely.

$$G_{\mu\nu}^{(2)}(x, y) \sim (K^{\mu\nu})^{-1} \quad (3.50)$$

To deal with the inverse of $K^{\mu\nu}$, it is useful to use the Fourier transform of $G_{\mu\nu}^{(2)}(x, y)$ which gets then mapped to $\tilde{G}_{\mu\nu}^{(2)}(k)$ and takes the following form in the momentum space

$$\tilde{G}_{\mu\nu}^{(photon)}(k) \sim \frac{1}{k^2 + i\varepsilon} \left(g_{\mu\nu} - \frac{(1-\xi)k_\mu k_\nu}{k^2} \right) \quad (3.51)$$

with ξ some parameter that can be set to 1 (Feynman gauge). This propagator scales as $(\text{mass})^2$; in agreement with (3.44).

3.4.2 Charged matter coupled to A_μ

Electrically charged particles interact among themselves through the Maxwell field; that is by exchanging photons. This coupling is generally described by the lagrangian density of quantum electrodynamics (QED) given by

$$\mathcal{L}_{\text{tot}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{int}} \quad (3.52)$$

with interaction term of the form

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -e A_\mu j_{em}^\mu \quad (3.53)$$

and J_{em}^μ the electric current density scaling as $(mass)^3$; it depends on the matter fields and obeys the conservation law $\partial_\mu J_{em}^\mu = 0$. In this case, the equation of motion of the interacting Maxwell field is given by

$$\square A^\mu - \partial^\mu (\partial_\nu A^\nu) = e J_{em}^\mu \quad (3.54)$$

In next section, we explore further the structure of the current J_{em}^μ by describing matter in terms of Dirac fermions. This allows also to get more insight into the $U_{em}(1)$ gauge invariance, that should be thought of as an *internal symmetry* encoding intrinsic properties of matter; in a similar manner with the external Poincaré symmetry encoding geometric properties of space time.

4. Dirac eld and interaction with photon

First, we introduce the Dirac field $\Psi(x)$ describing electrically charged fermionic matter; then we study its interaction with Maxwell field A_μ . A quite similar analysis is valid for electrically charged scalar fields needed when using Higgs mechanism.

4.1. Free Dirac eld

In Dirac theory, elementary massive fermionic particles like the electron e^- and position e^+ (the anti-electron) are described by complex 4- component field $\Psi(x)$ transforming as Dirac spinors under $SO(1, 3)$ space time rotations. As this field plays a basic role in building the SM, let us recall briefly some useful tools on representation theory of the $SO(1, 3)$ Lorentz group.

4.1.1. Leading $SO(1, 3)$ representations

To fix the ideas, recall $SO(1, 3)$ is a non compact Lie group with 6 real parameters; its elements $g = g(\alpha_i, \beta_i)$ with $i = 1, 2, 3$ may be expressed by using rank 2 space time tensors as follows.

$$g = e^{\frac{i}{2}\omega^{[\mu\nu]}, J_{\mu\nu}} \quad (4.1)$$

with $\omega^{[\mu\nu]} = -\omega^{[\nu\mu]}$ standing for the 6 parameters of the group ($\omega^{[0i]} = \alpha^i, \omega^{jk} = B^i \varepsilon^{ijk}$) and the corresponding hermitian $J_{\mu\nu} = -J_{\nu\mu}$ the 6 generators of the Lie algebra of $SO(1, 3)$. These generators satisfy the commutation relations

$$[J_{\mu\nu}, J_{\rho\sigma}] = g_{\mu\rho} J_{\sigma\nu} - g_{\mu\sigma} J_{\rho\nu} + g_{\nu\rho} J_{\sigma\mu} - g_{\nu\sigma} J_{\rho\mu} \quad (4.2)$$

The group $SO(1, 3)$ is an abstract structure which may realized in several manners; its representations, (in some sense explicit solutions for $J_{\mu\nu}$ living in various space dimensions), can be classified by two positive half integer numbers (j_1, j_2) . The leading representations are as collected in the following table

(j_1, j_2)	$so(1, 3)$	relativistic fields	example
$(0, 0)$	scalar repres	scalar field $\phi(x)$	Higgs
$(\frac{1}{2}, 0)$	fundamental spinor	Weyl spinor $\psi_a(x)$	particle
$(0, \frac{1}{2})$	anti-fundamental	conjugate $\bar{\psi}_a(x)$	anti-particle
$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})^V$	vector repres	$A_{a\dot{a}}(x) \sim \sigma_{a\dot{a}}^\mu A_\mu(x)$	Maxwell field
$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})^D$	Dirac spinor	Dirac field $\Psi = (\lambda_a, \bar{\chi}_{\dot{a}})$	electron/positron

(4.3)

with

$$\begin{aligned}\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)_V &= \left(\frac{1}{2}, 0\right) \otimes \left(0, \frac{1}{2}\right) \\ \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)_D &= \left(\frac{1}{2}, 0\right) \oplus \left(0, \frac{1}{2}\right)\end{aligned}\quad (4.4)$$

From this table we learn amongst others:

(i) the complex 2 dimension representations $\left(\frac{1}{2}, 0\right)$ $\left(0, \frac{1}{2}\right)$ are the fundamental representations; the others are built by taking tensor products and direct sums as in (4.4).

(ii) the Clebsh Gordon coefficients σ_{aa}^μ (encoding the group homomorphism between the real $SO(1, 3)$ and the complex $SL(2, C)$ are given by the entries of the matrices σ^μ ; this is a $so(1, 3)$ vector of four hermitian 2×2 matrices ($\sigma^0, \sigma^x, \sigma^y, \sigma^z$) given, in addition to the 2×2 identity $\sigma^0 = I$, by the well known $\vec{\sigma}$ Pauli-matrices

$$\sigma^x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma^y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma^z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

The three σ^i matrices obey the commutation relations of the $SO(3) \simeq SU(2)$ Lie algebra

$$\sigma^i \sigma^j - \sigma^j \sigma^i = [\sigma^i, \sigma^j] = i \varepsilon^{ijk} \sigma^k \quad (4.6)$$

and moreover the remarkable Clifford algebra anticommutation relations

$$\sigma^i \sigma^j + \sigma^j \sigma^i = \{\sigma^i, \sigma^j\} = 2\delta^{ij} \quad (4.7)$$

that capture the spinorial character of the representation.

With these tools at hand, we turn now to describe the dynamics of the Dirac field and its interaction with radiation.

4.1.2 Dirac and Weyl equations

In free field case; i.e in absence of interactions with external fields, the equation of motion of a massive 4-component spinor field $\Psi(x)$ is given by the Dirac equation namely

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi = 0 \quad (4.8)$$

The γ^μ 's are the 4×4 matrices, called Dirac matrices, satisfying the Clifford algebra

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu} \quad (4.9)$$

in a quite similar manner as for (4.6). The commutators of these matrices namely

$$\Sigma^{[\mu\nu]} = \frac{i}{4} [\gamma^\mu, \gamma^\nu] \quad (4.10)$$

is a solution of (4.2) defining the $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)_D$ spinorial representation of $SO(1, 3)$. Notice that the Dirac equation of the free field Ψ may be derived by extremizing the following lagrangian density,

$$\mathcal{L}_{Dirac}[\bar{\Psi}, \Psi] = \bar{\Psi} (i\gamma^\mu a_\mu - m) \Psi \quad (4.11)$$

with $\bar{\Psi}$ standing for the Dirac adjoint given by $\Psi^\dagger \gamma^0$. From this relation, we learn that mass dimension of the Dirac field is $\frac{3}{2}$; i.e scaling as $(mass)^{\frac{3}{2}}$.

This density is invariant under the global change of the field phase;

$$\Psi \rightarrow e^{i\alpha} \Psi \quad (4.12)$$

with $\partial_\mu \alpha = 0$. This is an an abelian $U(1)$ global invariance; is local version will be discussed later. Notice the two following:

(a) *field quantization*

In the canonical quantization, the quantized Dirac field is a field operator that expands, by help of Fourier transform, into a sum of wave planes as

$$\Psi(x) = \int_{H_m} \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \sum_{=1,2} [a_\sigma(k) u(k, \sigma) e^{-ik \cdot x} + b_\sigma^\dagger(k) v(k, \sigma) e^{ik \cdot x}] \quad (4.13)$$

with $k_\mu \in H_m = \{k^2 = m^2\}$ and the coefficients as follows:

- the terms $u(k, \sigma)$ and $v(k, \sigma)$ satisfying

$$\begin{aligned} (\gamma^\mu k_\mu - m) u(k, \sigma) &= 0 \\ (\gamma^\mu k_\mu + m) v(k, \sigma) &= 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

they respectively describe spinor solutions of the Dirac equation, the first with positive energy E . And the second with negative one E .

- the mode operators $a_\sigma^\dagger(k)$, $a_\sigma(k)$ and $b_\sigma^\dagger(k)$, $b_\sigma(k)$ are two kinds of creation and annihilation operators; they are associated with particles and anti-particles. These operators satisfy the anticommutation relations

$$\begin{aligned} \{a_{\sigma'}(\vec{k}), a_\sigma^\dagger(\vec{k})\} &= (2\pi)^3 g_{\sigma\sigma'} \delta_3(\vec{k} - \vec{k}') \\ \{b_{\sigma'}(\vec{k}), b_\sigma^\dagger(\vec{k})\} &= (2\pi)^3 g_{\sigma\sigma'} \delta_3(\vec{k} - \vec{k}') \end{aligned} \quad (4.15)$$

and all others vanishing. For more details see [22]

As for Maxwell field, free propagator $G_{\alpha\beta}(x, y)$ of the Dirac field is given by the Tproduct $\langle T \Psi_\alpha(x) \bar{\Psi}_\beta(y) \rangle$. In path integral method, this propagator is mainly the inverse of the kinetic operator term $(i\gamma_{\alpha\beta}^\mu \partial_\mu - m\delta_{\alpha\beta})$; it reads in reciprocal space as

$$G_{\alpha\beta}^{(DIRAC)}(k) \sim \frac{i(\gamma_{\alpha\beta}^\mu k_\mu + m\delta_{\alpha\beta})}{k^2 - m^2 + i\varepsilon} \quad (4.16)$$

it scales as $(mass)^{-1}$.

b. Chiral spinors and Weyl equations

There are 3 different, but equivalent, ways to represent the γ^μ depending on the desired property to exhibit: (i) Dirac representation with diagonal γ^0 , (ii) Weyl representation with diagonal $\gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$; and (iii) Majorana representation with pure imaginary γ^μ .

In the Weyl representation, these matrices are represented in terms of 2×2 identity matrix I and the 3 Pauli-matrices as follows

$$\gamma^\mu = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^\mu \\ \bar{\sigma}^\mu & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma_5 = \frac{i}{4!} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \gamma^\mu \gamma^\nu \gamma^\rho \gamma^\sigma \quad (4.17)$$

or more explicitly

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ -\vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma_5 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Being diagonal, the extra matrix γ_5 is used to build two matrix projectors $\frac{1}{2}(I \pm \gamma_5)$ allowing to cut the 4-component spinor Ψ into two chiral components: left and right as follows.

$$\begin{aligned} \Psi_L &= \frac{1}{2}(I + \gamma_5) \Psi \equiv \begin{pmatrix} \lambda \\ 0 \end{pmatrix} \\ \Psi_R &= \frac{1}{2}(I - \gamma_5) \Psi \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ \bar{\chi} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Substituting Ψ of eq(4.8) by using its content in terms of Weyl spinors $(\lambda, \bar{\chi})$, we end with two coupled Weyl equations

$$\begin{aligned} i\sigma^\mu \partial_\mu \bar{\chi} + M\lambda &\equiv i\sigma^\mu \partial_\mu \Psi_R + m\Psi_L = 0 \\ i\bar{\sigma}^\mu \partial_\mu \lambda - m\bar{\chi} &\equiv i\bar{\sigma}^\mu \partial_\mu \Psi_L + m\Psi_R = 0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

and Lagrangian density as:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{Weyl-Dirac}} &= i\Psi_R^\dagger \sigma^\mu \partial_\mu \Psi_R + i\Psi_L^\dagger \bar{\sigma}^\mu \partial_\mu \Psi_L + m\Psi_R^\dagger \Psi_L - m\Psi_L^\dagger \Psi_R \\ &= i\chi \sigma^\mu \partial_\mu \bar{\chi} + i\bar{\lambda} \bar{\sigma}^\mu \partial_\mu \lambda + m\chi \lambda - m\bar{\lambda} \bar{\chi} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Observe that for massless particles like neutrinos, i.e $m = 0$, these two chiralities Ψ_R and Ψ_L of the Dirac field decouple and the so Weyl spinors making the Dirac field can be treated separately as 2 free fields.

4.2. $U_{em}(1)$ gauge symmetry and QED

Besides invariance under the $SO(1, 3)$ geometric symmetry, the Lagrangian density (4.11) has an internal $U(1)$ symmetry generated by the change of field phase as follows

$$\Psi \rightarrow e^{i\vartheta} \Psi, \quad \forall \vartheta \in \mathbb{R} \quad (4.22)$$

If thinking about the Dirac field Ψ as describing electrically charged particles with charge $q \times e$, that is q units of e , the gauge coupling constant of electrodynamics; and about as the abelian gauge symmetry as the $U_{em}(1)$ with generator Q_{em} and gauge parameter θ , eq(4.22) translates like

$$\Psi \rightarrow g(\theta) \times \Psi, \quad (4.23)$$

with $g(\theta) = e^{i\theta Q_{em}}$ and

$$[Q_{em}, \Psi] = qe\Psi \quad (4.24)$$

Comparing these relations, we have the following identification $qe \times \theta \equiv \vartheta$.

4.2.1. Local $U(1)$ symmetry

Putting back the above field phase change into the density (4.11), one finds that \mathcal{L}_{Dirac} is only invariant under global change $\partial_\mu \vartheta = 0$; but not under local transformations,

$$\partial_\mu \vartheta \neq 0, \quad \Leftrightarrow \quad \vartheta = \vartheta(x) \text{ an arbitrary function} \quad (4.25)$$

This non invariance is because of the gradient $\partial_\mu \Psi$ which transforms non covariantly

$$i\partial_\mu \Psi \rightarrow e^{i\vartheta} (i\partial_\mu \Psi - \Psi \partial_\mu \vartheta) \quad (4.26)$$

In order to restore the gauge covariance lost in (4.26), one has to modify the usual field gradient $\partial_\mu \Psi$ by the following gauge covariant gradient $D_\mu \Psi$; i.e:

$$\begin{aligned} \partial_\mu \Psi \rightarrow D_\mu \Psi &= (\partial_\mu + iA_\mu Q_{em})\Psi \\ &\equiv (\partial_\mu + iqeA_\mu)\Psi \end{aligned} \quad (4.27)$$

in which the Dirac field Ψ is no longer free since it interacts with A_μ ; and where now the $U(1)$ gauge transformations act covariantly as

$$\begin{aligned} D_\mu \Psi &\rightarrow e^{i\vartheta} D_\mu \Psi \\ A_\mu &\rightarrow e^{-i\vartheta} A_\mu e^{i\vartheta} + e^{-i\vartheta} \partial_\mu e^{i\vartheta} \\ &\rightarrow A_\mu - \frac{1}{qe} \partial_\mu \vartheta \end{aligned} \quad (4.28)$$

This mathematical trick turns out to capture an important property on the way charged fermions interact among themselves through the electromagnetic field.

4.2.2 Interacting Dirac-Maxwell fields

Putting the modification (4.27) back into (4.11), we get precisely the Lagrangian density \mathcal{L}_{QED} describing the interacting dynamics of the Dirac field Ψ (eg: the electron and positron) with electromagnetic field,

$$L_{QED} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\Psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \Psi \quad (4.29)$$

This density \mathcal{L}_{QED} consists of three parts: (i) pure Maxwell term $-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$ describing the lagrangian density of the electromagnetic field A_μ ; it is manifestly invariant under the abelian $U_{em}(1)$ gauge transformations. Because of the abelian property of the gauge symmetry, we have

$$F_{\mu\nu} \rightarrow e^{-i\vartheta} F_{\mu\nu} e^{i\vartheta} = F_{\mu\nu} \quad (4.30)$$

(ii) the free term \mathcal{L}_{Dirac} : this term is as in (4.11) namely $\bar{\Psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi$; and (iii) the interacting lagrangian density given by

$$\mathcal{L}_{int} = -eqA_\mu \bar{\Psi} \gamma^\mu \Psi$$

that reads also as

$$\mathcal{L}_{int} = -eA_\mu J^\mu \equiv -eA_\mu J_{em}^\mu \quad (4.31)$$

with electromagnetic current realized like

$$\begin{aligned} J_{em}^\mu &= q\bar{\Psi} \gamma^\mu \Psi \\ &= q(\Psi_R^\dagger \sigma^\mu \Psi_R + \Psi_L^\dagger \bar{\sigma}^\mu \Psi_L) \end{aligned} \quad (4.32)$$

and the charge e giving the coupling strength of the Dirac field Ψ with the electromagnetic field A_μ . This construction extends straightforwardly to the case of N flavours described by N Dirac fields Ψ_j with electric charges $Q_j = q_j \times e$ and masses m_j ,

$$[Q_{em}, \Psi_j] = q_j e \Psi_j \quad (4.33)$$

The lagrangian density \mathcal{L} of this field system that is invariant under the gauge transformation $\Psi_j \rightarrow e^{ieq_j \theta} \Psi_j$ reads therefore as

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \sum_{j=1}^N [i\bar{\Psi}_j \gamma^\mu (\partial_\mu + iA_\mu Q_{em}) \Psi_j - m_j \bar{\Psi}_j \Psi_j] \quad (4.34)$$

with total electric current given by

$$\begin{aligned} J_{em}^\mu &= \sum_{j=1}^N q_j \bar{\Psi}_j \gamma^\mu \Psi_j \\ &\sum_{j=1}^N q_j (\Psi_{Rj}^\dagger \sigma^\mu \Psi_{Rj} + \Psi_{Lj}^\dagger \bar{\sigma}^\mu \Psi_{Lj}) \end{aligned} \quad (4.35)$$

it is diagonal in flavour space and preserves the left/right symmetry.

5. Extension to non abelian gauge symmetries

Form above formulation of electromagnetic interaction with relativistic charged matter, we learned that gauge invariance of Dirac equation under the abelian $U_{em}(1)$ gauge transformations (4.22-4.28) requires the introduction of a gauge field $A_\mu(x)$; the em 4-vector gauge potential. This done by replacing the derivative operator ∂_μ by the covariant

$$D_\mu = \partial_\mu + iA_\mu Q_{em} \quad (5.1)$$

Thus a purely geometrical requirement leads to the electromagnetic interaction between the charged Dirac particles.

In this section, we extend the $U_{em}(1)$ gauge theory considered above to the general case of non abelian gauge symmetries by focussing on the particular subset of Yang-Mills theory with typical gauge symmetries as

$$U(N) = SU(N) \times U(1), \quad N > 1 \quad (5.2)$$

We first study the main lines of the simple, compact and unitary $SU(N)$ gauge symmetry theory. After that we illustrate the construction on the particular example of non abelian $U(2)$ YM theory coupled to matter chosen as in the first family of table (2.4).

5.1. Classical $SU(N)$ gauge theory

A simple version of a Yang-Mills (YM) theory with an $SU(N)$ gauge theory involves a set space time fields of two kinds:

- N complex *massless* Dirac fields

$$\Psi_{\alpha i}(x) \equiv \Psi_{\alpha i} \quad (5.3)$$

with α the spinor index, which for simplicity we drop out now on. The index i runs from 1 to N ; it will be interpreted in terms of the fundamental representation of an internal $SU(N)$ symmetry¹ of the toy gauge model.

- $N^2 - 1$ YM gauge fields

$$\mathcal{A}_\mu^a, \quad a = 1, \dots, \dim SU(N) \quad (5.4)$$

mediating the interactions between the N Dirac fields Ψ_i . The index μ is the space time vector index as in previous section; and the index a runs from 1 to the dimension of $SU(N)$ namely $N^2 - 1$.

To write down the gauge invariant lagrangian density $\mathcal{L}_{su_N} = \mathcal{L}_{su_N}[\Psi, \mathcal{A}]$ of this non abelian Yang-Mills theory, we consider first the free field Dirac theory invariant under the global $SU(N)$ symmetry. Then introduce gauge interactions by using the trick of covariantizing the space time derivative ∂_μ as in (4.27); but now for the $SU(N)$ gauge symmetry.

5.1.1 Free elds theory and global $SU(N)$ invariance

Denote the N massless complex Dirac fields as

$$\Psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

where index α is dropped out. Being massless fermionic free fields, the lagrangian density is given by the sum of the Dirac densities (4.11); we have:

$$\mathcal{L}_{Dirac} = \sum_{l=1}^N \bar{\psi}^l i \gamma^\mu \partial_\mu \psi_l \equiv \bar{\Psi} i \gamma^\mu \partial_\mu \Psi \quad (5.6)$$

where, in the second equality, we have dropped out the summation.

1- this field model has an $U(N) = U(1) \times SU(N)$ symmetry; but here, we focus on the $SU(N)$ factor.

SU(N) transformations

To exhibit the $SU(N)$ symmetry of this field model, assume that the complex vector (5.5) transforms in the fundamental representation of the $SU(N)$ symmetry group. This means

$$\Psi \rightarrow U\Psi \quad \Leftrightarrow \quad \psi_l \rightarrow \psi'_l = \sum_{k=1}^N U_l^k \psi_k \quad (5.7)$$

In this linear transformation, the complex matrix operator U is a $N \times N$ unitary matrix satisfying

$$U^\dagger U = I, \quad \det U = 1 \quad (5.8)$$

with $U^\dagger = U^{*t} = U^{-1}$. Explicitly, U can be written in terms of a set of $(N^2 - 1)$ real parameters ω_a , called the group parameters, as follows

$$U = e^{i\omega} = e^{i\omega_a T^a}, \quad \text{Tr}(\omega) = 0, \quad \omega^\dagger = \omega \quad (5.9)$$

with

$$\omega = \sum_{a=1}^{N^2-1} \omega_a T^a, \quad \text{Tr}(T^a) = 0, \quad (T^a)^\dagger = T^a \quad (5.10)$$

where the $N \times N$ matrices T^a are the generators of the symmetry. Being a non abelian group, these generators obey the following non vanishing commutation relations

$$[T^a, T^b] = i \sum_{c=1}^{\dim G} f_c^{ab} T^c, \quad \text{Tr}(T^a T^b) = \frac{1}{2} \delta^{ab} \quad (5.11)$$

with $f_c^{ab} = if_c^{[abc]}$ the structure constants of $SU(N)$. A more convenient basis to expand the matrix ω is to use the Cartan-Weyl basis (h_i, E_β^\pm) of the Lie algebra of the $SU(N)$ symmetry

$$\omega = \sum_{i=1}^{N-1} \omega_i h_i + \sum_{\text{positive roots}} (\omega_\beta^+ E_\beta^- + \omega_\beta^- E_\beta^+) \quad (5.12)$$

where the $(N-1)$ hermitian matrices h_i are commuting diagonal $N \times N$ matrices, generating Cartan subalgebra, and E_β^\pm are step operators; this basis is adequate for physical interpretation. For the leading $N=2$ case; that is for the non abelian $SU(2)$ symmetry having 3 dimensions and rank one ($\dim SU_2 = 3$, $\text{rank } SU_2 = 1$), the expansion of the hermitian 2×2 matrix ω that corresponds to eq(5.10) read as follows

$$\omega = \omega_x T^x + \omega_y T^y + \omega_z T^z \quad (5.13)$$

where the hermitian T^i are 3 generators of $SU(2)$; which acts in different manners depending on the $SU(2)$ field representations. In the $\frac{1}{2}$ representation, $T^i = \frac{\tau^i}{2}$ with the 2×2 matrices τ^i precisely the usual 3 Pauli matrices given by eq(4.5); the squares of these matrices is equal to identity as in eq(4.7). The second expansion using Cartan-Weyl basis, corresponding to eq(5.12), is given by

$$\omega = \omega^0 T^0 + \omega^- T^+ + \omega^+ T^- \quad (5.14)$$

with T^z a diagonal matrix. For the example of $\frac{1}{2}$ representation, we have $T^{\pm,3} = \frac{\tau^{\pm,3}}{2}$ with the step operators $\tau^{\pm} = \frac{1}{2}(\tau^x \pm i\tau^y)$ as

$$\tau^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \tau^+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

$SU(N)$ symmetry

Under the $SU(N)$ transformations of the Dirac fields given by (5.7), the free Dirac lagrangian density (5.6) transforms as

$$\mathcal{L}_{Dirac} \rightarrow \mathcal{L}'_{Dirac} = \mathcal{L}_{Dirac} + \bar{\Psi} i \gamma^\mu (U + \partial_\mu U) \Psi \quad (5.16)$$

with

$$\partial_\mu U = i (\partial_\mu \omega) U \quad (5.17)$$

Invariance of \mathcal{L}_{Dirac} under (5.7) requires therefore

$$\partial_\mu \omega = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \partial_\mu \omega_a = 0, \quad \forall a \quad (5.18)$$

This means that the group parameters ω_a have to be independent of space time coordinates.

5.1.2 Dirac matter coupled to YM elds

To have gauge invariance with $\partial_\mu \omega_a \neq 0$ that is $\omega_a = \omega_a(x)$, an arbitrary real function of x , we have to introduce non abelian gauge fields through the covariantization of the space time derivative ∂_μ in eq(5.6) as follows

$$\begin{aligned} \partial_\mu \Psi &\rightarrow \mathcal{D}_\mu \Psi &= (\partial_\mu + ig \mathcal{A}_\mu) \Psi \\ &\Updownarrow & \\ \partial_\mu \psi_l &\rightarrow \sum_{k=1}^N (\mathcal{D}_\mu)_l^k \psi_k &= \sum_{k=1}^N \left(\delta_l^k \partial_\mu + ig (A_\mu)_l^k \right) \psi_k \end{aligned} \quad (5.19)$$

where \mathcal{A}_μ is the $SU(N)$ Yang-Mills gauge field and the real number g the gauge coupling constant that should be compared with the electric charge e of the electromagnetic interaction based on the $U_{em}(1)$ gauge symmetry.

Contrary to the Maxwell gauge field, the $SU(N)$ gauge field \mathcal{A}_μ is now given by a hermitian $N \times N$ field matrix valued in the Lie algebra of the $SU(N)$ gauge symmetry and so expands as follows

$$\mathcal{A}_\mu(x) = \sum_{a=1}^{N^2-1} \mathcal{A}_\mu^a(x) T_a, \quad \mathcal{A}_\mu^a = 2Tr(T^a \mathcal{A}_\mu) \quad (5.20)$$

In the Cartan-Weyl basis (5.12), the above expansion translates like

$$A_\mu = \sum_{i=1}^{N-1} A_\mu^i h_i + \sum_{\text{positive roots}} \left(A_\mu^{+\beta} E_\beta^- + A_\mu^{-\beta} E_\beta^+ \right) \quad (5.21)$$

The gauge transformation of the YM field A_μ can be easily read from the transformation of the gauge covariant derivative of the Dirac field which has to transform in a same manner as the field; that is:

$$\begin{aligned} \Psi &\rightarrow U\Psi &= e^{i\omega}\Psi \\ \mathcal{D}_\mu \Psi &\rightarrow U(\mathcal{D}_\mu \Psi) &= e^{i\omega} \mathcal{D}_\mu \Psi \end{aligned} \quad (5.22)$$

From this transformation, we deduce

$$\mathcal{D}_\mu \rightarrow U \mathcal{D}_\mu U^\dagger = e^{i\omega} \mathcal{D}_\mu e^{-i\omega} \quad (5.23)$$

with $\omega(x) = T^a \omega_a(x)$; and then the gauge transformation of the YM gauge field namely

$$A_\mu \rightarrow U A_\mu U^\dagger + \frac{i}{g} U \partial_\mu U^\dagger \quad (5.24)$$

Mimicking the formulation of Maxwell theory, the analogue of the electromagnetic field tensor $F_{\mu\nu}^{em}$ is given by the Yang-Mills field strength $G_{\mu\nu}$ related to the covariant derivatives as follows

$$[\mathcal{D}_\mu, \mathcal{D}_\nu] = ig \mathcal{G}_{\mu\nu} \quad (5.25)$$

Replacing \mathcal{D}_μ by its expression given by (5.19), $\mathcal{G}_{\mu\nu}$ reads also like

$$\mathcal{G}_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + ig [A_\mu, A_\nu] \quad (5.26)$$

Moreover, substituting the YM fields by their expansion (5.20) and using $[T_a, T_b] = if_{abc} T_c$ (5.11), we also have $\mathcal{G}_{\mu\nu} = \mathcal{G}_{\mu\nu}^a T_a$

$$\mathcal{G}_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \quad (5.27)$$

Furthermore, we learn from eqs(5.23-5.25) that the gauge transformation of the field strength is given by

$$\mathcal{G}_{\mu\nu} \rightarrow U \mathcal{G}_{\mu\nu} U^\dagger \quad (5.28)$$

This change shows: (i) the field strength $\mathcal{G}_{\mu\nu}$ is a gauge covariant field contrary to the gauge field A_μ . (ii) the space time scalar

$$-\frac{1}{2} \text{Tr}(\mathcal{G}_{\mu\nu} \mathcal{G}^{\mu\nu}) = -\frac{1}{4} \mathcal{G}_{\mu\nu}^a \mathcal{G}^{a\mu\nu} \quad (5.29)$$

is a gauge invariant quantity that can be compared with $-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$ in Maxwell theory; it is nothing but the lagrangian density of the YM field.

Therefore, the total gauge invariant lagrangian density \mathcal{L}_{YM} of N massless Dirac fields in the fundamental representation of $SU(N)$ is given by

$$L_{YM}^{(SU_N)} = -\frac{1}{4} \left(\sum_{a=1}^{\dim SU_N} \mathcal{G}_{\mu\nu}^a \mathcal{G}^{a\mu\nu} \right) + i \bar{\Psi} \gamma^\mu (\partial_\mu + ig \partial_\mu) \Psi \quad (5.30)$$

5.1.3 Comments on \mathcal{L}_{YM}

Here we give some useful properties on the lagrangian density \mathcal{L}_{YM} describing the dynamics of N massless Dirac fields coupled to the $SU(N)$ YM fields. A careful exploration of (5.30) shows the following:

(i) *mass terms forbidden by symmetry*

the term $-\frac{1}{2}\text{Tr}(\mathcal{G}_{\mu\nu}\mathcal{G}^{\mu\nu})$ describes the energy density of the $SU(N)$ YM gauge field. Since this term has no quadratic mass term

$$m_A \text{Tr} \mathcal{A}_\mu \mathcal{A}^\mu = \frac{m_A}{2} \sum_{a=1}^{N^2-1} (\mathcal{A}_\mu^a \mathcal{A}^\mu{}^a) \quad (5.31)$$

as it is forbidden by gauge invariance, the non abelian YM field describe therefore $(N^2 - 1)$ massless particles $m_A = 0$ with interacting features governed by the quantum version of (5.30).

(ii) *cubic and quartic interactions*

from eqs(5.26-5.27), we learn as well that $\mathcal{G}_{\mu\nu}$ is quadratic in the YM field matrix \mathcal{A}_μ ; so the pure YM density $\frac{1}{2}\text{Tr}(\mathcal{G}_{\mu\nu}\mathcal{G}^{\mu\nu})$ involves, in addition to the usual quadratic kinetic term

$$-\frac{1}{2}\text{Tr}[(\partial_\mu \mathcal{A}_\nu - \partial_\nu \mathcal{A}_\mu)^2] \quad (5.32)$$

the following typical tri-linear and quartic terms that have no analogue in the Maxwell theory due to the property (3.38),

$$\begin{aligned} \text{tri-linear} & : g \text{Tr} \partial^\mu \mathcal{A}^\nu [\mathcal{A}_\mu, \mathcal{A}_\nu] \\ \text{quartic} & : g^2 \text{Tr} [\mathcal{A}_\mu, \mathcal{A}_\nu]^2 \end{aligned} \quad (5.33)$$

with $\mathcal{A}_\mu = T^a \mathcal{A}_\mu^a$. These terms are non trivial since

$$[\mathcal{A}_\mu, \mathcal{A}_\nu] = if_{abc} \mathcal{A}_\mu^a \mathcal{A}_\nu^b T^c \neq 0 \quad (5.34)$$

In perturbative quantum field theory (region of small coupling constant g), these terms are treated as perturbative gauge field interactions. This shows that pure non YM gauge has a non trivial quantum field theory compared to the pure Maxwell field which is a trivial quantum field theory seen that

$$[\mathcal{A}_\mu^{em}, \mathcal{A}_\nu^{em}] = \mathcal{A}_\mu \mathcal{A}_\nu [Q^{em}, Q^{em}] = 0 \quad (5.35)$$

(iii) *gauge coupling constant unification*

Being a simple Lie group, the $SU(N)$ gauge symmetry of (5.30) involves one gauge coupling constant g . Therefore and as shown on eq(5.19), the $N^2 - 1$ YM gauge fields

\mathcal{A}_μ^a couple to the N Dirac fields Ψ_i with the same coupling constant g .

This means that for a non simple gauge symmetry group G such as the group product $G = G_1 \times G_2$ with G_i simple, one has 2 unrelated gauge coupling constants g_1 and g_2 . In the interesting example where

$$G = SU_L(2) \times U_Y(1) \quad (5.36)$$

giving the gauge symmetry of the standard model of the electroweak interaction, we have 2 coupling constants g and g' that constitute 2 of the 17 free parameters of the SM.

(iv) *extension to $U(N)$ YM theory*

In the semi-simple $U(N) = SU(N) \times U(1)$ gauge theory with gauge coupling constants g and g' , there are N^2 YM gauge fields given by the previous $\mathcal{A}_\mu^a(x)$ and an extra abelian type one B_μ . The above gauge covariant derivatives extends as

$$\mathcal{D}_\mu \Psi = (\partial_\mu + ig\mathcal{A}_\mu + ig'B_\mu) \Psi \quad (5.37)$$

where,

$$\begin{aligned} A_\mu(x) &= \sum_{a=1}^{N^2-1} A_\mu^a(x) T_a \\ B_\mu(x) &= B_\mu^0(x) Y \end{aligned} \quad (5.38)$$

and where the generators T_a as above and Y the generator of the extra orthogonal $U(1)$ factor. The total gauge invariant lagrangian density reads therefore like

$$\begin{aligned} L_{YM}^{(u_N)} &= -\frac{1}{4} \left(\sum_{a=1}^{\dim su_N} \mathcal{G}_{\mu\nu}^a \mathcal{G}^{a\mu\nu} \right) - \frac{1}{4} \mathcal{B}_{\mu\nu} \mathcal{B}^{\mu\nu} \\ &+ i\bar{\Psi} \gamma^\mu (\partial_\mu + ig\mathcal{A}_\mu + ig'B_\mu) \Psi \end{aligned} \quad (5.39)$$

$$\mathcal{B}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathcal{B}_\nu^0 - \partial_\nu \mathcal{B}_\mu^0 \quad (5.40)$$

(v) *Conserved YM currents*

From the density $L_{YM}^{(u_N)}$, we learn that the interaction between the Dirac fields Ψ and the YM vector potentials \mathcal{A}_μ^a and B_μ are given by

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -g \left(\sum_{a=1}^{N^2-1} \mathcal{A}_\mu^a J_a^\mu \right) - g' B_\mu \tilde{J}^\mu \quad (5.41)$$

with conserved currents as

$$\begin{aligned} J_a^\mu &= \bar{\Psi} \gamma^\mu T_a \Psi \\ \tilde{J}^\mu &= \bar{\Psi} \gamma^\mu Y \Psi \end{aligned} \quad (5.42)$$

5.2. A non abelian toy model

Here we illustrate the above construction on the simple $SU_{YM}(2)$ case; but by considering matter fields in different representations of $SU_{YM}(2)$; for example as in the first family of table (2.4) where the left and right handed leptons

$$e_L^-, e_R^-, \nu_{eL}, \nu_{eR} \quad (5.43)$$

and the left and right handed quarks

$$u_L, u_R, d_L, d_R \quad (5.44)$$

appear in different $SU_{YM}(2)$ representations.

To that purpose, it is interesting to begin this study by recalling briefly some aspects on relativistic fermions; these features are useful later when engineering of the SM of electroweak interactions.

5.2.1 Chiral fermions

In the relativistic 4D space-time Dirac theory, each of the particles of the first family of table (2.4) is associated with a 4-component spinor field Ψ that we denote respectively like

$$\Psi_{e^-}, \Psi_{\nu_e}, \Psi_\mu, \Psi_d \quad (5.45)$$

with Ψ_{e^-} to describe the electron, Ψ_{ν_e} for neutrino and so on. Moreover, since in 4D space time, a Dirac spinor Ψ has two chiralities, a left handed spinor $\Psi_L = \frac{1}{2}(I + \gamma_5)\Psi$ and a right handed one $\Psi_R = \frac{1}{2}(I - \gamma_5)\Psi$, we distinguish therefore the following kinds of particle states

particle states	Left-handed	Left-handed	electric charge
electron	e_L^-	e_R^-	-1
neutrino	ν_{eL}	$\nu_{eR} ?$	0
up quark	u_L	u_R	$\frac{2}{3}$
down quark	d_L	d_R	$-\frac{1}{3}$

(5.46)

with

$$e^- = \frac{1}{2}(I + \gamma_5)e^- \quad , \quad e_R^- = \frac{1}{2}(I - \gamma_5)e^- \quad (5.47)$$

and so on. Notice that along with the Dirac fields (5.45), we have as well the conjugate fields having opposite electric charges

$$\bar{\Psi}_{e^-}, \bar{\Psi}_{\nu_e}, \bar{\Psi}_\mu, \bar{\Psi}_d \quad (5.48)$$

Notice also as there is no strong evidence yet for the existence of right handed neutrinos such as ν_{eR} , we will drop out this field state from now on; and keep only ν_{eL} . This feature violates the left/right symmetry we have used until now; for example:

$$\begin{aligned} e_L^- &\leftrightarrow e_R^- \\ \nu_{eL} &\leftrightarrow ? \end{aligned} \quad (5.49)$$

5.2.2 Field content of the model

In the $SU(2)$ YM theory, the gauge field W_μ expands

$$\begin{aligned} W_\mu &= T^1 W_\mu^1 + T^2 W_\mu^2 + T^3 W_\mu^3 \\ &= T^- W_\mu^+ + T^+ W_\mu^- + T^3 W_\mu^3 \end{aligned} \quad (5.50)$$

In the spinor representation, the \vec{T} – generators are given by half the Pauli matrices $\frac{\vec{\tau}}{2}$; which up on substituting we get

$$W_\mu = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} W_\mu^3 & W_\mu^1 - iW_\mu^2 \\ W_\mu^1 + iW_\mu^2 & -W_\mu^3 \end{pmatrix} \quad (5.51)$$

In the Cartan-Weyl basis (τ^+, τ^-, τ^3) of the $\mathfrak{su}(2)$ Lie algebra given by the realization (5.15), we then have

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \tau^+ W_\mu^- + \frac{1}{\sqrt{2}} \tau^- W_\mu^+ + \frac{1}{2} \tau^3 W_\mu^3 \quad (5.52)$$

Thus the fields content of this model is given by:

- *matter fields*

they are taken into kinds of $SU(2)$ representation as follows

fermion fields	:	$SU_{YM}(2)$ representation	
(ν_L, e_L^-)		$j = \frac{1}{2}$	
e_R^-		$j = 0$	
(u_L, d_L)		$j = \frac{1}{2}$	(5.53)
u_R		$j = 0$	
d_R		$j = 0$	

This field spectrum breaks the space time chirality of the Dirac fields since left handed and right handed components are assigned into different representations of the gauge symmetry.

- *gauge fields*

gauge vector fields	:	$SU_{YM}(2)$ representation	
$(W_\mu^-, W_\mu^0, W_\mu^+)$		$j = 1$	(5.54)

with

$$W_\mu^\pm = \frac{\sqrt{2}}{2} (W_\mu^1 \pm iW_\mu^2) \quad (5.55)$$

5.3. Lagrangian density

Denoting the left handed lepton and the left handed quark doublets as follows

$$\begin{aligned}\Psi_L &= \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2}(I + \gamma_5) \begin{pmatrix} \nu \\ e^- \end{pmatrix} \\ Q_L &= \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} = \frac{1}{2}(I + \gamma_5) \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (5.56)$$

the lagrangian density \mathcal{L}_{su_2} of the non abelian gauge theory reads as

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{su_2} &= -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^1 W^{1\mu\nu} - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^2 W^{2\mu\nu} - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^3 W^{3\mu\nu} \\ &+ i\bar{\Psi}_L \gamma^\mu (\partial_\mu + igW_\mu) \Psi_L + i\bar{e}_R \gamma^\mu \partial_\mu e_R + \\ &+ i\bar{Q}_L \gamma^\mu (\partial_\mu + igW_\mu) Q_L + i\bar{u}_R \gamma^\mu \partial_\mu u_R + i\bar{d}_R \gamma^\mu \partial_\mu d_R\end{aligned}\quad (5.57)$$

with W_μ as in eq(5.52) and where g is the $SU_{YM}(2)$ gauge coupling constant. From the interacting lagrangian density,

$$\mathcal{L}_{int} = -g(W_\mu^3 J^{3\mu} + W_\mu^- J^{+\mu} + W_\mu^+ J^{-\mu}) \quad (5.58)$$

we learn the 3 conserved $SU(2)$ currents

$$\begin{aligned}J_\mu^\pm &= \frac{\sqrt{2}}{2}\bar{\Psi}_L \gamma^\mu \tau^\pm \Psi_L + \frac{\sqrt{2}}{2}\bar{Q}_L \gamma^\mu \tau^\pm Q_L \\ J_\mu^3 &= \frac{1}{2}\bar{\Psi}_L \gamma^\mu \tau^3 \Psi_L + \frac{1}{2}\bar{Q}_L \gamma^\mu \tau^3 Q_L\end{aligned}\quad (5.59)$$

with no right handed contribution. Seen that Dirac fields have mass dimension $\frac{3}{2}$, these currents scale as $(mass)^3$.

We end this section by giving results for the case of $U(2) = SU(2) \times U_Y(1)$ gauge symmetry. The above lagrangian density extends like

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{u_2} &= -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^1 W^{1\mu\nu} - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^2 W^{2\mu\nu} + \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^3 W^{3\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\ &+ i\bar{\Psi}_L \gamma^\mu (\partial_\mu + igW_\mu + ig'B_\mu) \Psi_L + i\bar{e}_R \gamma^\mu (\partial_\mu + ig'B_\mu) e_R + \\ &+ i\bar{Q}_L \gamma^\mu (\partial_\mu + igW_\mu + ig'B_\mu) Q_L + \\ &+ i\bar{u}_R \gamma^\mu (\partial_\mu + ig'B_\mu) u_R + i\bar{d}_R \gamma^\mu (\partial_\mu + ig'B_\mu) d_R\end{aligned}\quad (5.60)$$

where we have assumed that all fermions ψ_i involved here carry a quantum charge under the extra $U_Y(1)$ abelian gauge factor; i.e: $[Y, \psi_i] = y_i \psi_i$.

6. Spontaneous symmetry breaking

In quantum field theory, the continuous symmetries may be:

- exact symmetries like for the U_{em} (1) of electromagnetic interaction and the SU_c (3) "colour" symmetry of strong interactions; or
- spontaneously broken symmetries as in the case of standard model of electroweak interactions and in grand unified theories.

In this section, we describe the idea of spontaneous symmetry breaking by first illustrating it on the case of an abelian gauge theory. Then, we extend the idea to non abelian YM theories.

6.1. Abelian case

First we study the spontaneously breaking of the global U (1) invariance; then consider the local space time version.

6.1.1. Complex scalar field

Consider a charged particle described by a space time complex scalar field $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha + i\beta)$ described by the classical lagrangian density

$$\begin{aligned} L &= \partial^\mu \phi \partial_\mu \bar{\phi} - \mu^2 \phi \bar{\phi} - \lambda (\phi \bar{\phi})^2 \\ &= \frac{1}{2} (\partial_\mu \alpha) (\partial^\mu \alpha) + \frac{1}{2} (\partial_\mu \beta) (\partial^\mu \beta) \\ &\quad - \frac{M^2}{2} (\alpha^2 + \beta^2) - \frac{\lambda}{4} (\alpha^2 + \beta^2)^2 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Because of The real coupling constant λ is chosen positive ($\lambda > 0$); while the real parameter M^2 can take an arbitrary sign; that is positive or negative. The equations of motion of the fields ϕ and $\bar{\phi}$ are

$$\begin{aligned} \left[\partial_\mu \partial^\mu - \mu^2 - 2\lambda (\phi \bar{\phi}) \right] \phi &= 0 \\ \left[\partial_\mu \partial^\mu - \mu^2 - 2\lambda (\phi \bar{\phi}) \right] \bar{\phi} &= 0 \end{aligned} \quad (6.2)$$

The density \mathcal{L} and the equations of motion are invariant under the following global abelian U (1) symmetry changing the phase of the scalar field as

$$\phi \rightarrow e^{i\vartheta} \phi, \quad \partial_\mu \vartheta = 0 \quad (6.3)$$

To this one parameter symmetry group corresponds the current

$$\begin{aligned} J^\mu &\sim (\bar{\phi} \partial^\mu \phi - \phi \partial^\mu \bar{\phi}) \\ &\sim i(\alpha \partial^\mu \beta - \beta \partial^\mu \alpha) \end{aligned} \quad (6.4)$$

whose conservation law $\partial_\mu J^\mu = 0$ follows from (6.2). Using Legendre transformation, we get the following Hamiltonian density

$$\mathcal{H} = |\partial_0 \phi|^2 + |\bar{\nabla} \phi|^2 + V(\phi, \bar{\phi}) \quad (6.5)$$

with

$$\begin{aligned} V(\phi, \bar{\phi}) &= \mu^2 \phi \bar{\phi} + \lambda (\phi \bar{\phi})^2 \\ &= \frac{\mu^2}{2} (\alpha^2 + \beta^2) + \frac{\lambda}{4} (\alpha^2 + \beta^2)^2 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Classical field configurations that minimize the energy density of this system are given by the following ground state

$$\begin{aligned} \langle \phi \rangle &= \text{constant} \\ V(\langle \phi \rangle) &\text{minimum} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Seen that $\partial_\mu \langle \phi \rangle = 0$ kills the kinetic terms, it remains to determine the minimum of the scalar field potential. Since $\lambda > 0$, the non trivial ($\langle \phi \rangle \neq 0$) minimum of $V(\phi)$ is

$$\frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = [\mu^2 + 2\lambda(\phi \bar{\phi})] \bar{\phi} \quad (6.8)$$

and therefore we are left with two situations:

- case $\mu^2 > 0$, there is one minimum of $V(\phi)$ located at $\langle \phi \rangle = 0$,
- case $\mu^2 < 0$, there are infinitely many minima forming a circle of radius

$$|\langle \phi \rangle|^2 = -\frac{\mu^2}{2\lambda} \equiv \frac{v^2}{2} \quad (6.9)$$

in the plane ($\text{Re } \phi, \text{Im } \phi$).

Goldstone theorem

By choosing a particular point on the circle, the $U(1)$ symmetry of the vacuum breaks spontaneously down. According to the sign of μ^2 , we have:

$$\begin{array}{llll} \text{sign of } \mu^2 & : & \mu^2 > 0 & \mu^2 = 0 & \mu^2 < 0 \\ \text{phases} & : & \text{symmetric solution} & \text{critical point} & \text{spontaneously broken} \end{array} \quad (6.10)$$

In spontaneous broken gauge symmetry phase, the parameter μ^2 is negative and the field ϕ is thought of as given by

$$\phi = \langle \phi \rangle + \frac{\sqrt{2}}{2} (\xi + i\chi) \quad (6.11)$$

with ξ and χ describing field fluctuations around the vacuum $\langle \phi \rangle$ that we choose on the real axis as

$$\langle \phi \rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} v \Leftrightarrow \begin{cases} \langle \text{Re } \phi \rangle \neq 0 \\ \langle \text{Im } \phi \rangle = 0 \end{cases} \quad (6.12)$$

The above choice of vacuum breaks the symmetry spontaneously; expanding the potential $V(\xi, \chi)$ around this vacuum, we get $\mathcal{L}'[\xi, \chi] = \mathcal{L}'_0 + \mathcal{L}'_{int}$ with

$$\begin{aligned}\mathcal{L}'_0[\xi, \chi] &= +\frac{1}{2}(\partial_\mu \xi)(\partial^\mu \xi) + \frac{1}{2}(\partial_\mu \chi)(\partial^\mu \chi) - \frac{1}{2}(2\lambda v^2)\xi^2 \\ \mathcal{L}'_{int}[\xi, \chi] &= -\lambda v(\xi^3 + \xi\chi^2) - \frac{\lambda}{4}(\xi^2 + \chi^2)^2\end{aligned}\quad (6.13)$$

The quadratic part \mathcal{L}'_0 is thought of as the unperturbed part containing a mass term for ξ but no mass term for χ ; the interacting part \mathcal{L}'_{int} has, in addition to $\frac{\lambda}{4}(\xi^2 + \chi^2)^2$, a trilinear interaction with coupling constant λv .

The lagrangian $\mathcal{L}[\phi, \bar{\phi}]$ and $\mathcal{L}'[\xi, \chi]$ are equivalent as they describe the same degrees of freedom; both of them have two free parameters, μ, λ for \mathcal{L} ; and v, λ for \mathcal{L}' . However, from the perturbative field theory view, it is the lagrangian density $\mathcal{L}'[\xi, \chi]$ that allows a physical interpretation of the spectrum. It describes two interacting field particles; one massive and the other massless

$$m_\xi^2 = (2\lambda v^2), \quad m_\chi^2 = 0 \quad (6.14)$$

The appearance of the zero-mass particle χ in the quantum model is an example of a general theorem due to J. Goldstone [20] which can be stated as:

To every generator of a spontaneously broken symmetry, there corresponds a massless particle, called the Goldstone particle.

The field particle ξ , the "Higgs" particle, describes fluctuations around the non trivial vacuum direction $\langle \phi \rangle \neq 0$. In the spontaneous breaking phase of the local $U(1)$ gauge symmetry considered below, the Goldstone field χ is eaten by the gauge field; and as a consequence, becomes a massive vector particle.

6.1.2. Coupling the complex scalar to Maxwell eld

Promoting the global phase symmetry (6.3) to a local one by allowing the group parameter to depend on the space time coordinates $\vartheta = \vartheta(x)$, the gradient $\partial_\mu \vartheta$ is no longer trivial; and, to recover gauge invariance, one is lead to consider an interacting system consisting of the previous complex scalar $\phi(x)$ and the Maxwell field $A_\mu(x)$. The gauge invariant lagrangian describing this system reads as

$$\mathcal{L}[\phi, \bar{\phi}, A_\mu] = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + (D_\mu \phi)(\overline{D^\mu \phi}) - \mu^2 \phi \bar{\phi} - \lambda(\phi \bar{\phi})^2 \quad (6.15)$$

with

$$D_\mu \phi = (\partial_\mu + ieA_\mu) \phi \quad (6.16)$$

and gauge identifications as

$$\begin{aligned}\phi &\rightarrow e^{i\vartheta} \phi \\ A_\mu &\rightarrow A_\mu - \frac{1}{e} \partial_\mu \vartheta\end{aligned}\quad (6.17)$$

The spontaneously breaking of the local abelian symmetry of (6.15) can be achieved as in the global case; but here we will proceed directly by making the following particular choice for the fields ϕ and A_μ

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\sqrt{2}}{2} \left(v + p e^{i\frac{\zeta}{v}} \right) \\ A_\mu &= B_\mu - \frac{1}{e v} \partial_\mu \zeta\end{aligned}\quad (6.18)$$

with $\langle \phi \rangle = \langle \text{Re } \phi \rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} v$ and where we have identified the gauge parameter ϑ with the phase $\frac{\zeta}{v}$ of the scalar field ϕ . Substituting this choice back into (6.15), we obtain

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[\rho, B_\mu] &= -\frac{1}{4} (\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu)^2 - \frac{e^2 v^2}{2} B_\mu B^\mu \\ &\quad + \frac{1}{2} (\partial_\mu \rho) (\partial^\mu \rho) - \frac{1}{2} (2\lambda v^2) \rho^2 - \frac{\lambda}{4} \rho^4 \\ &\quad + e^2 v \rho B_\mu B^\mu + \frac{e^2}{2} \rho^2 B_\mu B^\mu\end{aligned}\quad (6.19)$$

In this expression, the field $\zeta(x)$ has completely disappeared, the gauge arbitrariness fixed and the gauge field B_μ acquired a mass term.

The lagrangian density $\mathcal{L}'[\rho, B_\mu]$ describes two massive particles: a vector particle B_μ and a real scalar ρ with respective masses as

$$\begin{aligned}m_{B_\mu}^2 &= e^2 v^2 \\ m_\rho^2 &= 2\lambda v^2\end{aligned}\quad (6.20)$$

Higgs mechanism

In a spontaneously broken local U(1) gauge symmetry, the gauge vector boson B_μ mediating the interaction acquires a mass and the massless Goldstone ζ decouple and disappear [18, 19]. The massive vector particle B_μ has therefore 3 degrees of freedom; the distribution of the degrees of freedom before and after breaking is as collected in the following table

symmetric phase		spontaneously broken		(6.21)
fields	dof	fields	dof	
ϕ	2	ρ	1	
A_μ	2	B_μ	3	
total	$2 + 2 = 4$	total	$1 + 3 = 4$	

6.2. Non abelian case

The extension of the above analysis to the non abelian case follows in a straightforward way. For simple illustration, we consider the example of a $U(2)$ gauge symmetry. As this symmetry is not simple since

$$U(2) \simeq SU(2) \times U_Y(1) \quad (6.22)$$

we have two gauge coupling constants respectively denoted g and g' ; one for $SU(2)$ with generators T^a and the other for $U_Y(1)$ with generator $\frac{Y}{2}$.

6.2.1. Coupling scalars to $U(2)$ YM elds

The fields content of this gauge system consists of:

a. 4 real scalar fields

These fields form a complex scalar field doublet

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad (6.23)$$

carrying charges $\left(\frac{1}{2}, 1\right)$ under the local $SU(2) \times U_Y(1)$ gauge symmetry. This means that the doublet Φ obeys the gauge symmetry transformations

$$\Phi \rightarrow \Phi' = U \times \Phi \quad (6.24)$$

with the 2×2 complex unitary matrix $U(\vartheta, \omega) = U$ as

$$U = e^{i\vartheta \frac{Y}{2}} \times e^{i\omega_a \frac{\tau^a}{2}}, \quad \text{with} \quad [Y, \Phi] = \Phi \quad (6.25)$$

and where $\vartheta(x)$ and $\omega_a(x)$ are the 4 real gauge parameters of the local $U(2)$ symmetry.

b. 4 real vector fields

These are the 4 vector gauge potentials of the $U(2)$ gauge invariance namely

$$B_\mu(x) = B_\mu^0 \frac{Y}{2}, \quad A_\mu(x) = T^a A_\mu^a \quad (6.26)$$

These gauge fields enter the gauge covariant derivative of Φ as follows

$$\begin{aligned} D_\mu \Phi &= \left(A_\mu + ig \frac{\tau^a}{2} A_\mu^a + ig' B_\mu^0 \frac{Y}{2} \right) \Phi \\ &\equiv (\partial_\mu + iS_\mu) \Phi \end{aligned} \quad (6.27)$$

with \mathcal{D}_μ obeying the gauge covariant transformation

$$\mathcal{D}_\mu \rightarrow U \mathcal{D}_\mu U^\dagger \quad (6.28)$$

Notice that substituting the Pauli matrices and $[Y, \Phi] = y\Phi$, the gauge field matrix reads like

$$iS_\mu = \frac{i}{2} \begin{pmatrix} g'yB_\mu^0 + gA_\mu^3 & g(A_\mu^1 - iA_\mu^2) \\ g(A_\mu^1 + iA_\mu^2) & g'yB_\mu^0 - gA_\mu^3 \end{pmatrix} \quad (6.29)$$

Setting

$$\begin{aligned} A_\mu^3 &= \cos \theta_W V_\mu + \sin \theta_W C_\mu \\ B_\mu &= -\sin \theta_W V_\mu + \cos \theta_W C_\mu \end{aligned} \quad (6.30)$$

we obtain up on substituting

$$\begin{aligned} g'y B_\mu + g A_\mu^3 &= (g \cos \theta_W - g'y \sin \theta_W) V_\mu - (g \sin \theta_W + g'y \cos \theta_W) C_\mu \\ g'y B_\mu - g A_\mu^3 &= -(g \cos \theta_W + g'y \sin \theta_W) V_\mu + (g'y \cos \theta_W - g \sin \theta_W) C_\mu \end{aligned} \quad (6.31)$$

Requiring

$$g'y \cos \theta_W = g \sin \theta_W \quad (6.32)$$

leading

$$\begin{aligned} g'y B_\mu + g A_\mu^3 &= \frac{g}{\cos \theta_W} (\cos^2 \theta_W - \sin^2 \theta_W) V_\mu + 2g \sin \theta_W C_\mu \\ g'y B_\mu - g A_\mu^3 &= -\frac{g}{\cos \theta_W} V_\mu \end{aligned} \quad (6.33)$$

the gauge field matrix (6.29) reads as

$$iS_\mu = \frac{ig}{2} \begin{pmatrix} \frac{1}{\cos \theta_W} G_\mu & \sqrt{2} A_\mu^- \\ \sqrt{2} A_\mu^+ & \frac{-1}{\cos \theta_W} V_\mu \end{pmatrix} \quad (6.34)$$

with

$$\begin{aligned} G_\mu^0 &= \cos 2\theta_W V_\mu + \sin 2\theta_W C_\mu \\ A_\mu^\pm &= \frac{1}{\sqrt{2}} (A_\mu^1 \pm i A_\mu^2) \end{aligned} \quad (6.35)$$

The above matrix expands like

$$iS_\mu = \frac{ig\sqrt{2}}{2} A_\mu^- L^+ + \frac{ig\sqrt{2}}{2} A_\mu^+ L^- + \frac{ig}{2\cos \theta_W} G_\mu P_1 - \frac{ig}{2\cos \theta_W} V_\mu P_2 \quad (6.36)$$

and the new generators as

$$P_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad L^+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad L^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.37)$$

or equivalently by using Pauli matrices

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{2} (I + \tau^3) \\ P_2 &= \frac{1}{2} (I - \tau^2) \\ L^\pm &= \tau^\pm \end{aligned} \quad (6.38)$$

These matrices obey, in addition to $Tr(P_1 P_1) = Tr(P_2 P_2) = Tr(L^- L^+) = 1$, amongst others the following orthogonality relations

$$Tr(P_1 P_1) = 0, \quad Tr(P_1 L^\pm) = 0, \quad Tr(P_2 L^\pm) = 0 \quad (6.39)$$

The gauge invariant lagrangian density describing the interacting dynamics of this system consists of two terms:

- the first term is given by the pure gauge lagrangian density which can be expressed either in terms of the gauge fields B_μ^0, A_μ^a as given by the following relation; or equivalently in terms of $A_\mu^\pm, V_\mu^0, C_\mu^0$.
- the second term is given by the gauge invariant lagrangian density for the scalar doublet Φ with Higgs potential as $V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$.

The total lagrangian density reads therefore

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[\Phi, W_\mu, B_\mu] = & -\frac{1}{4} \mathcal{F}_{\mu\nu}^a \mathcal{F}^{a\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\ & + (\mathcal{D}_\mu \Phi)^\dagger (\mathcal{D}_\mu \Phi) - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \end{aligned} \quad (6.40)$$

Notice that the term $(\mathcal{D}_\mu \Phi)^\dagger (\mathcal{D}_\mu \Phi)$ contains a term

$$Tr[\Phi^\dagger S_\mu S^\mu \Phi] = \frac{g^2}{4} (\phi_1, \phi_2) \begin{pmatrix} \frac{G_\mu G^\mu}{\cos^2 \theta_w} + 2A_\mu^- A^{+\mu} & \frac{\sqrt{2}}{\cos \theta_w} (G_\mu - V_\mu) A^{-\mu} \\ \frac{\sqrt{2}}{\cos \theta_w} (G_\mu - V_\mu) A_\mu^+ & \frac{V_\mu V^\mu}{\cos^2 \theta_w} + 2A_\mu^- A^{+\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$$

giving

$$\begin{aligned} Tr[\Phi^\dagger S_\mu S^\mu \Phi] = & \frac{g^2}{4} \phi_1^2 \left[\frac{G_\mu G^\mu}{\cos^2 \theta_w} + 2A_\mu^- A^{+\mu} \right] \\ & + \frac{g^2 \sqrt{2}}{4 \cos \theta_w} \phi_1 \phi_2 (G_\mu - V_\mu) (A^{-\mu} + A_\mu^+) \\ & + \frac{g^2}{4} \phi_2^2 \left[\frac{E_\mu E^\mu}{\cos^2 \theta_w} + 2A_\mu^- A^{+\mu} \right] \end{aligned} \quad (6.41)$$

6.2.2. Symmetry breaking

To study the spontaneously symmetry breaking of the $SU(2) \times U_Y(1)$ invariance down to $U_Y(1)$ subgroup generated by $\frac{Y}{2}$, we assume that the parameters μ^2 and λ are such that the minimum of the potential of $V(\Phi)$ is at

$$\langle \Phi^\dagger \Phi \rangle = -\frac{\mu^2}{2\lambda} \neq 0 \quad (6.42)$$

Then choose the particular vacuum

$$\langle \Phi \rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{v}, \quad \text{with} \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \quad v \in \mathbb{R} \quad (6.43)$$

and so $v^2 = -\frac{\mu^2}{\lambda}$. Notice that the choice of the above vacuum obeys

$$L^{\pm} \cdot \vec{v} \neq \vec{0}, \quad P_2 \cdot \vec{v} \neq \vec{0}, \quad \text{but} \quad P_1 \cdot \vec{v} = \vec{0} \quad (6.44)$$

This property shows that 3 of the 4 generators of the $U(2)$ gauge symmetry are spontaneously broken; these are the generators $\vec{J} = \{P_2, L^{\pm}\}$; the generator $Q = P_1$ is conserved.

The next step consists in replacing the field Φ as follows

$$\Phi = \langle \Phi \rangle + \frac{\sqrt{2}}{2} H e^{i \vec{v} \cdot \vec{\zeta} \cdot \vec{J}} \quad (6.45)$$

and choose the gauge transformation U as

$$U = e^{inQ} \times e^{i \vec{\zeta} \cdot \vec{J}} \quad (6.46)$$

where now the gauge parameters associated with the broken generators are given by the $\vec{\zeta}$ fields in Φ . As a consequence, one ends with 3 massive gauge particles A_{μ}^{\pm} , V_{μ} with masses $M_A = \frac{g^U}{2}$ and $M_V = \frac{M_A}{\cos \theta_w}$ as shown by eq(6.41), a massless gauge field C_{μ} , and massive scalar Higgs H .

The distribution of the degrees of freedom before and after gauge symmetry breaking is as collected in the following table

symmetric phase		spontaneously broken	
fields	dof	fields	dof
ϕ	4	H	1
\vec{A}_{μ}, B_{μ}	$2 \times 4 = 8$	\vec{V}_{μ}, C_{μ}	$3 \times 3 + 2 = 11$
total	$4 + 8 = 12$	total	$1 + 9 + 2 = 12$

(6.47)

7. SM of electroweak interactions

7.1 Brief history

Standard model of electroweak interactions is a local quantum field theory with a spontaneously broken $SU_L(2) \times U_Y(1)$ symmetry down to $U_{em}(1)$. This gauge model has been obtained in several steps. The first stage, goes back to the discovery of the β -decay; and relies on the phenomenological Fermi model that describes the interactions of 4 fermions. The lagrangian density of this effective model is given by the product of two currents and reads as

$$\mathcal{L}_{weak} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} J_{\mu}^{\dagger}(x) j^{\mu}(x) \quad (7.1)$$

with

$$j^{\mu} = \bar{\psi}_p \gamma^{\mu} (I - \gamma_5) \psi_n + \bar{\psi}_l \gamma^{\mu} (I - \gamma_5) \psi_e \quad (7.2)$$

where $\psi_p, \psi_n, \psi_e, \psi_\nu$ stand respectively for the wave functions of the proton p , the neutron n , the electron e and the neutrino ν . Despite partial success, this model has several weak points; in particular it has a dimensionful coupling constant G_F that makes the Fermi theory non renormalisable. To overcome this basic difficulty, O. Klein proposed a description of weak force as due to the exchange of a charged massive spin one gauge particle W_μ ; in an analogous manner with Maxwell theory. The lagrangian density of the gauge model reads like

$$\mathcal{L}_{weak} = g_w j_\mu^\dagger W^\mu + hc \quad (7.3)$$

with a dimensionless coupling constant g_w . Moreover, the universality of the Fermi coupling constant G_F and the use of charged current J^μ led to the discovery of a link between weak interactions and non abelian gauge symmetries containing $SU(2)$ as a subsymmetry. In 1961, Glashow, proposed $SU(2) \times U(1)$ as a gauge symmetry group for the theory of electroweak interactions; but because of massive gauge particles this model violates gauge invariance and renormalisability. In 1964, P. Higgs [18]; then F. Englert and R. Brout [19]; and soon after G. Guralnik, C. Hagen, T.Kibble [20] discovered independently the so called Higgs mechanism; a kind of a scenario to give masses to gauge particles and to fermions.

In 1967, S. Weinberg and A. Salam in 1968 suggested a spontaneously broken $SU_L(2) \times U_Y(1)$ with particular field's representations as a theory for leptons; the extension of this model implementing quarks has obtained few years later by Glashow, Iliopoulos and Maini [27].

The renormalisability of this gauge theory has been shown by G. 't Hooft in 1971 [28]. Since then, many successful experimental tests of standard model have been realized; and a big theoretical progress has been done in dealing SM and beyond.

7.2 Engineering minimal SM

The SM of electroweak interactions is a renormalizable quantum field theory describing the dynamics of the particles of table (2.4-2.5); its minimal version may be engineered in 5 steps as described below; see also [24, 25, 4]:

7.2.1 Gauge symmetry and elds representations

step 1 : gauge symmetry

The first step is to identify the gauge symmetry group G of the model and the symmetry breaking mode $G \rightarrow H$. Taking into account the quark colours, the gauge symmetry of SM at energy above the electroweak scale,

$$G = SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1) \quad (7.1)$$

and

$$H = SU_C(3) \times U_{em}(1) \quad (7.2)$$

where the index L on the group $SU_L(2)$ refers to weak couplings with left handed chirality. This step fixes the number of gauge vector particles namely $8 + 3 + 1$ as in (2.5); $(8 + 1)$

of them massless and the 3 others massive namely W^\pm and Z^0 . The gauge sector of SU_C (3) associated with strong interactions will be ignored below.

Denoting by T_1, T_2, T_3 the generators of SU_L (2) and by $\frac{Y}{2}$ the generator of U_Y (1), the electromagnetic charge operator Q_{em} , generating U_{em} (1) charges of the particles of table (2.4-2.5), is given by

$$Q_{em} = T_3 + \frac{Y}{2} \quad (7.3)$$

It is a linear combination of the SU_L (2) Cartan charge and hypercharge; it depends on field representations; for right fermions Q_{em} reduces to the hypercharge $\frac{Y}{2}$. For a field F in some representation SU_L (2) \times U_Y (1) ; i.e: $[T_3, F] = j_z F$ and $[Y, F] = yF$, the electric charge of F is $q_{em} = j_z + y/2$.

step 2 : field representations

Identify the \mathcal{R}_i representations of the group G in which transform the SM elementary particles including Higgs fields. The elementary fermionic particles are as in table (2.4) and their representations \mathcal{R}_i assignments as follows

fermion fields	$SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$	Q_{em}
(ν_{eL}, e_L^-)	$(1, 2, -1)$	$Q(\nu_L) = 0$ $Q(e_L^-) = -1$
e_R^-	$(1, 1, -2)$	$Q(e_R^-) = -1$
ν_{eR}	$(1, 1, 0)$	$Q(\nu_R) = 0$
(u_L, d_L)	$(3, 2, \frac{1}{3})$	$Q(u_L) = \frac{2}{3}$ $Q(d_L) = -\frac{1}{3}$
u_R	$(3, 1, \frac{4}{3})$	$Q(u_R) = \frac{2}{3}$
d_R	$(3, 1, -\frac{2}{3})$	$Q(d_R) = -\frac{1}{3}$

Similar assignments are valid for the 2 other families of leptons and quarks.

For the Higgs Φ , we have the following quantum numbers assignment

scalar fields	$SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$	Q_{em}
$\Phi = (\phi^+, \phi^0)$	$(1, 2, 1)$	$Q(\phi^+) = 1$ $Q(\phi^0) = 0$

7.2.2 Lagrangian densities

step 3 : Lagrangian densities

Write down the most general gauge invariant and renormalizable lagrangian density \mathcal{L} . Because of the various fields involved in this system, this density involves several terms as follows

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Higgs} + \mathcal{L}_{leptons} + \mathcal{L}_{quarks} + \mathcal{L}_{yukawa} \quad (7.6)$$

respectively describing the interacting dynamics of pure gauge fields (\mathcal{L}_{gauge}), the interaction of Higgs fields with vector bosons (\mathcal{L}_{Higgs}); the leptons and quarks with vector bosons ($\mathcal{L}_{leptons} + \mathcal{L}_{quarks}$), and Yukawa interactions between fermions and the Higgs fields (\mathcal{L}_{yukawa}). Explicitly, we have:

a. bosonic sector

This sector concerns the $SU_L(2) \times U_Y(1)$ gauge fields and the Higgs; it is described by gauge covariant lagrangian densities

$$\begin{aligned} L_{gauge} &= -\frac{1}{4} \vec{W}_{\mu\nu} \cdot \vec{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} \mathcal{B}_{\mu\nu} \mathcal{B}^{\mu\nu} \\ L_{Higgs} &= (D_\mu \Phi)^\dagger (D_\mu \Phi) - V(\Phi) \end{aligned} \quad (7.7)$$

with Higgs potential as

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad (7.8)$$

In above relations, the gauge field strengths are as

$$\begin{aligned} W_{\mu\nu}^i &= \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + i \frac{g}{2} \varepsilon^{ijk} W_\mu^j \wedge W_\nu^k, & \text{for } SU_L(2) \\ V_{\mu\nu} &= \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu, & \text{for } U_Y(1) \end{aligned} \quad (7.9)$$

and the gauge covariant derivative of the Higgs like

$$D_\mu \Phi = \left(\partial_\mu - i \frac{g}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{W}_\mu - i \frac{g'}{2} B_\mu \right) \Phi \quad (7.10)$$

Notice that besides the fields, this sector involves 4 free parameters: g, g', μ^2, λ . One could trade these parameters by α, θ_W , the W^\pm mass M_W and the Higgs mass M_H ; or alternatively by

$$\alpha^{-1}, M_Z, G_F, M_H \quad (7.11)$$

the three first ones are the three most precise experimental parameters with

$$\begin{aligned} \alpha^{-1} &= 137.03599911 \pm 0.00000046 \\ M_Z &= (91.1875 \pm 0.0021) \text{ GeV} \\ G_F &= (1.16637 \pm 0.00001) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \end{aligned} \quad (7.12)$$

For later use, notice that the matrix $g\tilde{W}_\mu + g'B_\mu$ may be expanded as

$$g\tilde{W}_\mu + g'B_\mu = \begin{pmatrix} g'B_\mu + gW_\mu^3 & g(W_\mu^1 - iW_\mu^2) \\ g(W_\mu^1 + iW_\mu^2) & g'B_\mu - gW_\mu^3 \end{pmatrix} \quad (7.13)$$

By performing the orthogonal transformation using the so called Weinberg θ_W angle

$$\begin{pmatrix} W_\mu^3 \\ B_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & \sin \theta_W \\ -\sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_\mu \\ A_\mu \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

we obtain up on substituting

$$\begin{aligned} g'B_\mu + gW_\mu^3 &= (g \cos \theta_W - g' \sin \theta_W) Z_\mu + (g' \cos \theta_W + g \sin \theta_W) A_\mu \\ g'B_\mu - gW_\mu^3 &= -(g \cos \theta_W + g' \sin \theta_W) Z_\mu + (g' \cos \theta_W - g \sin \theta_W) A_\mu \end{aligned} \quad (7.15)$$

Requiring

$$g' \cos \theta_W = g \sin \theta_W \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \theta_W = \frac{g}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \\ \sin \theta_W = \frac{g'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \end{cases} \quad (7.16)$$

eqs(7.15) reduces to

$$\begin{aligned} g'B_\mu + gW_\mu^3 &= \frac{g}{\cos \theta_W} (\cos^2 \theta_W - \sin^2 \theta_W) Z_\mu + 2g \sin \theta_W A_\mu \\ g'B_\mu - gW_\mu^3 &= -\frac{g}{\cos \theta_W} Z_\mu \end{aligned} \quad (7.17)$$

So

$$g\tilde{W}_\mu + g'B_\mu = \begin{pmatrix} \frac{g \cos 2\theta_W}{\cos \theta_W} Z_\mu + 2g \sin \theta_W A_\mu & g\sqrt{2}W_\mu^- \\ g\sqrt{2}W_\mu^+ & -\frac{g}{\cos \theta_W} Z_\mu \end{pmatrix} \quad (7.18)$$

with

$$\begin{aligned} A_\mu^{em} &= \sin \theta_W W_\mu^3 + \cos \theta_W B_\mu \\ Z_\mu^0 &= \cos \theta_W W_\mu^3 - \sin \theta_W B_\mu \\ W_\mu^\pm &= \frac{\sqrt{2}}{2} (W_\mu^1 \pm iW_\mu^2) \end{aligned} \quad (7.19)$$

Putting back into (7.10), the gauge covariant derivative $D_\mu \Phi$ becomes

$$D_\mu \Phi = \begin{pmatrix} \partial_\mu - i \frac{g \cos 2\theta_W}{2 \cos \theta_W} Z_\mu + 2g \sin \theta_W A_\mu & -ig \frac{\sqrt{2}}{2} W_\mu^- \\ -ig \frac{\sqrt{2}}{2} W_\mu^+ & \partial_\mu + i \frac{g}{2 \cos \theta_W} Z_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad (7.20)$$

b. fermionic sector

As there are 3 families of leptons and quarks, we have to sum over all fermions and quarks of the SM. The sum is taken on the 3 doublets of left handed leptons denoted collectively as Ψ_L^i , i.e:

$$\Psi_L^i = \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L^- \end{pmatrix}, \quad \Psi_L^2 = \begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L^- \end{pmatrix}, \quad \Psi_L^3 = \begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L^- \end{pmatrix} \quad (7.21)$$

and the 3 singlets of right handed ones Ψ_R^i standing for

$$\psi_R^1 = e_R^-, \quad \psi_R^2 = \mu_R^-, \quad \psi_R^3 = \tau_R^- \quad (7.22)$$

right neutrinos are dropped out; but may be implement in a straightforward manner in the model.

We also sum over the 3 doublets of left handed quarks Q_L^i , and the 3 + 3 right handed ones U_R^i, D_R^i referring to the up quarks u, c, t ; and the down ones d, s, b .

$$\begin{aligned} U_R^1 &= u, & U_R^2 &= c, & U_R^3 &= t \\ D_R^1 &= d, & D_R^2 &= s, & D_R^3 &= b \end{aligned} \quad (7.23)$$

Thus the corresponding gauge covariant lagrangian densities reads as:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{leptons} &= \sum_{i=1}^3 \bar{\Psi}_L^i i \gamma^\mu \mathcal{D}_\mu \Psi_L^i + \bar{\psi}_R^i i \gamma^\mu \mathcal{D}_\mu \psi_R^i \\ \mathcal{L}_{quarks} &= \sum_{i=1}^3 \bar{Q}_L^i i \gamma^\mu \mathcal{D}_\mu Q_L^i + \bar{U}_R^i i \gamma^\mu \mathcal{D}_\mu U_R^i + \bar{D}_R^i i \gamma^\mu \mathcal{D}_\mu D_R^i \end{aligned} \quad (7.24)$$

with gauge covariant derivatives as

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_\mu \Psi_L^i &= \left(\partial_\mu - i \frac{g}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{W}_\mu + i \frac{g'}{2} B_\mu \right) \Psi_L^i \\ \mathcal{D}_\mu \Psi_R^i &= \left(\partial_\mu + i \frac{g'}{2} B_\mu \right) \psi_R^i \end{aligned} \quad (7.25)$$

and

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_\mu Q_L^i &= \left(\partial_\mu - i \frac{g}{2} \tilde{\tau} \cdot \vec{W}_\mu - i \frac{g'}{6} B_\mu \right) Q_L^i \\ \mathcal{D}_\mu U_R^i &= \left(\partial_\mu - i \frac{2g'}{3} B_\mu \right) U_R^i \\ \mathcal{D}_\mu D_R^i &= \left(\partial_\mu + i \frac{g'}{3} B_\mu \right) D_R^i \end{aligned} \quad (7.26)$$

and where we have used the quantum charges given in table (7.4).

From these relations, the coupling of fermions to the gauge fields is given by

$$\mathcal{L}_{int} = -g \vec{W}_\mu \cdot \vec{J}^\mu - g' B_\mu J_{(B)}^\mu \quad (7.27)$$

with the currents are

$$\begin{aligned} J_\mu^a &= \frac{1}{2} \sum_{i=e,\mu,\tau} \bar{\Psi}_L^i \gamma_\mu \tau^a \Psi_L^i + \frac{1}{2} \sum_{quarks} \bar{Q}_L^i \gamma_\mu \tau^a Q_L^i \\ J_\mu^3 &= \frac{1}{2} \sum_{i=e,\mu,\tau} \bar{\Psi}_L^i \gamma_\mu \tau^3 \Psi_L^i + \frac{1}{2} \sum_{quarks} \bar{Q}_L^i \gamma_\mu \tau^3 Q_L^i \end{aligned} \quad (7.28)$$

and

$$\begin{aligned} J_\mu^{(B)} &= \frac{1}{6} \sum_{i=e,\mu,\tau} \bar{\Psi}_L^i \gamma_\mu \Psi_L^i + \frac{1}{2} \sum_{i=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_R^i i \gamma_\mu \psi_R^i + \\ &\quad \sum_{quarks\ doublets} \bar{Q}_L^i i \gamma_\mu Q_L^i + \frac{1}{6} \sum_{i=u,c,t} \bar{U}_R^i i \gamma_\mu U_R^i - \frac{1}{3} \sum_{i=d,s,b} \bar{D}_R^i i \gamma_\mu D_R^i \end{aligned} \quad (7.29)$$

c. Yukawa couplings

These are gauge invariant and renormalizable tri-field couplings involving two fermionic fields and the Higgs doublet Φ ; or its adjoint conjugate $\tilde{\Phi} = \tau_2 \Phi^*$. Their lagrangian density \mathcal{L}_{yukawa} is given by,

$$\begin{aligned} L_{yukawa} &= - \sum_{i=e,\mu,\tau} \lambda_i^{(lep)} (\bar{\Psi}_L^i \Phi \psi_R^i + hc) \\ &\quad - \sum_{i,j=u,c,t} \Lambda_j^{i(up)} (\bar{Q}_L^i \tilde{\Phi} U_R^j + hc) \\ &\quad - \sum_{i,j=d,s,b} \Lambda_j^{i(down)} (\bar{Q}_L^i \Phi D_R^j + hc) \end{aligned} \quad (7.30)$$

with the 3 real $\lambda_i^{(lep)}$ standing for the Yukawa coupling constants for the 3 leptons; and the hermitian $\Lambda_{ij}^{i(up)}, \Lambda_{ij}^{i(down)}$ are two 3×3 Yukawa coupling matrices that cannot be diagonalized simultaneously.

However, we can usually choose an appropriate basis in the u, c, t family space to diagonalize one of the matrices $\Lambda_{ij}^{i(up)}, \Lambda_{ij}^{i(down)}$; say

$$\Lambda_j^{i(up)} = \delta_j^i \lambda_i^{(up)}, \quad i, j = u, c, t \quad (7.31)$$

but $\Lambda_j^{i(down)}$ still remains a non diagonal 3×3 matrix. Nevertheless, as we usually work in a field space where the mass matrix for down quarks

$$\frac{v\sqrt{2}}{2} \left(\Lambda^{(down)} \right)_j^i \bar{D}_L^i D_R^j \equiv m_j^i \bar{D}_L^i D_R^j, \quad i, j = d, s, b \quad (7.32)$$

is diagonal, we then perform a basis change in the d, s, b space in order to bring m_j^i into a diagonal form like $m_j^i = \delta_j^i m_i$. This is achieved by help of a unitary transformation \mathcal{V} on the down quark fields as follows

$$D \rightarrow D' = \mathcal{V}.D \quad \Leftrightarrow \quad D^i \rightarrow D'^i = \mathcal{V}_j^i D^j \quad (7.33)$$

so that we have

$$m \rightarrow \mathcal{V}^+.m.\mathcal{V} = \text{diag} (m_{(d)}, m_{(s)}, m_{(b)}) \quad (7.34)$$

It can be shown that an appropriate choice of V is given by the Cabibbo- Kobayashi-Maskawa matrix

$$\mathcal{V}_{KM} = \begin{pmatrix} c_1 & s_1 c_3 & s_1 s_3 \\ -s_1 c_3 & c_1 c_2 c_3 - s_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 c_2 s_3 - s_2 c_3 e^{i\delta} \\ -s_1 s_2 & c_1 s_2 e^{i\delta} & c_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (7.35)$$

with $c_k = \cos \theta_k$, $s_k = \sin \theta_k$. This matrix involves 4 real parameters: 3 angles θ_k and a phase δ , a source of CP violation in the 6-quark flavour model.

This sector involves $3 + 6 + 4 = 13$ free parameters given by:

$$\begin{aligned} & \lambda_1^{(e)}, \lambda_2^{(\mu)}, \lambda_3^{(\tau)} \\ & \lambda_u^{(e)}, \lambda_c^{(\mu)}, \lambda_t^{(\tau)} \quad , \quad \lambda_d^{(e)}, \lambda_s^{(\mu)}, \lambda_b^{(\tau)} \\ & \theta_1, \theta_2, \theta_3, \delta \end{aligned} \quad (7.36)$$

So the SM of electroweak interaction has 17 free parameters, the above 13 plus the 4 ones of (7.11) namely g, g', μ^2, λ .

7.1.3. Symmetry breaking $SU_L(2) \times U_Y(1) \rightarrow U_{em}(1)$

step 4 : spontaneous symmetry breaking

The symmetry breaking of the $SU_L(2) \times U_Y(1)$ gauge symmetry is achieved by taking the parameters μ^2 and λ of the Higgs potential

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad (7.37)$$

so that gauge symmetry is spontaneously broken down to $U_{em}(1)$. For $\lambda > 0$, this corresponds to considering $\mu^2 < 0$ in order to have a non zero vacuum $\langle \Phi \rangle \neq 0$. In fact, we have an infinitely degenerate vacuum given by the circle

$$\langle \Phi^\dagger \Phi \rangle = -\frac{\mu^2}{2\lambda}$$

To break spontaneously the $SU_L(2) \times U_Y(1)$ symmetry down to $U_{em}(1)$, we have to choose the vacuum as

$$\langle \Phi \rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \quad \langle \phi^0 \rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} v \in \mathbb{R} \quad (7.39)$$

with $v^2 = -\frac{\mu^2}{\lambda}$. Then replace the field Φ by its value around the vacuum like

$$\Phi = \langle \Phi \rangle + \Phi' \quad (7.40)$$

together with the parametrization of $\Phi' = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left(i \frac{\vec{\zeta} \cdot \vec{J}}{v}\right)$ and gauge transformation as in eq(6.46-6.47) in order to kill the decoupled Goldstone bosons as done in subsection 6.2.

step 5 : Lagrangian of the spontaneously broken theory

As explained in section 6, by substituting (7.40) back into the lagrangian (7.6), we get a new lagrangian density \mathcal{L}' with:

- (α) 3 massive gauge bosons W^\pm, Z^0 with respective vector potentials W_μ^\pm, Z_μ^0 ,
- (β) the massless photon γ described by the electromagnetic vector potential A_μ^{em} ,
- (γ) a massive Higgs field H ,
- (δ) massive fermions and massless neutrinos.

More details on the predictions of the SM model constructed above are as described below; precisions require however taking into account quantum corrections that have not been considered in present study.

7.2 Predictions of SM

By replacing the Higgs field by its vacuum value $\langle\phi^0\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}v$ in the Yukawa coupling terms of (7.30), we get the following predictions at classical level:

7.2.1. Masses of particles

We distinguish 3 types of particle masses: (1) the masses of fermions following from Yukawa couplings; (2) the masses of vector gauge bosons following from the coupling to Higgs; and (3) the Higgs mass following from the Higgs potential.

a. fermion masses

For massive leptons and the up- quarks, these masses are given by

$$\begin{array}{ll}
 \text{leptons} & \text{up quarks} \\
 m_{(e)} = \frac{v\sqrt{2}}{2} \lambda_1^{(e)} & m_{(\mu)} = \frac{v\sqrt{2}}{2} \lambda_1^{(\mu)} \\
 m_{(\mu)} = \frac{v\sqrt{2}}{2} \lambda_2^{(\mu)} & m_{(c)} = \frac{v\sqrt{2}}{2} \lambda_2^{(c)} \\
 m_{(\tau)} = \frac{v\sqrt{2}}{2} \lambda_3^{(\tau)} & m_{(t)} = \frac{v\sqrt{2}}{2} \lambda_3^{(t)}
 \end{array} \tag{7.41}$$

From these relations we learn that: (i) fermions masses are proportional to the vacuum value v of the Higgs field, (ii) their ratio gives information of Yukawa coupling ratios like

$$\frac{\lambda_2^{(\mu)}}{\lambda_1^{(e)}} = \frac{m_{(\mu)}}{m_{(e)}}, \quad \frac{\lambda_2^{(c)}}{\lambda_1^{(\mu)}} = \frac{m_{(c)}}{m_{(\mu)}} \tag{7.42}$$

and so on. The down- quark mass matrix $m_{ij} = \frac{v\sqrt{2}}{2} \Lambda_{ij}^{(down)}$ needs using the Cabibbo-Kobayshi-Maskawa matrix \mathcal{V}_{KM} to be diagonalized as in (7.34).

b. gauge bosons masses

Substituting $\langle\phi^0\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}v$ in (7.7), we deduce from the gauged kinetic term $|D_\mu\Phi|^2$ the masses of the 4 gauge particles of the SM. We have

$$\begin{aligned}
\langle |D_\mu \Phi|^2 \rangle &= \frac{v^2 g^2}{8} (W_\mu^1 W^{1\mu} + W_\mu^2 W^{2\mu}) + \frac{v^2}{8} (g' B_\mu - g W_\mu^3)^2 \\
&= \frac{v^2 g^2}{4} W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{v^2 g^2}{8} \left(\frac{g'}{g} B_\mu - W_\mu^3 \right)^2 \\
&= \frac{v^2 g^2}{4} W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{v^2 g^2}{8 \cos^2 \theta_W} Z_\mu^0 Z^{0\mu}
\end{aligned} \tag{7.43}$$

with θ_W standing for Weinberg angle and where W_μ^\pm , Z_μ^0 and A_μ^{em} are given by (7.19).

From eq(7.43), we learn:

i) the masses of gauge bosons

$$M_W = \frac{vg}{2}, \quad M_Z = \frac{M_W}{\cos \theta_W} = \frac{v\sqrt{g^2 + g'^2}}{2}, \quad M_{A_\mu^{em}} = 0 \tag{7.44}$$

These masses show clearly that the $SU_L(2) \times U_Y(1)$ gauge symmetry is partially broken down to $U_{em}(1)$. Experiments showed that

$$\begin{aligned}
M_W &= 80.385 \pm 0.015 \text{ GeV}/c \\
M_Z &= 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c
\end{aligned} \tag{7.45}$$

ii) Using M_W and M_Z , we can estimate the Higgs vacuum value v by help of the approximation of the W-propagator by M_W^{-2} and effective Fermi-coupling constant

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2} = \frac{1}{2v^2} \tag{7.46}$$

This gives $v \simeq 246 \text{ GeV}$. From (7.44), we also have

$$\sin^2 \theta_W = 1 - \left(\frac{M_W}{M_Z} \right)^2 = 0.212 \tag{7.47}$$

c. Higgs mass

As 3 degrees of freedom of the complex scalar doublet Φ are eaten by the gauge fields to become massive vector fields, one remains with one real degree of freedom that gives the Higgs field H whose mass squared M_H^2 is same as the one of the components $|\phi^0|^2$ in the Higgs potential, that is $\frac{m_H^2}{2} = -\mu^2$; so

$$M_H = \sqrt{-2\mu^2} = \sqrt{2\lambda v^2} \tag{7.48}$$

Recent measurements of LHC experiments at CERN showed $M_H \simeq 125 \text{ GeV}/c^2$.

7.2.2. Field couplings

The $SU_L(2) \times U_Y(1)$ gauge invariant and renormalizable field couplings of the SM are of 4 types: (i) vector boson-fermion couplings, (ii) vector boson- self couplings, (iii) Higgs

fermions couplings and (iv) Higgs gauge boson couplings. These interactions can be read from (7.6) and subsequent relations. Let us give some details on the vector gauge boson-fermion interactions.

vector boson-fermion couplings

As the SM with $SU_L(2) \times U_Y(1)$ gauge invariance involves have 4 vector gauge bosons, we distinguish 4 kinds of such couplings; they are obtained by substituting (7.14) back into (7.27). We get:

a. A_μ^{em} fermion couplings

This coupling is given by,

$$-eJ_{em}^\mu A_\mu^{em} = \frac{gg'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \left[\bar{e} \gamma^\mu e + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{2}{3} \bar{u}_i \gamma^\mu u^i - \frac{1}{3} \bar{d}_i \gamma^\mu d^i \right) + \dots \right] A_\mu^{em} \quad (7.49)$$

where the quantity between brackets is precisely the field contribution of the 1st family to the electric current J_{em}^μ ; the dots stand for the charged leptons and quarks of the 2nd and 3rd families. From this relation, we learn

$$e = \frac{gg'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} = g \sin \theta_W = g' \cos \theta_W \quad (7.50)$$

b. W_μ^\pm fermion couplings

This coupling is given by the following part $\mathcal{L}_{W\text{-lept}}$ of the lagrangian density (7.6):

$$\mathcal{L}_{W\text{-lept}} = -\frac{g}{\sqrt{2}} \left(\bar{\nu}_e \gamma^\mu e_L + \sum_{i=1}^3 \bar{u}_i \gamma^\mu d_{L,KM}^i + \dots \right) W_\mu^+ + hc \quad (7.51)$$

where

$$d_{L,KM}^i = \begin{pmatrix} d_{L,KM} \\ S_{L,KM} \\ b_{L,KM} \end{pmatrix} \quad (7.52)$$

whose components are given by linear combinations of the down quarks d, s, b as follows

$$\begin{pmatrix} d_{L,KM} \\ S_{L,KM} \\ b_{L,KM} \end{pmatrix} = \mathcal{V}_{KM} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} \quad (7.53)$$

with \mathcal{V}_{KM} the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix \mathcal{V}_{KM} of (7.35). Notice that the W^\pm gauge bosons couple only to left handed fermions.

c. Z_μ^0 fermion couplings

Contrary to the charged weak currents $J_{weak}^{\mu\pm}$, the Z^0 -fermion couplings involve both left and right fermions; they are as follows:

(α) Z^0 coupling to leptons

The lagrangian density $\mathcal{L}_{Z\text{-lep}}$ of the Z_μ^0 couplings to leptons may be obtained from (7.24) by first reducing the gauge covariant derivatives $\mathcal{D}_\mu \Psi_L^i$ and $\mathcal{D}_\mu \Psi_R^i$ to

$$\begin{aligned} D_\mu \Psi_L^i &\rightarrow \left(\partial_\mu - i \frac{g}{2} \tau^3 \cdot W_\mu^3 + i \frac{g'}{2} B_\mu \right) \Psi_L^i \\ D_\mu \Psi_R^i &= \left(\partial_\mu + i g' B_\mu \right) \Psi_R^i \end{aligned}$$

where we have set W_μ^\pm to zero as they do not contribute to the interactions. Then express W_μ^3 and B_μ in terms of Z_μ^0 and A_μ^{em} as

$$-\frac{i}{2} (g \tau^3 \cdot W_\mu^3 - g' B_\mu) = \frac{i}{2} \begin{pmatrix} -\frac{g}{\cos \theta_W} Z_\mu & 0 \\ 0 & \frac{g \cos 2\theta_W}{\cos \theta_W} Z_\mu + 2g \sin \theta_W A_\mu^{em} \end{pmatrix} \quad (7.54)$$

Moreover, since A_μ^{em} does not contribute to these couplings, the covariant derivatives $\mathcal{D}_\mu \Psi_L^i$ and $\mathcal{D}_\mu \Psi_R^i$ reduce to

$$\begin{aligned} D_\mu \Psi_R^i &\rightarrow \left[\partial_\mu + \frac{ig}{2} \begin{pmatrix} -\frac{1}{\cos \theta_W} & 0 \\ 0 & \frac{\cos 2\theta_W}{\cos \theta_W} \end{pmatrix} Z_\mu \right] \Psi_L^i \\ D_\mu \Psi_R^i &\rightarrow \left(\partial_\mu - ig' \sin \theta_W Z_\mu^0 \right) \Psi_R^i \end{aligned} \quad (7.55)$$

Substituting back into the lagrangian density, we get

$$\mathcal{L}_{Z\text{-lep}} = \frac{-e}{\sin 2\theta_W} \left[(\bar{\nu}_L \gamma^\mu \nu_L - \cos 2\theta_W \bar{e}_L \gamma^\mu e_L + 2 \sin^2 \theta_W \bar{e}_R \gamma^\mu e_R) + \dots \right] Z_\mu^0 \quad (7.56)$$

with the dots standing for the contributions of the leptons of the 2nd and 3rd families.

(β) Z^0 - quarks

Similar computations lead to

$$\mathcal{L}_{Z\text{-quarks}} = -\frac{e}{2} \sum_{i=1}^3 \left[k_u \bar{u}_{Li} \gamma^\mu u_L^i - k_d \bar{d}_{Li} \gamma^\mu d_L^i - \frac{2 \tan \theta_W}{3} (2 \bar{u}_{Ri} \gamma^\mu u_R^i - \bar{d}_{Ri} \gamma^\mu d_R^i) + \dots \right] Z_\mu^0 \quad (7.57)$$

with

$$\begin{aligned} k_u &= \left(\cos \theta_W - \frac{\tan \theta_W}{3} \right) \\ k_d &= \left(\cot \theta_W + \frac{\tan \theta_W}{3} \right) \end{aligned} \quad (7.58)$$

and dots for the quarks of the other families.

Further predictions of SM and precisions tests including quantum corrections may be found in recent reviews.

8. Conclusion and comments

The Standard model of electroweak interactions provides a QFT framework to describe today knowledge on electromagnetic, weak and strong interactions at energies around the electroweak scale.

Based on quite simple principles; such as gauge invariance, symmetry breaking and renormalizability to kill quantum mechanical divergences; as well as on mathematical methods such as symmetry group representations and approximations using perturbation techniques of fields around vacuum state, this model led to many phenomenological predictions which successfully overcome many experiments and precisions tests.

The set of fields of the minimal SM model is quite simple; these fields are distributed according to their spins into two basic sectors:

(i) *a fermionic sector consisting of a 3×15 spin $\frac{1}{2}$ particles carrying particular charges under $SU_c(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$ gauge symmetry. These particles are remarkably ranged into three families as exhibited below*

families	number of chiral fermions	
$\nu_{eL}, e_L^-, e_R^-, u_L, u_R, d_R$	15	(8.1)
$\nu_{\mu L}, \mu_L^-, \mu_R^-, c_L, s_L, c_R, s_R$	15	
$\nu_{\tau L}, \tau_L^-, t_L, b_L, t_R, b_R$	15	

If right neutrinos ν_{iR} are also implemented, each family would then have 16 chiral fermions. These number have a nice interpretation in grand unified theories with gauge symmetries such as $SU(5)$ and $SO(10)$.

(ii) *a bosonic sector involving two kinds of spins:*

Spin 1 fields given by the $8 + 3 + 1$ vector gauge particles mediating the interactions between the above fermions.

A spin 0 Higgs doublet (ϕ^+, ϕ^0) with $\phi^0 = \langle \phi^0 \rangle + H^0$ giving, amongst others, masses to W^\pm , Z^0 of the short range nuclear weak force; and to the fermions except neutrinos.

It is very remarkable that the bosonic sector of the SM has only 4 free parameters: 2 gauge coupling constants g and g' each for a factor of $SU_L(2) \times U_Y(1)$; and 2 more parameters μ^2 and λ needed to spontaneously break the gauge symmetry. Much on these parameters is known since they are related to

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}, \quad G_{Fermi}, \quad M_{Z-boson}, \quad M_{Higgs} \quad (8.2)$$

With the recent LHC experiments which discovered a scalar particle with mass $M_{Higgs} \sim 125$ GeV and right quantum numbers for a Higgs particle, one has at hand 4 important inputs seen that the values of the 3 other parameters are known with accurate precision (7.12).

Despite its impressive success, the SM leaves however too many un-answered questions; in particular why fundamental matter is replicated in three quite identical copies? and why matter and antimatter are asymmetric?

From the QFT modeling view, the minimal SM studied above has 17 free parameters free parameter that have to be fixed? Four of them are g, g', μ^2, λ or equivalently (8.2); they come from the bosonic sector, and the other 13 additional ones come from the fermionic sector; these are

$$\begin{aligned} m(e), m_{(\mu)}, m_{(\tau)}, & \quad m_{(u)}, m_{(c)}, m_{(t)} \\ m_{(d)}, m_{(s)}, m_{(b)}, & \quad \theta_1, \theta_2, \theta_3, \delta \end{aligned} \quad (8.3)$$

If moreover, we assume that neutrinos have also non zero Dirac masses $m_{(\nu)}$ as tiny as possible, we should a priori add 7 more parameters: 3 masses $m_{(\nu e)}, m_{(\nu \mu)}, m_{(\nu \tau)}$, 3 mixing angles $\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3$ and 1 phase δ' for leptonic mixing.

The observation of a chargeless scalar particle ~ 125 GeV by LHC is a tremendous development in the confirmation of the Higgs mechanism. The future LHC experiments will deepen tests of the SM and will give more insight on the frontier of its possible extensions where it is expected to find answers to some SM problems. Supersymmetry and extra dimensions are two beautiful ideas that may constitute the basis of physics beyond standard model.

Acknowledgement *I thank prof Omar Fassi-Fehri, the permanent secretary of the Hassan II Academy, for kind invitation to give a presentation on SM of electroweak interactions and supersymmetry, February 2013.*

References

- [1] S. L. Glashow, Nucl. Phys. 22, 579, 1961,
- [2] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19, 1264, 1967
- [3] A. Salam, in *Elementary Particle Theory*, ed. N. Svartholm (Almqvist and Wiksells), Stockholm, 1969,
- [4] Jean Iliopoulos, *Introduction to the STANDARD MODEL of the Electro-Weak Interactions*, arXiv:1305.6779,
- [5] Guido Altarelli, Martin W. Grunewald, *Precision Electroweak Tests of the Standard Model*, Phys.Rept. 403-404 (2004) 189-201, arXiv:hep-ph/0404165
- [6] Abdelhak Djouadi, *The Anatomy of Electro-Weak Symmetry Breaking. I: The Higgs boson in the Standard Model*, Phys.Rept.457:1-216,2008, arXiv:hep-ph/0503172
- [7] J. Beringer et al.(PDG), PR D86, 010001, 2012
- [8] P. Langacker, *The Standard Model and Beyond*, CRC Press, New York, 2009,
- [9] ATLAS Collaboration, G. Aad et al., “*Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC*”, Phys. Lett. B716 (2012) 1–29, arXiv:1207.7214, additional auxiliary plots on the website.
- [10] CMS Collaboration, S. Chatrchyan et al., “*Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*”, Phys.Lett. B716 (2012)30–61, arXiv:1207.7235.
- [11] Howard Georgi and Sheldon Glashow, *Unity of All Elementary-Particle Forces*, *Physical Review Letters*, 32 (1974) 438,
- [12] P. Langacker, Phys. Reports 72, 185 (1981),

- [13] D.Z Freedman, P. van Nieuwenhuizen, S. Ferrara, *Progress Toward a Theory of Supergravity*, Phys.Rev.D13:3214-3218,1976,
- [14] M.B Green, J.H Schwarz, E. Witten, *Superstring Theory*, Cambridge University Press (1987).
- [15] J. Polchinski, *String theory in 2 vols*, Cambridge Univ. press 1998,
- [16] E.Witten, *Some Comments on String Dynamics*, hep-th/9507121
- [17] J. H Schwarz, *From Superstrings to M Theory*, Physics Reports 315: 107. arXiv:hep-th/9807135,
- [18] P. Higgs, *Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons*, Physical Review Letters 13 (16): 508, 1964,
- [19] F. Englert, R. Brout, *Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons*, Physical Review Letters 13 (9): 321, 1964,
- [20] J. Goldstone, A. Salam, S. Weinberg, *Broken Symmetries*, Physical Review 127: 965–970, 1962.
- [21] Claude Itzykson, Jean-Bernard Zuber, *Quantum Field Theory*.
- [22] Franz Mandl, Graham Shaw, *Quantum Field Theory*, Wiley Interscience publication 1984.
- [23] M.E. Peskin, D.V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*,
- [24] Chris Quigg, Gauge Theories of the Strong, *Weak and Electromagnetic Interactions*, Editor Advanced Book Classics.
- [25] Ta-Pei Cheng, Ling-Fong Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, (Clarendon, Oxford, 1984).
- [26] Ta-Pei Cheng, Ling-Fong Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, (Clarendon, Oxford, 1984).
- [27] S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani, Phys Rev D2, 12851292, 1970.
- [28] G. 't Hooft, Nucl Phys B33 173199, 1971; ibid B35, 167188, 1971.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci Pr. Saidi pour avoir limité la présentation dans le temps. Je vais poser une question au Pr. J.-M. Alimi juste pour nous donner des ordres de grandeur dans les calculs HPCN qu'ils effectués pour la simulation de tout l'univers. Est-ce que vous pouvez nous donner des ordres de grandeur de temps de calcul CPU?

- Pr. Jean-Michel ALIMIM (Consortium Observatoire de Paris-Meudon, France)

Effectivement pour réaliser ce calcul, nous avons réalisé la simulation 3 modèles mais un seul modèle a nécessité l'utilisation de toutes les ressources mises à disposition par le système Curie. Une simulation c'était typiquement une centaine d'heures sur les 80.000 cœurs, ce qui signifierait environ 1.000 ans sur une unité de calcul.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci. Vu le temps, nous levons la séance pour reprendre nos travaux après le déjeuner.

SESSION PLÉNIÈRE II :
PHYSIQUE QUANTIQUE,
MATIÈRE CONDENSÉE ET MATIÈRE MOLLE

DYNAMICS OF SOFT BIOLOGICAL INTERFACES

Pr. Gerald G. FULLER

*Université de Stanford, Etats-Unis d'Amérique
Membre Associé, Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*



Abstract

Biological systems are normally high-interface systems and these surfaces are laden with biological molecules that render them rheologically complex. The resulting nonlinearities with response to surface stresses and strain are often essential to their proper function and these are explored using recently developed methods that reveal interfacial moduli and microstructure. Three applications are discussed.

1. The tear film of the eye is a composite structure of an aqueous solution of protein and biomacromolecules. This thin layer is further covered by a film comprised of meibomian lipids excreted during each blink. The purpose of the meibum has been largely unexplained although one prevailing suggestion is that it suppresses evaporation. Recent measurements in our laboratory demonstrate that this layer is strongly viscoelastic and this property has dramatic effects on the dynamics of the moving contact line and stability against dewetting.
2. Biofilms are protective layers produced by bacteria colonies that offer protection against desiccation and external agents that can attack the colonies. This layer, a result of amyloid fiber produced by the bacteria make it difficult to treat intestinal tract infections in our own bodies and methods to monitor the kinetics of biofilm development and the resulting response of the films to excipient materials that might upregulate or quench amyloid production are needed. Experiments are described where interfacial moduli are demonstrated to be very effective in sensing the presence of these films and provide a convenient format for the systematic introduction of external, chemical agents.

3. Vascular endothelial cells line the interior walls of our blood vessels and are sensitive to surface shear stresses. These stresses are known to affect the shape and orientation of endothelial cells. It is evident that the spatial homogeneity of flow can affect vascular health and it is well-documented that lesions form in regions of high curvature, bifurcations, and asperities in blood vessels. Experiments are described where stagnation point flows are used to create regions of well controlled flow stagnation and spatial variation of wall shear stresses. Live-cell imaging is used to monitor the fate of cells attached to surfaces experiencing flow impingement and it is revealed that endothelial cells migrate and oriented in such flows to create remarkable patterns of orientation and cell densification.

DISCUSSION

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci Pr. Fuller pour cet excellent exposé sur la dynamique en biologie et en biomécanique. Nous avons un peu de temps pour quelques questions avant la pause prévue à 16 h.

- Pr. Mostapha BOUSMINA (Chancelier)

My eye offers a third eventual explanation to the elasticity. Will you deform these droplets? The droplets are submitted to two major forces. For one side, you have external stresses that tend to deform the droplet in the direction of the flow. But from the other side you have interfaces stresses that try to bring back the droplets to their initial spherical shape. Then, when you stop the flow or try to slow it down so that the particles will relax and will recover their initial shape. That means that the droplets have like elastic skate or spring on their surface. That is what we call : elasticity of shape.

- Pr. Gerald FULLER (SPC)

What we find is that the predominant origin of visco-elasticity seems to be the structural proteins. I am certain, as you point out, that there is a contribution to the surface tension of the lipid droplets that I think it's smaller at least what we measure in this case.

- Pr. Carlos MARTINEZ-ALONSO (STV)

I would like to ask a question on the first part of the presentation. It looks like, given the polarization of the cells, they are acting very much like they are responding to a chemo-attractant. My question here is whether you have looked at the mechanisms that are implicated in this polarization or whether there is the same part that is deactivated by the chemo-attractant. If that's the case, the cells will migrate against the chemo-attractant based on the gradient of that particular radiant.

- Pr. Gerald FULLER (SPC)

Yes, we were concerned about any unanticipated unwanted gradient producing any concentration gradient in the soup that is keeping the cells alive. When you look at the flow, it's really transport-dominant. I don't believe that there is a possibility for significant concentration gradient in the solution above the cells. We have done quite a bit of skinning of different elements of the cells and we do see a radial concentration maximum at the center of stagnation point, the cells are used to grip onto the surface. It's not an explanation of what is happening but it is giving us further clues why the cells are behaving this way, why are the cells moving against the flow to begin with?

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci Pr. Fuller. J'ai une annonce : il y a une réunion interne à l'Académie regroupant les membres résidents et les membres associés qui aura lieu dans la salle Sahara pour une vingtaine de minutes. Les membres correspondants et les invités peuvent prendre la pause café et nous reprendrons nos travaux à 16h20.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

S'il vous plaît, compte des retards accumulés, nous allons démarrer les sessions parallèles en même temps que la session de physique. Ceux qui souhaitent participer aux sessions parallèles (physique et agronomie, physique et sciences de la vie), elles auront lieu dans des salles distinctes. On démarre donc notre session plénière tout de suite avec le Pr. Daoud de l'Université Ibn Zohr (Agadir).

LES CORRÉLATIONS QUANTIQUES EN THÉORIE QUANTIQUE DE L'INFORMATION

Pr. Mohamed DAOUD

*Département de Physique, Faculté des Sciences,
Université Ibnou Zohr, Agadir, Maroc*



Résumé

L'information quantique exploite l'intrication dans les systèmes quantiques multi-qubits. Aussi, la caractérisation des corrélations quantiques revêt une importance capitale. Dans cette note, nous discutons une vue unifiée des corrélations quantiques dans des systèmes composés de deux bits quantiques. Ce schéma unificateur utilise la notion d'entropie relative et se généralise aisément aux systèmes de plusieurs qubits. Les quantificateurs des corrélations quantiques comme l'entropie de formation d'intrication et la discorde quantique sont également passés en revue. En particulier, on discute la relation d'additivité qui existe entre les différentes corrélations quantiques et classiques présentes dans un état quantique donné.

Nous présentons également une seconde vue unificatrice des corrélations quantiques qui est de nature géométrique. Elle mesure la distance entre deux états quantiques par le biais de la norme de Hilbert-Schmidt. Le phénomène de décohérence, en raison du couplage des systèmes quantiques avec l'environnement, a pour effet de privilégier certains états, qualifiés de quasi-classiques. Il conduit inévitablement à la perte des corrélations nécessaires pour le traitement quantique de l'information et à une transition entre le monde quantique et classique. Cette transition est discutée dans le cadre du formalisme des états cohérents qui permet la formulation d'un espace de phase classique muni d'une structure symplectique indispensable pour décrire l'évolution des systèmes classiques. Nous donnons également un bref aperçu d'un modèle théorique pour décrire le processus de la décohérence.

1. Introduction

L'information quantique est un des domaines les plus dynamiques de la physique quantique actuelle et pourrait conduire à des réalisations technologiques nouvelles. Elle se veut une nouvelle science utilisant les lois régissant le monde quantique et regroupant toutes les disciplines alliant la théorie de l'information à la physique quantique. A l'heure actuelle, elle porte essentiellement sur deux challenges majeurs. Le premier est la conception d'un ordinateur quantique capable d'exécuter rapidement certains calculs qui nécessitent un temps exponentiellement long sur un ordinateur conventionnel. Le second concerne l'utilisation de la cryptographie quantique pour effectuer des communications privées très sécurisées. Les protocoles quantiques garantissent la confidentialité des communications, non pas grâce à la complexité du cryptage mais grâce aux lois de la physique quantique. Dans ce contexte, des progrès considérables ont été achevés et des expériences grandeur nature ont été réalisées. Cependant, la conception de l'ordinateur quantique se heurte à l'extrême fragilité des bits quantiques qu'une telle machine devrait manipuler : la moindre perturbation fausserait le calcul. Nul doute, la mécanique quantique, qui a profondément marqué le développement de la physique moderne, n'a pas encore livré tous ses secrets. Elle a conduit par le passé à de remarquables avancées conceptuelles de notre compréhension du monde microscopique et à des applications révolutionnaires dans divers domaines tels que le traitement de l'information grâce à l'emploi des structures de bandes du silicium, les lasers, l'imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire, etc. Il est vrai que la physique quantique est moins connue du grand public que la relativité générale par exemple, mais depuis quelques années l'intérêt pour la mécanique quantique est entrain de vivre une seconde révolution suite aux récents exploits expérimentaux comme la téléportation quantique et les potentialités offertes par les propriétés des systèmes quantiques pour stocker, coder et transmettre de l'information. Cette convergence de la théorie classique de l'information et la physique quantique est communément appelée dans la littérature spécialisée: information quantique [1,2,3,4]. L'idée de concevoir des outils de calculs faisant usage des propriétés quantiques et capables de simuler des systèmes mathématiques complexes, fut proposée par Richard Feynman au début des années 80. A l'heure actuelle, plusieurs travaux théoriques mettent en avant des perspectives très prometteuses de l'information quantique dans le traitement et la transmission de l'information. On peut citer à titre d'exemple le protocole de Bennett et Brassard qui offre un schéma de distribution de clefs quantiques inconditionnellement sûr par rapport aux protocoles cryptographiques classiques [5]. Il y a également les algorithmes de calculs pour la factorisation des grands nombres entiers [6] ou encore l'algorithme de Grover qui est un algorithme quantique permettant de chercher un élément dans une structure non-ordonnée en un temps très court comparativement aux algorithmes classiques [7]. Ces résultats justifient l'engouement pour la recherche de nouvelles applications de la physique quantique dans le domaine de l'information. Cependant, il est force de constater que pour atteindre ces objectifs, il faut vaincre le phénomène de la décohérence quantique. Ce mécanisme par le biais duquel la cohérence d'un système quantique est perdue au contact de son environnement et qui explique la coexistence d'un monde microscopique quantique et d'un monde macroscopique classique. Dans ce domaine, d'importantes réalisations expérimentales ont été achevées indépendamment par les équipes de Serge Haroche (voir [8,9]) et de David Wineland (voir [10]). Ces expériences permettent d'entrevoir la possibilité de réaliser des superpositions d'états quantiques sur des périodes suffisamment longues pour le traitement de l'information codée dans des bits quantiques. D'autre part, grâce aux travaux de Zurek et ses collaborateurs [11], une théorie de la décohérence a été proposée. Elle permet de comprendre l'évolution des corrélations qui sont présentes dans un système

quantique et donc pourrait aider à développer des stratégies pour combattre les effets de la décohérence. Vaincre la décohérence est une condition sine qua non on ne pourra mener à bien cette très séduisante idée de coder de l'information dans des systèmes quantiques.

La présente note porte sur les outils de quantification et caractérisation des corrélations quantiques dans les systèmes quantiques multipartites. Dans la seconde section, nous revenons sur les fondements de la mécanique quantique, en particulier sur le concept d'intrication qui résulte du principe de superposition et qui a été mis en avant dans les fameuses expériences de pensée formulées par les fondateurs de la mécanique quantique. Ces expériences qui cherchaient à clarifier le passage entre la mécanique quantique et la mécanique classique et à comprendre l'aspect non local de la physique quantique contrairement aux autres théories physiques. Dans la troisième section, nous présentons deux schémas unificateurs des corrélations quantiques existantes dans des systèmes quantiques multipartites. Le premier utilise la notion de l'entropie relative. Le second est de nature géométrique et fait appel à la notion de la norme de Hilbert-Schmidt pour mesurer les distances entre les états dans un espace de Hilbert. Dans la dernière section, on discute l'émergence de propriétés classiques d'un système quantique dans le cadre du formalisme des états cohérents. Une approche qui fait appel aux outils de symétrie, géométrie différentielle symplectique et géométrie non-commutative. Nous discutons également un modèle qui rend compte de la perte des corrélations lors de la décohérence d'un système quantique.

2. La transition quantique-classique : une approche via la théorie de l'information

Une théorie physique, à la différence d'une théorie mathématique, doit impérativement décrire une réalité physique. Il s'en suit que la construction mathématique d'une théorie doit apporter des réponses à trois questions essentielles et incontournables : (i) Quels sont les systèmes physiques étudiés et comment décrire leurs états, (ii) Quelle est leur évolution et (iii) Quelles sont les quantités relatives à l'état du système qui peuvent être mesurées expérimentalement. La construction axiomatique de la mécanique quantique apporte une réponse précise à chacune de ces questions : (i) L'état d'un système est un vecteur $|\psi\rangle$ vert de norme unité d'un espace de Hilbert complexe, (ii) L'évolution des états est régie par l'équation de Schrödinger et (iii) Les quantités observables sont représentées par des matrices hermitiennes et leurs valeurs moyennes lorsque le système est dans l'état $|\psi\rangle$ est donnée par $\langle O \rangle_\psi = \langle \psi | O | \psi \rangle$. Cette formulation axiomatique de la mécanique quantique fait appel à des notions mathématiques abstraites qui échappent complètement à l'intuition physique contrairement à la mécanique de Newton ou la relativité d'Einstein. La mécanique quantique ne fait référence à aucun principe fort. De plus, il semble difficile de retrouver la mécanique de Newton à partir de la mécanique quantique lors du passage du microscopique au macroscopique. C'est pourquoi la mécanique quantique a toujours suscité depuis sa naissance de nombreuses questions quant à son interprétation et ceci en dépit de ces prédictions sans cesse confirmées et bien qu'elle soit à l'origine de l'ensemble des grandes théories physiques modernes.

Ces questions, concernant les fondements de la physique quantique, sont plus que jamais d'actualité en vertu des enjeux actuels relatifs aux implémentations expérimentales des systèmes quantiques capables de rivaliser avec leurs analogues classiques dans le domaine de l'information. Dans ce sens, la communauté scientifique s'intéressant à ce domaine a jugé utile, voir nécessaire, de revenir sur les bases de cette théorie et particulièrement sur les fameuses expériences par la pensée proposées par Schrödinger (paradoxe du chat de

Schrödinger) et Einstein-Podolsky-Rosen (paradoxe EPR). L'expérience de Schrödinger mettait en avant l'insoutenable idée selon la quelle un système physique peut être suspendu entre réalités différentes. Le paradoxe EPR quant à lui contestait le caractère non local de la physique quantique et l'existence de corrélations purement quantiques qui n'ont pas d'analogues classiques. Ces expériences ont été formulées pour comprendre le caractère linéaire de la mécanique quantique et les implications du principe de superposition. Les objets macroscopiques, bien que constitués de particules microscopiques, ne satisfont pas un tel principe. C'est exactement pour souligner cette apparente contradiction entre physique quantique et physique classique que l'expérience burlesque du chat de Schrödinger fut proposée. Manifestement, une situation où le chat serait suspendu entre la vie et la mort ne pourrait pas se produire. Par le biais de cette expérience Schrödinger voulait poser le problème de la transition quantique-classique et se demandait pourquoi et comment se fait le passage entre la mécanique quantique et la mécanique classique alors que la construction axiomatique de la mécanique quantique ne considère pas cette limite. Tous les fondateurs de la mécanique quantique s'accordaient sur la nécessité de répondre à cette question et de comprendre également la nature des corrélations mises en relief par le paradoxe EPR.

Les premiers éléments de réponse ont été apportés par von Neumann qui a proposé un schéma rigoureux et quantitatif dit «modèle de mesure» pour étudier cette question. Il considère un système quantique S interagissant avec un appareil de mesure A selon les lois de la mécanique quantique. Il suppose qu'initialement S et A ne sont pas corrélés et que l'état global du système se factorise comme $|\psi^S\rangle \otimes |\psi^A\rangle$. Au cours de son évolution, les sous systèmes S et A se couplent via un potentiel d'interaction H_{int} . Ce couplage induit une corrélation-intrication entre S et A qui prend fin au bout d'un certain temps impliquant leur séparabilité. Au cours de l'interaction, leur état générique global correspond donc à un état couplé - plus précisément à un état enchevêtré ou intriqué. Pour mieux illustrer et comprendre comment le modèle de von Neumann permet de rendre compte de la question soulevée par Schrödinger, il suffit de considérer un système à deux niveaux $|0\rangle$ et $|1\rangle$ et un appareil de mesure dont l'aiguille a deux indications : $|d\rangle$ et $|g\rangle$. On suppose de plus que l'évolution induite par le hamiltonien d'interaction H_{int} est telle que :

$$|0\rangle |d\rangle \rightarrow |0\rangle |d\rangle \quad |1\rangle |d\rangle \rightarrow |1\rangle |g\rangle$$

Il s'en suit donc que le couplage du système S , préparé initialement dans l'état $|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$, avec le système A conduira à l'état final $(|0\rangle |d\rangle + |1\rangle |g\rangle)/\sqrt{2}$. Ceci indique que l'appareil de mesure se trouve dans une superposition impliquant l'aiguille dans l'état $|d\rangle$ et l'aiguille dans l'état $|g\rangle$. Cette situation, similaire à celle du chat de Schrödinger, est improbable et en pratique de telles superpositions n'ont pas de chance de se réaliser. C'est ce qui est connu comme étant le problème de la mesure. Face à cet état de fait et devant l'impossibilité de réponse, apportée par la construction mathématique de la théorie quantique elle-même, les physiciens étaient dans une sérieuse impasse tout en continuant à chercher des interprétations plausibles de la mécanique quantique. Parmi les quelles, on trouve la fameuse interprétation de Copenhague promulguée par N. Bohr. Dans le cadre de l'interprétation de Copenhague, le problème de la transition quantique-classique se réduit donc à comprendre pourquoi et quand certains objets peuvent être qualifiés de «classiques» puisque le domaine classique ne souffre pas de problèmes d'interprétations. Dans le cadre de cette interprétation, il n'est possible de maintenir un observateur vivant suffisamment isolé du reste du monde pour qu'il soit effectivement décrit par la mécanique quantique. De plus, dans la pratique une mesure se termine bien par un contact avec le monde classique et la mesure est effective quand sa valeur est inscrite sur un registre. La compréhension de la transition quantique-classique a toujours été une question centrale en mécanique quantique. Elle continue à l'être et est devenue

même d'actualité avec l'émergence de la théorie quantique de l'information. En effet, il est nécessaire de comprendre comment et pourquoi les propriétés de superposition et de corrélations s'annihilent au contact du monde macroscopique. Dans cet esprit, dans les années 1980, W.H. Zurek proposa sa théorie de la décohérence [11]. Il a explicité un mécanisme permettant de comprendre pourquoi les propriétés quantiques ne se manifestent généralement pas à notre échelle en formulant une approche tenant compte de l'interaction du système quantique avec son environnement.

Pour comprendre l'approche de Zurek, nous reprenons l'exemple que nous avons utilisé pour illustrer le modèle de von Neumann. L'état final de système quantique S et de l'appareil de mesure A après couplage est donnée par $(|0\rangle|d\rangle + |1\rangle|g\rangle)/\sqrt{2}$. Le formalisme de Zurek requiert la prise en compte du couplage avec l'environnement. Pour cela, on suppose que l'environnement quantique E initialement dans l'état $|e\rangle$ évolue soit dans l'état $|e_d\rangle$ si l'appareil de mesure est dans l'état $|d\rangle$, soit dans l'état $|e_g\rangle$ si l'appareil de mesure est dans l'état $|g\rangle$. Il en découle que, après que toutes les interactions ont eu lieu, l'état global de " $S + A + E$ " est donné par :

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle|d\rangle|e_d\rangle + |1\rangle|g\rangle|e_g\rangle)$$

Les états $|e_d\rangle$ et $|e_g\rangle$ sont orthogonaux. En effectuant une trace sur les états possibles de l'environnement, l'état «système + appareil de mesure» est donnée par la matrice densité $(|0\rangle\langle 0| \otimes |d\rangle\langle d| + |1\rangle\langle 1| \otimes |g\rangle\langle g|)$. Par le biais de cet exemple simple, on peut constater que le processus d'interaction avec l'environnement permet donc de passer de corrélations quantiques (l'état enchevêtré de $S + A$ explicité plus haut) à des corrélations classiques. Il s'agit ici d'un exemple simple car dans le cas général les interactions des systèmes quantiques avec l'environnement sont relativement complexes. Il est donc extrêmement difficile de les modéliser pour décrire convenablement les processus de décohérence quantique. Mais en dépit de sa complexité, l'effet de l'environnement - un système quantique légitime - sur la capacité des systèmes quantiques à être dans des superpositions d'états «classiques» doit donc être pris en compte. D'ailleurs de nombreux travaux théoriques confirmés par des résultats expérimentaux ont montré que l'effet de l'environnement sur l'existence de superpositions d'états est en général exponentiel avec le nombre de particules élémentaires qui composent le système étudié. Il est donc indéniable que le mécanisme proposé par W.H. Zurek donne une explication raisonnable à l'émergence d'un monde classique à partir du monde quantique. Il faudrait aussi noter la transition quantique - classique n'est pas fondamentalement liée à la taille des objets considérés mais bien à leur capacité à être ou ne pas être en interaction avec leur environnement. La décohérence est un phénomène, certes réel, mais pas fondamental. A cet égard, la communauté scientifique et spécialement les expérimentateurs restent confiants quant à la possibilité de le vaincre. Les années à venir confirmeront certainement cette thèse.

3. Approche unificatrice des corrélations classiques et quantiques

3.1. Entropie d'intrication et discord quantique

Il est clair que la maîtrise du phénomène de la décohérence est une condition préalable pour les applications pratiques et l'exploitation effective des potentialités de l'information quantique. Il est bien établi que l'intrication est une ressource fondamentale indispensable en vue de nouvelles applications de la physique quantique comme la téléportation quantique, la cryptographie quantique, le calcul quantique ou encore le

codage super-dense. Dans ce sens, l'analyse des corrélations quantiques dans un système multipartite constitue un thème central de recherches en information quantique. Ceci est essentiellement motivé par le fait qu'un système quantique n'est jamais isolé et se trouve corrélé avec son environnement avant que le processus de décohérence lui fait perdre sa nature quantique et fait émerger des états classiques. Pendant longtemps, on avait pensé que l'entropie d'intrication, formulée par Wootters [12], permettait la distinction entre états intriqués et états séparables et que la séparabilité était synonyme de classicalité. Ce constat est vrai lorsque un système bipartite est décrit par un état pur. Cependant, lorsque cet état est mixte, c'est la discordance quantique qui permet de classer les états selon leurs degrés d'intrication et permet déterminer la quantification des corrélations quantiques. La discordance quantique est donc mieux adaptée pour la reconnaissance de la base classique de l'appareil de mesure qui émerge lorsqu'il interagit avec l'environnement. Le formalisme de la discordance quantique s'attache à quantifier les corrélations entre le système mesuré et l'appareil de mesure et ensuite la quantification de la corrélation de ce dernier avec son environnement. Sa définition est inspirée de la théorie de l'information classique telle qu'elle a été formulée par Claude Shannon [13]. Elle est fondée sur le calcul de l'information mutuelle entre deux systèmes A et B selon deux définitions identiques pour des distributions de probabilités classiques, mais différents dans le cas des systèmes quantiques :

$$T(A : B) = S(A) + S(B) - S(A, B),$$

$$J(A : B) = S(A) - S(A/B).$$

Il est facile de voir que dans le cadre de la théorie classique de l'information, les quantités $T(A : B)$ et $J(A : B)$ sont identiques contrairement au cas quantique où $T(A : B) \geq J(A : B)$. La discordance quantique est définie comme étant la différence entre ces deux quantités :

$$D = T(A : B) - J(A : B).$$

où $J(A : B)$ mesure la quantité d'information sur le système A que l'on peut extraire en effectuant une mesure sur la partie B . $T(A : B)$ est une mesure globale des corrélations entre les deux systèmes quantiques. C'est la quantité d'information mutuelle qui mesure les corrélations effectives entre A et B . Lorsque la discordance D est nulle, pour une certaine base de mesure A , alors les deux systèmes quantiques sont corrélés uniquement de façon classique. L'étude de l'évolution de la discordance quantique permet de suivre l'évolution progressive de l'information quantique en une information classique. Par conséquent, la discordance quantique est un quantificateur des corrélations quantiques qui indique la présence du processus de décohérence dans un système interagissant avec l'extérieur. Il permet également de nous renseigner sur les corrélations quantiques disponibles pour effectuer des opérations quantiques : calcul quantique ou communication quantique à titre d'exemple.

3.2. Mesures entropiques

Les systèmes quantiques sont corrélés de façons radicalement différentes des objets classiques. Une caractéristique distinctive des corrélations quantiques est l'intrication quantique. Les états intriqués sont non classiques car ils ne peuvent être préparés à l'aide d'opérations locales de communication classique (LOCC). Différentes mesures des corrélations non classiques, motivées par différentes notions de quantification de la classicalité, ont été proposées. Parmi elles, la notion de la discordance quantique, introduite dans le paragraphe précédent, a fait l'objet d'une attention particulière dans la littérature. Mais il est important de souligner que dans la plupart des travaux portant sur la mesure des corrélations quantiques se limitent à des études de corrélations bipartites. En fait le

concept de la discorde, qui s'appuie sur la définition de l'information mutuelle, n'est pas défini pour les systèmes multipartites. Il est bien connu que les différentes mesures de corrélations quantiques ne sont pas identiques et conceptuellement différentes. Par exemple, la discorde quantique ne coïncide pas avec l'entropie de formation et une comparaison directe de ces deux notions est plutôt vide de sens. Par conséquent, une classification unifiée des corrélations est nécessaire. La classification que nous discutons dans cette section, repose sur la notion d'entropie relative. Elle permet de quantifier les corrélations dans les systèmes multipartites et fournit un schéma unificateur des corrélations quantiques. Plus précisément, l'entropie relative mesure la distance entre un état quantique donné présentant une propriété quantique (l'enchevêtrement ou la discorde) et l'état le plus proche sans cette propriété. Par exemple, la distance entre un état intriqué et l'état séparable le plus proche est une mesure significative de l'intrication et coïncide avec la discorde quantique lorsque l'état est mixte ou l'entropie d'intrication si l'état est pur. Ici, on considère l'entropie relative mais de nombreuses autres mesures de distance peuvent servir tout autant. Nous reviendrons sur ce point dans la section suivante. Dans ce qui suit, nous donnons les formules des diverses corrélations présentes dans un système quantique multipartite et discutons l'additivité de ces corrélations. Nous discutons aussi la séparation de l'ensemble des corrélations quantiques dans un état quantique donné en intrication, dissonance (une corrélation quantique, qui peut être présente dans les états séparables, semblable à la discorde mais il exclut l'enchevêtrement), et les corrélations classiques en utilisant le concept d'entropie relative.

On considère un système composé de N parties (sous-systèmes). Un état produit de ce système multi-partite, qui ne présente aucune corrélation de toute nature, s'écrit sous la forme suivante :

$$\pi = \pi_1 \otimes \dots \otimes \pi_N ,$$

où π_n est l'état réduit du sous-système $n = 1, 2, \dots, N$. L'ensemble des états produits, que l'on note par \mathcal{P} , n'est pas un ensemble convexe car le mélange deux états produits ne conduit pas toujours à un autre état produit.

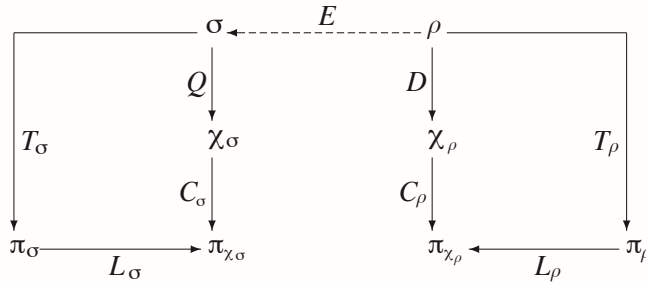


Figure 1 : *Corrélations dans un état quantique*. La notation $x \rightarrow y$, indique que y est l'état le plus proche de x vis à vis de l'entropie relative $S(x||y)$. L'état $\rho \in \mathcal{E}$ (l'ensemble des états intriqués), $\sigma \in \mathcal{S}$ (l'ensemble des états séparables), $\chi \in \mathcal{C}$ (l'ensemble des états classiques), et $\pi \in \mathcal{P}$ (l'ensemble des états produits). Les distances sont l'entropie d'intrication, E , la discorde quantique, D , la dissonance quantique, Q , l'information mutuelle, T_ρ ou T_σ , et la corrélation classique, C_σ ou C_ρ . Toutes les entropies, exceptée l'entropie de formation E , se réduisent à des différences de y et x , $S(x||y) = S(y) - S(x)$. À l'aide des quantités L_ρ and L_σ les chemins sont additifs.

L'ensemble des états classiques, que l'on note par \mathcal{C} , contient des mélanges d'états discernables localement. Ils s'écrivent :

$$\chi = \sum_{k_n} p_{k_1 \dots k_N} |k_1 \dots k_N\rangle \langle k_1 \dots k_N| = \sum_{\vec{k}} p_{\vec{k}} |\vec{k}\rangle \langle \vec{k}|,$$

où $p_{\vec{k}}$ est une distribution de probabilité conjointe et les $|k_n\rangle$ sont des états locaux formant une base orthonormée. Les corrélations entre ces états sont identifiées comme étant de nature purement classique. Notons que \mathcal{C} n'est pas un ensemble convexe. Le mélange de deux états classiques écrits dans deux bases différentes peut donner lieu à un état non classique. L'ensemble des états séparables, \mathcal{S} , est convexe et contient des mélanges de la forme :

$$\sigma = \sum_i p_i \pi_1^{(i)} \otimes \dots \otimes \pi_N^{(i)}.$$

Ces états peuvent posséder des caractéristiques non classiques. L'ensemble des états produits \mathcal{P} est un sous-ensemble de l'ensemble des états classiques \mathcal{C} qui à son tour est un sous-ensemble de l'ensemble des états séparables \mathcal{S} . Enfin, les états intriqués sont tous ceux qui n'appartiennent pas à l'ensemble des états séparables \mathcal{S} . L'ensemble des états intriqués, \mathcal{E} , n'est pas un ensemble convexe non plus. L'entropie relative entre deux états quantiques x et y est définie comme :

$$E(x \| y) \equiv - \text{Tr}(x \log y) - S(x)$$

où :

$$S(x) \equiv - \text{Tr}(x \log x)$$

est l'entropie de von Neumann de x . L'entropie relative est une quantité positive et en raison de cette propriété elle peut servir de mesure de la distance entre les états quantiques. Bien entendu, le terme distance mesurée par l'entropie relative est abusive. En effet, techniquement parlant, l'entropie relative ne peut définir une distance car elle n'est pas symétrique par exemple.

Dans la figure 1, nous présentons tous les types possibles de corrélations présentes dans un état quantique ρ . T_ρ est l'information mutuelle totale de ρ évaluée en mesurant l'entropie relative entre l'état ρ et l'état produit le plus proche dans l'ensemble \mathcal{P} . Si ρ est intriqué, son enchevêtrement est mesurée par l'entropie relative d'intrication, E , ce qui correspond à la distance le séparant de l'état séparable le plus proche. Ayant identifié σ , on peut estimer la distance pour atteindre l'état classique le plus proche, χ_σ . Cette distance, notée Q , contient le reste des corrélations non classiques (elle est similaire à la discorde mais ne contenant pas l'enchevêtrement). Cette quantité est appelée la dissonance quantique. Par ailleurs, si nous nous intéressons à la discorde D , alors nous devons trouver la distance entre ρ et l'état classique proche χ_ρ . En résumé, nous avons les corrélations non classiques suivantes :

$$E = \min_{\sigma \in \mathcal{S}} S(\rho \| \sigma) \quad (\text{enchevêtrement}),$$

$$D = \min_{\chi \in \mathcal{C}} S(\rho \| \chi) \quad (\text{discorde quantique}),$$

$$Q = \min_{\chi \in \mathcal{C}} S(\sigma \| \chi) \quad (\text{dissonance quantique}).$$

De plus les corrélations classiques sont définies comme la distance minimale entre un état classiquement corrélé, χ , et un état produit π . Explicitement elles sont données par :

$$C = \min_{\pi \in \mathcal{P}} S(\chi \| \pi) \quad (\text{corrélation classique}).$$

Enfin, nous calculons les quantités L_ρ et L_σ indiquées dans la figure 1 et qui permettent les conditions d'additivité pour entre les différents types de corrélations présentes dans un état quantique multi-partite. Pour établir ces relations d'additivité, nous commençons par noter que l'état produit le plus proche d'un état générique ρ , vis à vis de l'entropie relative, est donnée par $\Pi_\rho = \pi_1 \otimes \cdots \otimes \pi_N$ en termes des densités réduites de chaque sous système. Il en découle que l'entropie relative d'un état générique ρ (séparable ou non) et le produit tensoriel Π_ρ de ses densités réduites à une seule particule, conduit à l'information mutuelle totale T_ρ donnée par :

$$T_\rho = S(\Pi_\rho) - S(\rho).$$

Les corrélations classiques données par :

$$C_\sigma = S(\Pi_{\chi_\sigma}) - S(\chi_\sigma) \quad \text{et} \quad C_\rho = S(\Pi_{\chi_\rho}) - S(\chi_\rho).$$

L'état classique le plus proche d'un état générique ρ . (ou σ) est donné par :

$$\chi_\rho = \sum_{\vec{k}} |\vec{k}\rangle \langle \vec{k}| \rho |\vec{k}\rangle \langle \vec{k}|,$$

où $\{|\vec{k}\rangle\}$ forment une base propre de χ_ρ . Ce résultat est intéressant car il permet de dériver aisément la discorde et la dissonance quantiques. En effet, la minimisation de l'entropie relative sur tous les états classiquement corrélés est identique à l'optimisation de l'entropie $S(\chi_x)$ par rapport aux bases locales $|\vec{k}\rangle$:

$$S(\chi_x) = \min_{|\vec{k}\rangle} S\left(\sum_{\vec{k}} |\vec{k}\rangle \langle \vec{k}|_x |\vec{k}\rangle \langle \vec{k}|\right).$$

Il en découle que les formes explicites de la discorde et de la dissonance sont données par :

$$D = S(\chi_\rho) - S(\rho) \quad \text{et} \quad Q = S(\chi_\sigma) - S(\sigma).$$

Enfin, les expressions des quantités L_ρ et L_σ sont :

$$L_\rho = S(\pi_{\chi_\rho}) - S(\pi_\rho) \quad \text{et} \quad L_\sigma = S(\pi_{\chi_\sigma}) - S(\pi_\sigma),$$

et il est facile de voir que l'on obtient les relations d'additivité suivantes :

$$T_\rho = D + C_\rho - L_\rho, \quad \text{et} \quad T_\sigma = Q + C_\sigma - L_\sigma.$$

traduites sur la figure 1.

3.3. Mesures géométriques

La notion de l'entropie relative, bien que n'est symétrique par échange des sous systèmes, conduit à une relation élégante d'additivité entre les différents types de corrélations. Cependant, il faudrait signaler que l'évaluation analytique de ces quantités requiert des procédures de minimisation qui ne sont pas aisées à accomplir dans le cas général [14]. C'est dans ce sens qu'il était impératif de trouver d'autres quantificateurs des corrélations dans les systèmes quantiques multipartites. Ainsi et afin de contourner ces difficultés techniques, la discorde quantique géométrique D_g a été introduite. C'est une mesure qui utilise la norme de Hilbert-Schmidt pour mesurer la distance entre un état quantique et son état classique le plus proche (voir [15] et les références qui y sont citées). De façon identique, la norme de Hilbert-Schmidt peut être également utilisée pour introduire une mesure géométrique de la quantité de corrélations totale et classique dans un état donné.

D'un point de vue mathématique, cette mesure géométrique présente l'avantage de conduire à des expressions explicites surtout quand il est question d'examiner la dynamique des corrélations quantiques.

La discorde quantique géométrique est donnée par la distance mesurée par le biais de la norme de Hilbert-Schmidt d'un état ρ et son plus proche état classiquement corrélé χ_ρ :

$$D_g(\rho) = \|\rho - \chi_\rho\|^2$$

où la norme de Hilbert-Schmidt est donnée par $\|\cdot\|^2 = \text{Tr}(\cdot)^2$ qui est relativement simple à calculer dans de nombreuses situations. Les mesures géométriques de l'information mutuelle et la corrélation classique sont données par :

$$T_g(\rho) \equiv \|\rho - \pi_\rho\|^2, \quad C_g(\rho) \equiv \|\chi_\rho - \pi_{\chi_\rho}\|^2,$$

où π_ρ and π_{χ_ρ} sont respectivement les états produits les proches des états ρ et χ_ρ . De façon similaire aux mesures basées sur l'entropie relative, on peut introduire la quantité :

$$L_g(\rho) \equiv \|\pi_\rho - \pi_{\chi_\rho}\|^2$$

qui est l'analogue géométrique de l'entropie relative introduite dans le paragraphe précédent. Bien que la norme de Hilbert-Schmidt simplifie de façon drastique les calculs des corrélations quantiques et classiques, il ne préserve pas la relation élégante d'additivité :

$$T_g = D_g + C_g - L_g$$

excepté dans des situations bien particuliers. En effet, pour un nombre non négligeable d'états bipartites, cette relation est violée.

Il est également important de mentionner que lorsque on compare la dynamique des quantificateurs des corrélations basée sur l'entropie relative à celle basée sur la norme de Hilbert-Schmidt, des comportements qualitatifs différents peuvent se produire. Par conséquent la question d'opter pour une mesure au profit d'une autre est un problème qui reste ouvert en théorie quantique de l'information.

4. Corrélations quantiques, symétries et géométrie

4.1. Corrélations classiques via l'approche de Moyal et géométrie symplectique

Dans de nombreux manuels de la mécanique quantique, le traitement de la correspondance quantique-classique consiste généralement à faire tendre \hbar vers 0 sans se soucier des motivations physiques qui pourrait expliquer cette limite. Cette procédure est incorrecte d'un point de vue physique mais aussi mathématiquement mal définie. En mécanique classique, la dynamique est directement déterminée par un ensemble d'équations différentielles sur un espace de phase et la structure pour assurer l'intégrabilité sont les crochets de Poisson. En mécanique quantique, bien que l'équation Schrödinger est linéaire, ou plus précisément les fonctions d'onde sont des vecteurs linéaires dans l'espace de Hilbert, la structure de base pour déterminer la dynamique quantique sont les relations de commutation. Mathématiquement ces structures (les crochets de Poisson en mécanique classique et relations de commutation en mécanique quantique) se situent au même niveau. Ils servent donc de structures algébriques de base. D'autre part, il est bien connu que les bases mathématiques de la théorie quantique est la théorie de la représentation des groupes. En effet, chaque système quantique exactement soluble possède une symétrie décrite par une algèbre de Lie. En se basant sur ces structures algébriques, il est toujours possible de faire émerger l'analogue classique du système quantique considéré en utilisant le formalisme des états cohérents qui ont la particularité de minimiser les fluctuations quantiques et donc de se placer entre le monde quantique et classique. Pour un système classique, les observables dynamiques sont des fonctions analytiques différentielles définies sur un espace de phase. Un point de cet espace représente un état physique. Pour un état initial donné, l'évolution temporelle du système est caractérisée de façon unique par une trajectoire dans l'espace de phase. Pour un système quantique, les propriétés dynamiques sont décrites dans un espace de Hilbert, noté \mathcal{H} , et les observables dynamiques sont représentées par des opérateurs hermitiens agissant dans cet espace. L'espace de Hilbert joue un rôle analogue à celui de l'espace de phase classique. Cependant, un espace de Hilbert ne peut pas être défini comme un espace de phase. De ce fait l'étude de l'émergence de la physique classique à partir du domaine quantique exige une connaissance de la géométrie associée à un espace de Hilbert et plus spécialement la symétrie de Lie associée au système quantique étudié. Or pour un système quantique exactement soluble, il y a toujours une structure de groupe et les observables associées constituent une structure algébrique g bien définie via des relations de structures. Explicitement, le Hamiltonien du système, H , et les différents opérateurs de transition A entre les niveaux énergétiques, peuvent être exprimés en fonction d'un ensemble d'opérateurs de base $\{t_i\}$ de g :

$$H = H(t_i), \quad A = A(t_i).$$

Cet ensemble d'opérateurs satisfait une relation de commutation fermée de type :

$$[t_i, t_j] = C_{ij}^k t_k$$

où les coefficients C_{ij}^k sont des constantes de structure. Le groupe dynamique, notée G , est défini par une application exponentielle unitaire de g :

$$g \rightarrow G = \exp \left(\sum_i \alpha_i t_i \right).$$

Selon la théorie des représentations, l'espace des états en mécanique quantique \mathcal{H} est un espace de représentation de G . Puisque les trajectoires classiques sont définies dans un espace muni d'une structure symplectique (à savoir un espace de phase), la limite classique ne peut se produire que si une telle structure peut émerger du système quantique en question. C'est la raison pour la quelle il faut se doter d'un moyen pour construire une géométrie qui provient de l'espace de Hilbert, et doit posséder la structure symplectique nécessaire. Le formalisme des états cohérents fournit ce moyen de correspondance quantique-classique. On considère l'espace $p \subset g$ engendré par les opérateurs d'excitation élémentaires et de leurs conjugués, $\{t_i^\pm\} \subset \{t_i\}$. La variété différentielle associée est obtenue par exponentiation comme suit [16, 17] :

$$\sum_i (z_i t_i^+ - \bar{z}_i t_i^-) \rightarrow \Omega = \exp \left(\sum_i z_i t_i^+ - \bar{z}_i t_i^- \right)$$

où les paramètres z_i sont des nombres complexes et Ω est un élément de l'espace quotient G/H avec H le groupe de stabilité de l'état fondamental du système considéré, qu'on note ici par $|0\rangle$ pour faire simple. G/H est la variété géométrique associée à l'espace de Hilbert à la limite semi classique. Cela peut se voir à l'aide des états cohérents généralisés de G qui sont définis par :

$$|\Omega\rangle = \Omega |0\rangle$$

et qui offrent une base continue pour engendrer l'espace de Hilbert. Afin de déduire la limite classique, on utilise la notion du produit star. On associe à chaque observable A agissant dans \mathcal{H} , une fonction analytique \mathcal{A} , qui dépend des variables complexes z_i , définie par la valeur moyenne dans l'état cohérent $|\Omega\rangle$:

$$\mathcal{A} = \langle \Omega | A | \Omega \rangle.$$

Le produit star est défini par [18, 19] :

$$\mathcal{A} \star \mathcal{B} = \langle \Omega | AB | \Omega \rangle,$$

et donc le commutateur de deux opérateurs est représenté par le crochet de Moyal donné par :

$$\{\mathcal{A}, \mathcal{B}\}_* := \mathcal{A} \star \mathcal{B} - \mathcal{B} \star \mathcal{A} = \langle \Omega | [\mathcal{A}, \mathcal{B}] | \Omega \rangle.$$

Le produit star est la version non commutative du produit usuel de fonctions et le crochet de Moyal conduit au crochet de Poisson à la limite classique. Ce schéma faisant appel au formalisme des états cohérents et du produit star de Moyal permet de comprendre la transition quantique-classique. Toutefois, il faut signaler que cette correspondance est vite perdue car le crochet de Moyal contient des termes exponentiels en \hbar [20, 21]. Il s'en suit que le formalisme des états cohérents bien qu'il permet de comprendre de manière qualitative le passage quantique-classique, il ne rend pas compte de façon quantitative de la dégradation des corrélations quantiques et donc de la décohérence dans les systèmes quantiques. D'où la nécessité d'une approche quantitative. Cette question est brièvement discutée dans le paragraphe qui va suivre. Pour clore ce paragraphe, on note que la géométrie symplectique fournit aussi les outils mathématiques pour décider si un état quantique est intriqué ou séparable. En effet, en considérant l'action

des groupes unitaires (groupes de jauge qui ne modifient pas les corrélations) sur les états de systèmes multipartites, on peut engendrer des orbites qui regroupent des états de même intrication. En particulier, on peut montrer que les orbites correspondant aux états séparables sont munies d'une structure Kahlerienne, tandis que les orbites générées à partir des états intriqués sont caractérisées par différents degrés de dégénérescence de la forme symplectique canonique sur l'espace projectif complexe. Il en ressort que ce degré de dégénérescence peut être ainsi utilisé comme une mesure géométrique de l'intrication pour les systèmes quantiques comportant plusieurs particules.

4.2. Décohérence

L'application du principe de superposition au monde macroscopique semble impliquer des conséquences en contradiction avec notre perception des systèmes physiques. On ne peut pas trouver un objet macroscopique dans deux endroits différents et donc il est difficile de concevoir qu'il soit suspendu entre deux réalités complètement distinctes. Historiquement, il y avait plusieurs tentatives pour faire face à ce problème. Bohr avait proposé de tracer une limite entre les objets quantiques (atomes, électrons...) et les objets classiques (appareils de mesure, observateurs...) et de suspendre le principe de superposition pour les objets classiques. Cette proposition se heurte toutefois à la question suivante : où placer la limite, est-elle fixe, comment est-elle définie? En principe, tout système physique est formé de constituants aux propriétés quantiques et doit être décrit par les lois de la physique quantique. D'autre part, des expériences réalisées sur des systèmes de tailles de plus en plus grandes permettent l'observation des phénomènes d'interférence et confirment l'existence d'états en superposition. A ce titre, on peut citer les expériences d'interférométrie sur des molécules de tailles relativement importantes (fullerènes C_{60} , molécules C_{70} , fluofullerènes $C_{60}F_{48}$, molécules organiques $C_{44}H_{30}N_4$). Partant de ce constant expérimental irréfutable, il semble difficile de tracer une limite entre les mondes microscopique et macroscopique et par conséquent la proposition de Bohr d'introduire une limite entre les ces «deux mondes» ne paraît pas satisfaisante. Il en découle que les structures intrinsèques probabilistiques et les corrélations non locales de la réalité quantique semblent incompatibles avec le monde classique. Néanmoins, beaucoup de progrès a été achevé ces dernières années grâce à la théorie de la décohérence. Dans le cadre de cette approche, on considère la partition du système total en deux parties : le système S et son environnement \mathcal{E} . La densité réduite est obtenue en effectuant une somme sur tous les degrés de liberté de l'environnement $\rho_S = \text{Tr}_{\mathcal{E}} \rho$ où ρ est l'opérateur densité de tout le système. Il faut noter que même lorsque ρ suit une loi d'évolution unitaire, obéissant à l'équation de Liouville-von Neumann, la densité réduite évolue de manière non unitaire. Le caractère irréversible de l'évolution de ρ_S est due à deux différents processus. D'une part, il existe un ensemble d'états de S appelés états privilégiés, qui définit une base propre $\{|j(t)\rangle\}$ de ρ_S après un temps de décohérence t_d . D'autre part, l'évolution du système S atteint une phase stationnaire après un temps de relaxation $t_r \gg t_d$. Aussi, on définit la décohérence comme l'évolution non unitaire de ρ_S vers un état qui est diagonal dans une base privilégiée $\{|j(t)\rangle\}$ pour $t > t_d$, et la relaxation comme l'évolution non unitaire de ρ_S vers un état d'équilibre ρ_* , au bout d'un temps de relaxation t_r , qui est diagonal dans la base dite de relaxation $\{|i_\star\rangle\}$. Schématiquement, le système S évolue comme suit :

$$\rho_S \rightarrow \rho_{PS} \rightarrow \rho_{S*}$$

où ρ_{PS} est l'état privilégié qui décrit le système après décohérence. Les états privilégiés sont les meilleurs candidats qui constituent l'ensemble des états quasi-classiques au même

titre que les états cohérents introduits auparavant. En fait, leurs corrélations sont moins affectées par l'intrication avec l'environnement. Pour introduire la définition générale de la base privilégiée, nous admettons que tous les modes de décroissance due à l'évolution non unitaire du système s'obtiennent par la technique de prolongement analytique du Hamiltonien. Le prolongement analytique complexe du spectre de \mathcal{S} est donné par :

$$z_i = \omega_i - \frac{i}{2}\gamma_i$$

où les ω_i sont les niveaux d'énergie du système et les fréquences de décroissance sont notées par γ_i . On note par $\tau_i = \frac{\hbar}{\gamma_i}$ le temps de décroissance caractéristique de chaque mode. En négligeant les temps assez longs, on peut montrer que la valeur moyenne d'une observable O_S du système s'écrit :

$$\langle O_S \rangle = \text{Tr}(\rho_S O_S) = \text{Tr}(\rho_{S\star} O_S) + \sum_{i=0}^N a_i(t) \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\hbar} t\right)$$

où la somme est restreinte aux N modes dont la contribution ne peut être négligée, $\rho_{S\star}$ est l'état d'équilibre du système et les quantités $a_i(t)$ sont des fonctions oscillantes que l'on peut calculer à partir des données initiales du système. Si on note par γ_0 la valeur minimale des γ_i , le temps de relaxation est donc donné par :

$$t_r = \frac{\hbar}{\gamma_0}.$$

Pour introduire la base des états privilégiés, nous ordonnons les N modes de la manière suivante :

$$\gamma_0 < \gamma_1 < \dots < \gamma_N,$$

et on définit le temps de décohérence par :

$$t_d = \frac{\hbar}{\gamma_{\text{eff}}} \quad \text{avec} \quad \gamma_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=0}^N a_i(0) \gamma_i}{\sum_{i=0}^N a_i(0)}.$$

La quantité γ_{eff} est le mode effectif défini de sorte que les modes tels que $\gamma_i < \gamma_{\text{eff}}$ pour $0 < i < M \leq N$ sont les modes lents. En adoptant ce schéma, on peut aisément montrer que :

$$\rho_{\mathcal{P}\mathcal{S}} = \rho_{S\star} + \sum_{i=0}^M A_i(t) \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\hbar} t\right)$$

avec $A_i(t)$ est l'observable associée à la fonction $a_i(t)$ selon le schéma de correspondance discutée dans le paragraphe précédent. La décomposition de Schmidt permet d'avoir une base propre qui diagonalise $\rho_{\mathcal{P}\mathcal{S}}$ (base privilégiée) :

$$\rho_{\mathcal{P}\mathcal{S}} = \sum_i p_i(t) |i_{\mathcal{P}\mathcal{S}}\rangle \langle i_{\mathcal{P}\mathcal{S}}|.$$

Il en découle que pour $t > t_d$, les modes rapides de l'évolution unitaire de ρ_S deviennent négligeables et les modes des états privilégiés convergent vers les modes propres du système ρ_S quand $t > t_d$:

$$\rho_S \approx \rho_{p_S}$$

et la densité ρ_S devient pratiquement diagonale dans la base dite privilégiée. Il est clair que l'intrication qui se crée entre le système et son environnement détruit la cohérence d'une superposition d'états quasi-classiques. Un bit quantique perd sa cohérence en un temps très court par rapport au temps caractéristique de relaxation. Le phénomène de décohérence n'est pas fondamental. Bien au contraire, cette transition quantique-classique est la résultante du couplage du système avec l'extérieur qui met un certain temps pour se produire. Du coup, il «suffit» de mettre en oeuvre des stratégies pour contrôler ce processus afin d'envisager l'exploitation de l'intrication dans le domaine de l'information quantique (voir par exemple [22, 23]). Les travaux réalisés par l'équipe de Serge Haroche de l'Ecole Normale Supérieure de Paris avec des atomes dans des cavités piégeant des photons micro-ondes (électrodynamique quantique en cavité) ont mis au point des expériences qui minimisent les effets de la décohérence. Des résultats similaires ont été obtenus par le groupe dirigé par David Wineland au laboratoire du NIST à Boulder (Colorado) avec des ions confinés dans des pièges à très basse température. Enfin, il est important de noter que les codes correcteurs d'erreurs constituent également un moyen fort prometteur pour vaincre la décohérence. Ils fournissent un outil pour la protection de la cohérence d'un système de qubits en n'observant que le système au lieu de contrôler l'environnement. Le principe de ces méthodes est similaire à la correction d'erreurs des ordinateurs classiques. Il consiste à détecter les effets de la décohérence et utiliser les résultats de cette détection pour compenser la perte de la cohérence du système. Ce type de stratégies pour vaincre la décohérence sont indispensables pour le traitement quantique de l'information qui a besoin du principe de superposition. L'avenir de l'information quantique dépendra essentiellement de la capacité de réaliser et contrôler expérimentalement la superposition de plusieurs bits quantiques en même temps.

Références :

- [1] M.A. Nielsen and I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2000).
- [2] V. Vedral, Rev. Mod. Phys. **74** (2002) 197.
- [3] R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki and K. Horodecki, Rev. Mod. Phys. **81** (2009) 865.
- [4] O. Guhne and G. Tóth, Phys. Rep. **474** (2009) 1.
- [5] C.H Bennett and G. Brassard, *Quantum cryptography : Public key distribution and coin tossing*, Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, pp. 175-179 (1984).
- [6] D. Deutsch and R. Jozsa, Rapid solutions of problems by quantum computation, Proceedings of the Royal Society of London A **439** (1992) 553.
- [7] L.K. Grover, *A fast quantum mechanical algorithm for database search*, Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (1996) 212.

- [8] J.M. Raimond, M. Brune and S Haroche, *Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity*, Reviews of Modern Physics (2001).
- [9] S. Haroche and J.M. Raimond, *Exploring the quantum: atoms, cavities and photons*, Oxford University Press (2006).
- [10] D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe and D. Wineland, *Quantum dynamics of single trapped ions*, Rev. Mod. Phys. **75** (2003) 281.
- [11] W.H. Zurek, *Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical*, Rev. Mod. Phys. **75** (2003) 715.
- [12] W.K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 2245.
- [13] C. E. Shannon, *A Mathematical Theory of Communication*, The Bell System Technical Journal, **27** (1948) pp. 379-423, 623-656.
- [14] M. Daoud and R. Ahl Laamara, International Journal of Quantum Information **10** (2012) 1250060.
- [15] M. Daoud and R. Ahl Laamara, Phys. Lett. A **376** (2012) 2361.
- [16] M. Daoud and M.R. Kibler, J. Phys. A: Math. Theor. **43** (2010) 115303.
- [17] M. Daoud and M.R. Kibler, J. Phys. A: Math. Theor. **45** (2012) 244036.
- [18] M. Daoud, Nucl. Phys. B **764** (2007) 109.
- [19] M. Daoud, Phys. Lett. A **309** (2003) 167.
- [20] M. Daoud, Rep. Math. Phys **52** (2003) 281.
- [21] M. Daoud et al, Int. J. Mod. Phys. A **25** (2010) 3675.
- [22] M. Daoud and R. Ahl Laamara, J. Phys. A: Math. Theor. **45** (2012) 325302.
- [23] M. Daoud et al, J. Phys. A: Math. Theor. **44** (2011) 325301.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Merci Pr. Daoud. On laisse les questions pour la fin et on continue avec la présentation du Pr. Hermann de Zürich.

PACKING OF WIRES IN CAVITIES AND GROWING SURFACES

Pr. Hans HERMANN

*Swiss Federal Institute of Technology
(ETH) - Zurich, SWITZERLAND*



Abstract

We investigate the morphologies and maximum packing density of thin wires packed into spherical cavities. Using simulations and experiments with nylon lines, we find that ordered as well as disordered structures emerge, depending on the amount of internal torsion. We find that the highest packing densities are achieved in a low torsion packing for large systems, but in a high torsion packing for small systems. An analysis of both situations is given in terms of energetics and comparison is made to analytical models of DNA packing in viral capsids. In two dimensions we also find that wires can crumple into different morphologies and present the associated morphological phase diagram. Our results are based on experiments with different metallic wires and confirmed by numerical simulations using a discrete element model. We show that during crumpling, the number of loops increases according to a power-law with different exponents in each morphology. Furthermore, we observe a power-law divergence of the structure's bulk stiffness similar to what is observed in forced crumpling of a membrane. We also investigate the morphology of thin discs and rings growing in circumferential direction. Recent analytical results suggest that this growth produces symmetric excess cones (e-cones). We study the stability of such solutions considering self-contact and bending stress. We show that, contrary to what was assumed in previous analytical solutions, beyond a critical growth factor, no symmetric e-cone solution is energetically minimal any more. Instead, we obtain skewed e-cone solutions having lower energy, characterized by a skewness angle and repetitive spiral winding with increasing growth.

These results are generalized to discs with varying thickness and rings with holes of different radii. Simple experiments with cardboard confirm the simulations.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Merci Pr. Hermann pour le respect du temps et pour la qualité de la présentation. Maintenant la parole est au Pr. Benyoussef, membre résident de l'Académie Hassan II, pour nous parler des nouveaux matériaux pour la spintronique qui est une nouvelle génération de microélectronique.

NOUVELLES FONCTIONNALITÉS ET APPLICATIONS DE MATÉRIAUX POUR LA SPINTRONIQUE

Pr. Abdelilah BENYOUSSEF

*Laboratoire de Magnétisme et Physique des Hautes
Energies, Département de Physique, Faculté des
sciences, Université Mohammed V-Agdal
Membre Résident de l'Académie Hassan II des
Sciences et Techniques Rabat, Maroc*



Résumé

Des découvertes récentes ont fait émerger une nouvelle classe d'électronique «l'électronique de spin ou la spintronique», qui utilise le spin de l'électron au lieu de sa charge pour créer des courants polarisés. La spintronique, connaît actuellement un développement extraordinaire, avec la fabrication de dispositifs nanométriques basés sur des matériaux ferromagnétiques et des semiconducteurs. Leurs applications sont nombreuses, allant de l'enregistrement, l'électronique, l'optoélectronique à l'information quantique.

La découverte de la magnétorésistance géante GMR, en 1988 par Albert Fert et Peter Grünberg (Prix Nobel de physique 2007), est considérée comme le point de départ de la spintronique. La GMR est basée sur la variation du courant électrique en présence d'un champ magnétique. En effet, dans la GMR le courant circule dans une couche métallique comprise entre deux couches magnétiques d'aimantations parallèles. Alors que dans la magnétorésistance à effet tunnel TMR, le courant circule perpendiculairement aux couches par effet tunnel à travers une barrière isolante.

L'électronique de spin a apporté une contribution importante à la miniaturisation recherchée pour l'électronique, elle utilise des composants nanométriques pour traiter et stocker l'information. Cependant, les limites de la miniaturisation à l'échelle nanométrique sont connues et il devient impératif de trouver de nouvelles voies et de nouveaux matériaux pour dépasser ces limites.

Les propriétés les plus recherchées, pour ces matériaux, sont une forte polarisation en spin, des propriétés magnétiques modulables par un champ électrique et une longue durée de vie de la polarisation en spin.

Parmi les nouveaux matériaux prometteurs, nous citons; les semi-conducteurs magnétiques dilués, qui donnent aux semi-conducteurs conventionnels de nouvelles propriétés magnétiques, les oxydes fonctionnels, y compris les demi-métaux et les multiferroïques, et les semi-conducteurs organiques.

I. Introduction

La spintronique est une nouvelle génération d'électronique qui a apporté et qui continue à apporter beaucoup de progrès dans le stockage de l'information, ceci est dû à la découverte de nouveaux matériaux avec de nouvelles fonctionnalités et de multiples applications. La Spintronique englobe un domaine en constante évolution; l'électronique magnétique. Il s'agit d'une discipline appliquée très prometteuse, la plupart des recherches qu'elle prend en charge, sont au centre de la base physique de la matière condensée. Elle est multidisciplinaire car elle englobe; électronique, magnétisme, physique des semiconducteurs, physique nanométrique, optique et Supraconductivité.

La Spintronique, ou l'électronique de spin, porte sur l'étude du contrôle actif et la manipulation des degrés de liberté de spin de l'électron dans des systèmes à l'état solide. L'accent est mis sur les principes de base qui sous-tendent la génération physique de la polarisation de spin des porteurs, de la dynamique de spin et du transport polarisé en spin dans les semiconducteurs et les métaux. Il s'agit de comprendre l'interaction entre le spin de la particule et son environnement semi-conducteur et la dynamique et la relaxation du spin. Le transport de spin diffère du transport de charge en ce que le spin est une quantité non conservée dans les solides en raison du couplage spin-orbite et du couplage hyperfin. Parmi les questions typiques posées dans ce domaine, on cite notamment : Comment peut-on polariser efficacement un système de spins? Combien de temps le système est capable de garder son orientation de spin? Comment peut-on détecter la polarisation de spin?

La polarisation de spin signifie la création d'une population de spin hors équilibre. En général, lorsque le courant conduit des électrons à spins polarisés de l'électrode au matériau, il y a une accumulation de spin. Cette accumulation dépend de la relaxation de spin, dont le mécanisme vient souvent du couplage spin orbite. L'échelle du temps de relaxation de spin dans les systèmes électroniques est en nanosecondes.

La naissance de la spintronique est associée à la découverte de la magnétorésistance géante (GMR en anglais) dans des multicouches métalliques en 1988 par Albert Fert et Peter Grunberg, qui ont reçu le prix Nobel de physique en 2007. La GMR est basée sur la variation du courant électrique en présence d'un champ magnétique. En effet, dans la GMR le courant circule dans une couche métallique comprise entre deux couches magnétiques d'aimantations parallèles. Alors que dans la magnétorésistance à effet tunnel TMR, le courant circule perpendiculairement aux couches par effet tunnel à travers une barrière isolante.

Historiquement, la magnétorésistance anisotrope (AMR) a été découverte, en premier par Lord Kelvin (Thomson, 1857), dans des matériaux ferromagnétiques massifs, tels que le Fe et Ni. En raison de l'interaction spin-orbite, la résistivité électrique change avec la direction relative du courant de charge (par exemple, parallèle ou perpendiculaire) par rapport à la direction de l'aimantation.

Dans un travail pionnier, Mott (1936) a expliqué le comportement de la résistance dans les métaux ferromagnétiques par un modèle à deux courants. Albert Fert et Campbell (1968) ont confirmé la proposition de Mott et ont montré que la résistivité du fer et du nickel, dopés par divers types d'impuretés ainsi que des alliages ternaires pour certains dopages, dépend de la température. La mobilité pouvait être très différente pour les électrons de spin « up » et de spin « down ».

La magnétorésistance géante est constituée de couches magnétiques séparées par des couches non magnétiques. Les premières observations de ce phénomène sur des multicouches Fe/Cr(001) ont été faites par Albert Fert (Baibich et al. 1988), il a trouvé que la résistance, mesurée pour un courant parallèle aux couches, chute quand un champ magnétique aligne les aimantations. En fait, lorsque les aimantations des couches magnétiques sont parallèles, les électrons d'une direction de spin peuvent traverser facilement toutes les couches magnétiques ceci conduit à une faible valeur de la résistance. Par contre, lorsque les aimantations des couches magnétiques sont antiparallèles, les électrons de chaque canal sont ralentis une fois sur deux en traversant les couches magnétiques, et la résistance est élevée. Cependant, selon les équations de transport cet effet ne peut être observé que si la distance entre les couches magnétiques est inférieure au « libre parcours moyen » des électrons, c'est-à-dire, quelques nanomètres. Ainsi, le rapport de la magnétorésistance dépend de l'épaisseur de la couche non magnétique qui sépare les couches magnétiques.

Dans la magnétorésistance tunnel (TMR) la conduction se fait par effet tunnel quantique, lorsqu'un courant perpendiculaire circule entre deux couches magnétiques séparées par une barrière isolante ultramince. De manière analogue à la GMR, le transfert des électrons par effet tunnel peut être considéré comme formé de deux parties indépendantes ; le transfert tunnel des électrons de spin-up et celui des spin-down. Le courant tunnel dépend des densités des états des deux électrodes et des couplages. Le courant tunnel est élevé lorsque les conducteurs ferromagnétiques sont parallèles (faible résistance) et bas lorsqu'ils sont antiparallèles (haute résistance). L'effet TMR dépend de la polarisation de spin du matériau ferromagnétique, qui pour les métaux de transition conduit à un taux de TMR de 50-70%. Cependant, comme cela a été prévu théoriquement et observé plus tard expérimentalement, un filtrage tunnel plus performant des électrons par des barrières d'oxyde a conduit à des taux de TMR dépassant 500%.

La manipulation des couches magnétiques par un courant électrique polarisé s'appelle effet du couple de transfert de spin. Dans ce cas, un courant de transport peut faire pivoter l'une des couches magnétiques d'une structure formée de trois couches. Le couple de spin est généré par le transfert du moment cinétique du courant polarisé à l'aimantation de la couche libre. Il peut s'opposer à l'amortissement intrinsèque de la couche magnétique ; excitant les ondes de spin et inversant, pour des courants suffisamment forts, la direction de l'aimantation. Ces effets ont été prédits par Slonczewski (1996) et Berger (1996) et ont été observés expérimentalement à partir de 1998 par Tsoi et al. (1998).

II. Nouvelles fonctionnalités en électronique de spin

De nouvelles fonctionnalités, qui ne sont pas possibles ou inefficaces dans l'électronique conventionnelle, peuvent être créées, dans l'électronique de spin, pour contrôler la dynamique de spin et de charge à travers l'utilisation de champs magnétiques. En plus, des phénomènes récents qui permettent à des fonctionnalités spintroniques de prévaloir en l'absence de champs magnétiques extérieurs voient le jour, comme l'effet du champ électrique externe, de la lumière ou du courant polarisé en spin.

En effet, l'un des développements les plus passionnants de ces dernières années a été la démonstration de la commutation des moments magnétiques par des courants polarisés en spin, par des champs électriques ou par des champs photoniques. Ces phénomènes auront probablement un impact technologique important dans un proche avenir.

Un courant électrique polarisé en spin peut être utilisé pour faire basculer l'aimantation d'un élément de mémoire nanométrique, par un effet de couple produit par le transfert de spin. Les moments magnétiques sont créés par le moment angulaire des porteurs de charge en déplacement, et ainsi des couples s'appliquent pour fournir ou extraire le moment angulaire nécessaire pour changer l'état magnétique du matériau traversé par le courant polarisé. Néanmoins, il existe d'autres couples, Miron et al. (2010), ont montré qu'un couple supplémentaire, en raison du couplage spin-orbite de Rashba, peut inverser l'aimantation sous l'influence d'un courant. L'utilisation de courant polarisé en spin permettra de réduire le temps nécessaire pour changer l'état de l'aimantation, ceci signifie l'augmentation de la vitesse avec laquelle l'information peut être traitée, donc l'augmentation des performances des dispositifs spintroniques. Le couple de transfert de spin, a été largement étudié théoriquement et expérimentalement (Bazaliy et al. 1998; Myers et al. 1999; Stiles et Zangwill, 2002; Sun, 2000; Tsoi et al, 1998; Waintal et al, 2000).

L'aimantation a été aussi contrôlée optiquement (par la lumière) (Boukari et al, 2002; Koshihara et al, 1997; Oiwa et al, 2002) et électriquement (en appliquant une tension de grille) (Boukari et al, 2002; Ohno et al, 2000a; Park et al, 2002) pour effectuer le passage de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique, dans le cas des semi-conducteurs ferromagnétiques. Dans un semi-conducteur, des électrons et des trous, polarisés en spin, photo-excités existent pendant un certain temps avant qu'ils ne se recombinent. Si une fraction de l'orientation initiale des porteurs survit plus longtemps que le temps de recombinaison, la luminescence (rayonnement de recombinaison) sera partiellement polarisée. En mesurant la polarisation circulaire de la luminescence, il est possible d'étudier la dynamique de spin des porteurs hors équilibre dans les semiconducteurs (Oestreich et al. 2002) et d'extraire des quantités utiles comme l'orientation du spin, le temps de recombinaison, ou le temps de relaxation de spin des porteurs (Ekimov et Safarov, 1970; Garbuzov et al, 1971). L'aimantation peut aussi être renversée par des impulsions lumineuses ultra-rapides d'un laser pulsé, circulairement polarisé. Lors de ce procédé, le système de spin est chauffé à une température proche de la température de transition, ce qui permet le renversement de l'aimantation par effet Faraday. Ce phénomène a été observé, par exemple, dans des alliages amorphes ferrimagnétiques en couches minces, GdFeCo, et des perovskites antiferromagnétiques cantés, HoFeO₃.

D'autres fonctionnalités ont vu le jour. En effet, L'Effet Hall de Spin (EHS), prédit théoriquement par D'yakanov et Perel en 1971, a été observé pour la première fois expérimentalement par Kato et al. 2004. C'est la séparation des courants de spin-up et spin-down le long des bords opposés d'une nanostructure (ou structure méso-échelle) induite par un champ transverse dû à l'interaction spin-orbite. L'Effet Hall de Spin inverse (EHSI) c'est lorsqu'un courant de spin induit un courant transverse de charge produisant une accumulation de charge. L'importance deEHSI et EHS c'est qu'ils offrent la possibilité de convertir réversiblement le courant de charge en courant de spin et vis versa.

L'Effet Hall quantique de spin (EHQS) est un état de la matière qui existe spécialement dans des semiconducteurs, à deux dimensions, qui ont une conductance Hall de spin quantifiée et une conductance Hall de charge nulle (Kane and Mele 2005). L'importance de l'EHQS et des isolants topologiques vient du fait qu'ils conduisent à une absence de dissipation du courant à la surface et aux bords des matériaux. Les isolants topologique sont des matériaux qui se comportent comme des isolants à l'intérieur, mais dont la surface contient des états de conduction. Certains isolants topologiques présentent, en

présence du couplage spin orbite, l'effet Hall quantique de spin même en l'absence du champ magnétique, ceci conduit à l'existence d'un courant polarisé en spin à la surface et aux bords.

III. Applications de l'électronique de spin

Les applications les plus importantes de l'électronique de spin sont dans le domaine des technologies de l'information. Les dispositifs utilisant le phénomène d'électronique de spin ; têtes de lecture magnétique ou puces mémoire par exemple, sont également appelés dispositifs d'électronique de spin. Les têtes de lecture à magnétorésistance géante ont conduit à une forte augmentation de la densité d'information que l'on peut stocker dans des disques durs. En effet, l'impact commercial le plus important de la spintronique à ce jour est dans le domaine des vannes de spin magnétiques utilisées dans les lecteurs de disques durs. Ainsi, grâce à la sensibilité et la possibilité de miniaturisation des capteurs, la taille des inscriptions magnétiques a été fortement réduite et ainsi la capacité de stockage de l'information a augmenté de plusieurs ordres de grandeur, elle a dépassé les téraoctets depuis 2010.

Bien que de nombreuses applications existantes de la spintronique (Hartman (Ed.), 2000; Hirota et al., 2002) sont basées sur les effets GMR, la découverte de la Magnétorésistance à effet Tunnel TMR à la température ambiante (Miyazaki et Tezuka, 1995; Moodera et al., 1995) a permis un regain d'intérêt pour l'étude des jonctions tunnel magnétiques qui sont aujourd'hui à la base des prototypes de plusieurs mémoires magnétiques à accès aléatoire non volatiles (Magnetic Random Acces Memory MRAM) (Parkin et al., 1999; Tehrani et al., 2000). D'autres types de mémoires ont vu le jour, comme la mémoire à accès aléatoire à base de couple de transfert de spin et la mémoire à piste de course.

Les MRAM sont permanentes, contrairement aux mémoires vives actuelles à base de semi-conducteurs. Elles gardent l'information même lorsque l'ordinateur est éteint. Dans ces Mémoires, l'information («0» ou «1») est stockée dans les TMR ; «0» correspond à la configuration où les aimantations des électrodes ferromagnétiques sont parallèles, alors qu'elles sont antiparallèles pour «1». En 2009, NEC a fabriqué une MRAM de 32 Mo avec un temps d'accès de 12 ns en utilisant deux transistors et une multi-jonction tunnel par bit.

Les Mémoires à accès aléatoire à couple de transfert de spin (Spin Transfer Torque RAM (STTRAM)) ont été étudiées pour surmonter les problèmes rencontrés dans les MRAM; en particulier, la forte intensité du courant pour écrire et la grande taille des cellules. Le courant polarisé en spin, qui passe à travers les multi-jonctions tunnel constituant les STTRAM, produit un transfert de moment angulaire aux spins de la couche magnétique libre, causant ainsi son retournement (Kelly et al., 2003; Wegrowe et al., 1999; Albert et al., 2002; Katine et al., 2000; Urazhdin et al., 2003). Le mode de lecture dans les STTRAM est analogue à celui dans les MRAM, par contre le mode d'écriture dans les STTRAM est plus simple; il utilise un seul courant au lieu de deux pour les MRAM.

La spintronique a montré son efficacité pour le stockage magnétique, alors que son utilité pour les opérations logiques est encore à ses débuts. Les portes logiques électroniques réalisées dans les différents laboratoires n'utilisent le spin que comme un état interne variable: la reconversion en charge, impliquant l'amplification, empêche la concaténation directe de portes. Néanmoins, la perspective de succès peut permettre la réalisation d'ordinateurs conventionnels avec une architecture leur permettant d'être plus rapide,

plus dense et plus efficace. D'un autre côté, la spintronique peut ouvrir des opportunités complètement nouvelles, telles que la combinaison du stockage et des fonctions logiques dans le même dispositif, ce qui permet la construction d'un « processeur caméléon » qui peut se ré-optimiser constamment en fonction du calcul à faire.

Les nanopiliers magnétiques, sont des structures de jonction magnétique à effet tunnel dans lesquels circule le courant verticalement à travers un empilement de couches (Albert et al. 2002; Katine et al., 2000; Urazhdin et al., 2003). Ils sont aussi utilisés dans les supraconducteurs spintroniques (Albert et al 2002). La contrepartie naturelle des nanopiliers verticaux est le nanofil magnétique latéral (Kelly et al. 2003). Il est utilisé dans la mémoire à piste de course (Parkin et al. 2008) et pour la logique booléenne (Matsunaga et al. 2008), générée par un champ magnétique.

L'avenir de la technologie de l'information est intimement lié à l'informatique quantique. L'invention par Shor d'un algorithme quantique qui permet de factoriser un grand nombre premier en temps polynomial (en offrant la perspective de briser les codes de cryptage) a transformé la science de l'information quantique en l'un des domaines les plus dynamiques des sciences physiques (Bialczak et al. 2010). L'information quantique est représentée par des qubits (bits quantiques), qui sont des systèmes quantiques à deux niveaux. Le spin-1/2 de l'électron, utilisé en spintronique, est un exemple typique (Neeley et al. 2010).

IV. Matériaux pour l'électronique de spin

La Spintronique peut être divisée en deux domaines distincts: la spintronique des semi-conducteurs et la spintronique métallique. Le premier a connu un fort développement en science fondamentale, mais le chemin vers les applications est encore long. Alors que dans le domaine de l'électronique de spin métallique, il ya eu une multitude d'applications extrêmement importantes, dont la première est les capteurs à vanne de spin pour les disques magnétiques, qui ont été dépassés au cours des dernières années par des dispositifs connexes sur la base des mêmes concepts d'ingénierie de spin, mais utilisant l'effet tunnel dépendant du spin.

Les recherches en électronique de spin se sont d'abord concentrées sur les multicouches métalliques au début des années 1990 puis se sont étendues à des types très divers d'hétérostructures qui associent des matériaux magnétiques, non seulement à des métaux mais aussi à des isolants ou des semi-conducteurs. En effet, la recherche évolue aujourd'hui vers les nanodispositifs hybrides associant des matériaux semiconducteurs et ferromagnétiques.

Le développement de la spintronique des semi-conducteurs s'est orienté vers trois types de matériaux ; i- les semi-conducteurs magnétiques dilués ; se sont des semi-conducteurs qui acquièrent des propriétés magnétiques via un dopage par des éléments magnétiques (Sato et al. 2003, Mounkachi et al. 2009, Salmani et al. 2011, Zaari et al. 2013) ii- les oxydes fonctionnels, y compris les oxydes magnétiques dilués et les multiferroïques (Coe 2005 et 2010), iii- les semi-conducteurs organiques (Dediu et al. 2009).

Les semi-conducteurs magnétiques dilués, se sont développés pour répondre au besoin de fabriquer des dispositifs spintroniques «tout semi-conducteur», avec la possibilité de stocker et traiter l'information dans le même dispositif. Des semi-conducteurs, comme le silicium et le germanium, l'arséniure de gallium GaAs, le nitrure de gallium GaN, peuvent être dopés par des métaux de transition, par exemple Mn, Fe ou Co, pour exhiber

la phase ferromagnétique (Mounkachi et al. 2009, Zaari et al. 2013, Salmani et al. 2011) Figure 1. Les recherches actuelles portent sur l'augmentation de la température de Curie en améliorant la qualité d'un matériau donné, ou en cherchant des matériaux plus favorables. On note que la température critique augmente régulièrement avec la proportion du métal de transition correctement incorporé en substitution du cation du semi-conducteur.

Les oxydes fonctionnels, apportent de nouvelles fonctionnalités et optimisent d'autres dans des hétérostructures pour l'électronique de spin. Parmi les domaines de recherche actifs on cite ; i- Les oxydes magnétiques semi-conducteurs dilués ; où l'insertion d'impuretés magnétiques dans des oxydes semi-conducteurs génère un comportement ferromagnétique à la température ambiante. Ce comportement a été observé dans différents oxydes comme ZnO (Mounkachi et al. 2008) Figure 2, SnO₂ (Mounkachi et al. 2012) Figure 3, TiO₂ (Fakhim et al. 2010) Figure 4, ZrO₂ (Boujnah et al 2012), In₂O₃ ou HfO₂... Cependant, les mécanismes responsables du magnétisme dans ces matériaux ne sont pas tout à fait élucidés ; ils peuvent être, des défauts ou inhomogénéités, extrinsèques ou intrinsèques ii- Des matériaux ferro- ou ferri-magnétiques isolants, du type oxyde d'euporium, ferrites (El Moussaoui et al. 2012) et perovskites (Naji et al. 2012) ont été utilisés comme filtres de spin (Moodera et al. 2007). Les oxydes peuvent aussi présenter un comportement multiferroïque qui combine deux types d'ordres ferroïques parmi les trois ; ferro-élastique, ferro-électrique et ferromagnétique. La combinaison du caractère ferro-électrique et ferromagnétique permet d'avoir quatre états différents de résistance dans une jonction tunnel. La magnétorésistance tunnel observée dans ces jonctions est due à la polarisation en spin par le comportement ferromagnétique de la barrière tunnel (Gajek et al. 2007).

Les semi-conducteurs organiques sont constitués d'atomes légers. La polarisation en spin des porteurs de charge est préservée lors d'un transport diffusif d'électrons sur des distances de plusieurs microns, ceci est dû au faible couplage spin-orbite dans de tels matériaux (Dediu et al. 2009). L'utilisation des semi-conducteurs organiques en électronique de spin est un moyen prometteur pour la réalisation de circuits électroniques à base de spin, avec des supports flexibles. Et de réaliser aussi des dispositifs aux fonctionnalités multiples à partir des propriétés intrinsèques des molécules, et leurs réactions à des facteurs externes (lumière, champ magnétique).

Dans un cas extrême, des spins seraient complètement polarisés, même en l'absence de champ magnétique. L'existence de ces matériaux, les demi-métaux ferromagnétiques a été découvert par de Groot et al. (1983), et après par Pickett et Moodera (2001). Le défi consiste à préserver la polarisation de spin au-dessus de la température ambiante et dans des jonctions avec d'autres matériaux, puisque les propriétés magnétiques de la surface (interface) et du volume peuvent être sensiblement différents (Falicov et al. 1990; Fisher 1967; Mills 1971).

V. Demi- métaux en électronique de spin

Formellement, la polarisation en spin à 100% des porteurs de charge dans un demi-métal ferromagnétique est une situation hypothétique au zéro absolu en négligeant les interactions spin-orbite. Cependant, à basses températures, par rapport à la température de Curie, qui dépasse 1000 K pour certains demi-métaux et à faibles interactions spin-orbite, un demi-métal a un comportement sensiblement différent d'un matériau normal. La mesure la plus directe pour caractériser les demi-métaux est la technique d'annihilation

des positrons (Hanssen et Mijnders 1986), mais ce n'est pas une tâche facile, c'est une technique coûteuse. Le demi Heusler NiMnSb est l'un des premiers demi-métaux caractérisés (Hanssen et al. 1990). En raison de ces complications expérimentales, il n'est pas surprenant que des calculs de structures électroniques continuent à jouer un rôle important dans la recherche de nouveaux demi-métaux (Fakhim et al. 2010, Salmani et al. 2012), Figure 1, ainsi que dans l'introduction de nouveaux concepts comme le demi-métal antiferromagnétique (Moukachi et al. 2012).

Les demi-métaux forment une collection variée de matériaux avec des propriétés physiques et chimiques différentes et même l'origine de la demi-métallité peut être tout à fait distincte. En effet, l'origine de la bande interdite dans les demi-métaux doit être discutée en fonction de la nature du magnétisme ; fort ou faible. Dans les matériaux à magnétisme fort le moment magnétique ne croît pas avec l'augmentation du splitting d'échange. Ainsi la valeur du moment magnétique n'est pas déterminée par l'intensité de l'interaction d'échange, mais par la disponibilité des états électroniques. En pratique, ceci implique que c'est soit les spins minoritaires soit les spins majoritaires qui sont responsables du magnétisme. Les aimants faibles avec une bande interdite de spins minoritaires sont observés dans les alliages Heusler et les «Zinc blendes» artificiels. Par contre, les aimants faibles avec une bande interdite de spins majoritaires sont observés dans les doubles perovskites et la magnetite. Le dioxyde de Chrome est un exemple de demi-métal magnétique fort à magnétorésistance géante avec une bande interdite de spins minoritaires. le matériau Rb_4O_6 est un exemple de demi-métal magnétique fort avec une bande interdite de spins majoritaires.

Dans tous les métaux ferromagnétiques, l'interaction entre les électrons de conduction et les fluctuations de spin est d'une grande importance pour les propriétés physiques. En effet, la diffusion des porteurs de charge par les excitations magnétiques détermine les propriétés de transport des moments itinérants. A partir de ce point de vue, les demi-métaux, ainsi que les semiconducteurs ferromagnétiques, sont différents des métaux ferromagnétiques normaux par l'absence du retournement de spin (Auslender and Irkhin 1984; Irkhin and Katsnelson 1994).

Les demi-métaux à base de semi-conducteurs magnétiques dilués ont connu un grand essor ces dernières années. En effet, la polarisation en spin à 100% a été observée dans ZnO (Salmani et al. 2013), SnO_2 (Salmani et al. 2012), TiO_2 (Fakhim et al. 2010), ZrO_2 (Boujnah et al 2012), GaN (Salmani et al. 2011). Il a été montré que l'origine du comportement demi-métallique peut venir des défauts, en particulier l'oxygène en intersite ou en antisite (Khalil et al. 2011).

VI. Conclusions

L'électronique de spin est née avec la découverte de la magnétorésistance géante (GMR) sur des multicouches métalliques. Elle porte sur la manipulation et le contrôle des degrés de liberté de spin de l'électron dans les matériaux étudiés. La spintronique a apporté une contribution importante au stockage de l'information, ceci est dû à la découverte de nouveaux matériaux avec de nouvelles fonctionnalités et de multiples applications.

Les premières applications de la spintronique étaient les têtes de lecture des disques durs, suivies par les mémoires magnétiques à accès aléatoire, mémoires à accès aléatoire à base de couple de transfert de spin, et les mémoires à piste de course et d'autres types de

mémoires. Parmi les applications potentielles, les processeurs caméléons qui combinent le stockage de l'information et des fonctions logiques. L'avenir des applications de l'électronique de spin est dans la réalisation d'ordinateurs quantiques.

De nouvelles fonctionnalités, qui ne sont pas possibles ou inefficaces dans l'électronique conventionnelle, peuvent être créées pour contrôler la dynamique de spin et de charge à travers l'utilisation de champs électriques et magnétiques externes, la lumière ou le courant polarisé en spin. Ceci est devenu possible grâce à la découverte de nouveaux matériaux ; les semi-conducteurs magnétiques dilués, les oxydes fonctionnels et les semi-conducteurs organiques avec des comportements multiferroïques ou demi-métalliques.

VII. Références

- [1] Albert, F. J., N. C. Emley, E. B. Myers, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, 2002, "Quantitative study of magnetization reversal by spin-polarized current in magnetic multilayer nanopillars," *Phys. Rev. Lett.* 89, 226802.
- [2] Auslender, M. I., and V. Y. Irkhin, 1984, *Z. Phys. B: Condens. Matter* 56, 301.
- [3] Baibich, M.N., J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, Bialczak, R. C. et al. 2010 Quantum process tomography of a universal entangling gate implemented with Josephson phase qubits. *Nat. Phys.* 6, 409–413. (doi:10.1038/nphys1639).
- [4] Bazaliy et al, *Phys. Rev. B*, 57, R3213 (1998).
- [5] Berger, L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current. *Phys. Rev. B* 54, 9353–9358 (1996).
- [6] Binash, G., P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, *Phys. Rev. B* 39 (1989) 4828.
- [7] Boujnah, M., H. Labrim, K. Allam, A. Belhaj, A. Benyoussef, A. El Kenz, B. Belhorma, A. El Bouari ; *Supercond Nov Magn*, 2012, DOI 10.1007/s10948-012-1826-4.
- [8] Boukari, H., P. Kossacki, M. Bertolini, D. Ferrand, J. Cibert, S. Tatarenko, A. Wasiela, J. A. Gaj, and T. Dietl, 2002, "Light and electric field control of ferromagnetism in magnetic quantum structures," *Phys. Rev. Lett.* 88 , 207204.
- [9] Chazelas, J., *Phys. Rev. Lett.* 61(1988) 2472.
- [10] Coey, J.M.D., Dilute magnetic oxides, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 10 (2006) 83–92.
- [11] Coey, J. M. D., M. Venkatesan, and C. B. Fitzgerald, *Nature Mat.* 4 (2005) 173.
- [12] Coey, J. M. D., P. Stamenov, R. D. Gunning, M. Venkatesan, and K. Paul, *New J. Phys.* 12 (2010) 053025.
- [13] Dediu, V. A. et al., "Spin routes in organic semi-conductors", *Nature Mater.* 8 (2009) 707.
- [14] de Groot, R. A., Mueller, F. M., van Engen, P. G. & Buschow, K. H. J. 1983 New class of materials: half-metallic ferromagnets. *Phys. Rev. Lett.* 50, 2024–2027.
- [15] D'yakonov MI, Perel VI. 1971. *Phys. Lett.* 35:459–60.

- [16] D'yakanov, M. I. and V. I. Perel', Zh. Eksp. Teor. Fiz. 60, 1954 (1971) [Sov. Phys. JETP 33, 1053 (1971)].
- [17] Ekimov, A., V. Safarov, JETP Lett 12, 293 (1970)
- [18] El Moussaoui, H., R. Masrour, O. Mounkachi, M. Hamedoun, and A. Benyoussef. «Cation Distribution and Magnetic Interactions in Zn-Substituted Fe (Cu) Fe₂O₄ Ferrites.» Journal of Superconductivity and Novel Magnetism Volume 25, Number 7 (2012), 2473-2480.
- [19] Fakhim Lamrani, A., M. Belaiche, A. Benyoussef, A. El Kenz, E.H. Saidi,. Exchange mechanism of half-metallic ferromagnetism of TiO₂ doped with double impurities: A first- principles ASW study, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322 (2010) 454.
- [20] Falicov, L. M., D. T. Pierce, S. D. Bader, R. Gronsby, K. B. Hathaway, H. J. Hopster, D. N. Lambeth, S. S. P. Parkin, G. Prinz, M. Salamon, I. K. Schuller, and R. H. Victora, 1990, "Surface, interface, and thin-film magnetism," J. Mater. Res. 5, 1299–1340.
- [21] Fert, A., and I. A. Campbell, Phys. Rev. Lett. 21 (1968) 1190, J. Physique 32 (1971) C1-46, J. Phys. F 6 (1976) 849.
- [22] Fisher, M. E., 1967, "Interfacial, boundary, and size effects at critical points," Phys. Rev. Lett. 19, 169–172.
- [23] Gajek, M. et al., Nature Materials 6 (2007) 296.
- [24] Garbuzov, D., A. Ekimov, and V. Safarov, JETP Letters 13, 24 (1971).
- [25] Hanssen, K. E. H. M., and P. E. Mijnders, 1986, Phys. Rev. B 34, 5009.
- [26] Hanssen, K. E. H. M., P. E. Mijnders, L. P. L. M. Rabou, and K. H. J. Buschow, 1990, Phys. Rev. B 42, 1533.
- [27] Hartman (Ed.), U., 2000, Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance (Springer, Berlin).
- [28] Hirota, E., H. Sakakima, and K. Inomata, 2002, Giant Magneto-Resistance Devices (Springer, Berlin).
- [29] Irkhin, V. Y., and M. I. Katsnelson, 1994, Usp. Fiz. Nauk 164, 705, Phys. Usp. 37, 659, 1994.
- [30] Kane CL and Mele EJ. 2005. Phys. Rev. Lett. 95:146802.
- [31] Katine, J. A., F. J. Albert, R. A. Buhrman, E. B. Myers, and D. Ralph, 2000, "Current-driven magnetization reversal and spin-wave excitations in Co/Cu/Co pillars," Phys. Rev. Lett. 84, 3149–3152.
- [32] Kato, YK, Myers RC, Gossard AC, Awschalom DD. 2004. Science 306:1910–13.
- [33] Khalil, B., Labrim, H., Mounkachi, O., Belhorma, B., Benyoussef, A., El Kenz, A., Ntsoenzok, E. Origin of Magnetism from Native Point Defects in ZnO (2011) Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, pp. 1-6.
- [34] Kelly, D., J.-E. Wegrowe, T. k. Truong, X. Hoffer, and J.-P. Ansermet, 2003, "Spin-polarized current-induced magnetization reversal in single nanowires," Phys. Rev. B 68, 134425.

- [35] Koshihara, S., A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, S. Urano, H. Takagi, and H. Munekata, 1997, "Ferromagnetic order induced by photogenerated carriers in magnetic III-V semiconductor heterostructures of (In,Mn)As/GaSb," *Phys. Rev. Lett.* 78, 4617–4620.
- [36] Matsunaga S, Hayakawa J, Ikeda S, Miura K, Hasegawa H, et al. 2008. *Appl. Phys. Express* 1:091301.
- [37] Mills, D. L., 1971, "Surface effects in magnetic crystals near the ordering temperature," *Phys. Rev. B* 3, 3887.
- [38] Miron, I. M., Gaudin, G., Auffret, S., Rodmacq, B., Schuhl, A., Pizzini, S., Vogel, J. & Gambardella, P. 2010 Current-driven spin torque induced by the Rashba effect in a ferromagnetic metal layer. *Nat. Mater.* 9, 230–234.
- [39] Miyazaki, T., and N. Tezuka, 1995, "Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction," *J. Mag. Magn. Mater.* 139, L231–L234.
- [40] Moodera, J. S., L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, 1995, "Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions," *Phys. Rev. Lett.* 74, 3273–3276.
- [41] Moodera, J. S. et al., "The phenomena of spin-filter tunnelling", *J. Phys.: Condens. Matter* 19 (2007) 165202.
- [42] Mott, N. F., *Proc. Roy.Soc. A* 153 (1936) 699.
- [43] Mounkachi, O., A. Benyoussef, A. El Kenz, E.H. Saidi, E.K. Hlil ; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (2008) 2760-2765.
- [44] Myers et al., *Science* 285 867-870 1999.
- [45] Mounkachi, O., E. Salmani, H. El Moussaoui, M. Hamedoun, H. Ez-Zahraouy, A. Benyoussef ; *J Supercond Nov Magn*, 2012, DOI 10.1007/s10948-012-1585-2.
- [46] Mounkachi, O., A. Benyoussef, A. El Kenz, E.H. Saidi ; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321 (2009) 2402–2406.
- [47] Mounkachi, O., E. Salmani, H. El Moussaoui, M. Hamedoun, H. Ez-Zahraouy, and A. Benyoussef. «Ab-initio Calculation of Half-Metal Ferrimagnetic Sn 0.9 Mn 0.05 Co 0.05 O 2.» *Journal of superconductivity and novel magnetism* 2012, DOI: 10.1007/s10948-012-1711-1.
- [48] Nagaev, E. L., 1983, *Physics of Magnetic Semiconductors* (Mir, Moscow).
- [49] Naji, S., A. Benyoussef, A. El Kenz, H. Ez-Zahraouy, M. Loulidi, Monte Carlo study of phase transitions and magnetic properties of LaMnO₃: Heisenberg model(2012) *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391 (15), pp. 3885-3894.
- [50] Neeley, M. et al. 2010 Generation of three-qubit entangled states using superconducting phase qubits. *Nature* 467, 570–573. (doi:10.1038/nature09418).
- [51] Oestreich, M., M Bender, J Hübner, D Hägele, W W Rühle, Th Hartmann, P J Klar, W Heimbrot, M Lampalzer, K Volz and W Stolz, Spin injection, spin transport and spin coherence, 2002 *Semicond. Sci. Technol.* 17 285 doi:10.1088/0268-1242/17/4/302.
- [52] Oiwa, A., Y. Mitsumori, R. Moriya, T. Supinski, and H. Munekata, 2002, "Effect of optical spin injection on ferromagnetically coupled Mn spins in the III-V magnetic alloy semiconductor (Ga,Mn)As," *Phys. Rev. Lett.* 88, 137202.

- [53] Parkin, S. S. P., K. P. Roche, M. G. Samant, P. M. Rice, R. B. Beyers, R. E. Scheuerlein, E. J. O'Sullivan, S. L. Brown, J. Bucchigano, D. W. Abraham, Y. Lu, M. Rooks, et al., 1999, "Exchange-biased magnetic tunnel junctions and application to nonvolatile magnetic random access memory," *J. Appl. Phys.* 85, 5828–5833.
- [54] Parkin SSP, Hayashi M, Thomas L. 2008. *Science* 320:190–94.
- [55] Pickett, W. E. and J. S. Moodera, "Half metallic magnets", *Phys. Today* 54, 39 (2001).
- [56] Salmani, E., A. Benyoussef, H. Ez-Zahraouy, and E. H. Saidi; *Chin. Phys. B* Vol. 20, No. 8 (2011) 086601.
- [57] Salmani, E., Mounkachi, O., Ez-Zahraouy, H., Hamedoun, M., Benyoussef, A. Optical and magnetic properties of half-metallic (Zn, Mn)O behaviors with LDA and LDA-SIC approximations (2013) *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 26 (1), pp. 229-236.
- [58] Sato, K., P. H. Dederichs, H. Katayama-Yoshida, J. Kudrnovsky, *Physica B* 340–342 (2003) 863–869.
- [59] Slonczewski, J. Current-driven excitation of magnetic multilayers. *J. Magn. Magn. Mater.* 159, L1–L7 (1996).
- [60] Stiles, M. D., and A. Zangwill, 2002, "Anatomy of spin-transfer torque," *Phys. Rev. B* 66, 014407
- [61] Sun, J. Z., 2000, "Spin-current interaction with a monodomain magnetic body: A model study," *Phys. Rev. B* 62, 570–578.
- [62] Tehrani, S., B. Engel, J. M. Slaughter, E. Chen, M. De- Herrera, M. Durlam, P. Naji, R. Whig, J. Janesky, and J. Calder, 2000, "Recent developments in Magnetic Tunnel Junction MRAM," *IEEE Trans. Magn.* 36, 2752–2757.
- [63] Thomson, W. (1857). On the electro-dynamic qualities of metals, *Proc. R. Soc.*, Vol. 8, pp. 546- 50.
- [64] Tsoi, M., A. G. M. Jansen, J. Bass, W.-C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi, and P. Wyder, 1998, "Excitation of a magnetic multilayer by an electric current," *Phys. Rev. Lett.* 80 4281–4284; 81, 493 (1998).
- [65] Urazhdin, S., N. O. Birge, W. P. Pratt, Jr., and J. Bass, 2003, "Current-driven magnetic excitations in permalloy-based multilayer nanopillars," *Phys. Rev. Lett.* 91, 146803.
- [66] Waintal, X., E. B. Myers, P. W. Brouwer, and D. C. Ralph, 2000, "Role of spin-dependent interface scattering in generating current-induced torques in magnetic multilayers," *Phys. Rev. B* 62, 12317–12327.
- [67] Wegrowe, J. E., D. Kelly, Y. Jaccard, P. Guittienne, and J. P. Ansermet, 1999, "Current-induced magnetization reversal.
- [68] Zaari, H., M. Boujnah, A. El hachimi, A. Benyoussef, and A. El Kenz ; *Optical and Quantum Electronics*, 2013.

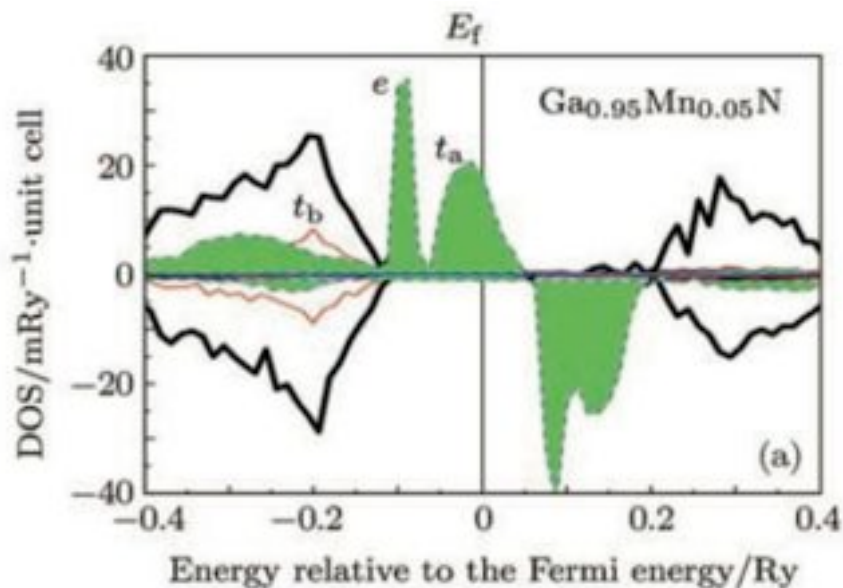


Figure 1: Densité d'états électroniques du semi-conducteur magnétique dilué $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{N}$ (Salmani et al. 2011)

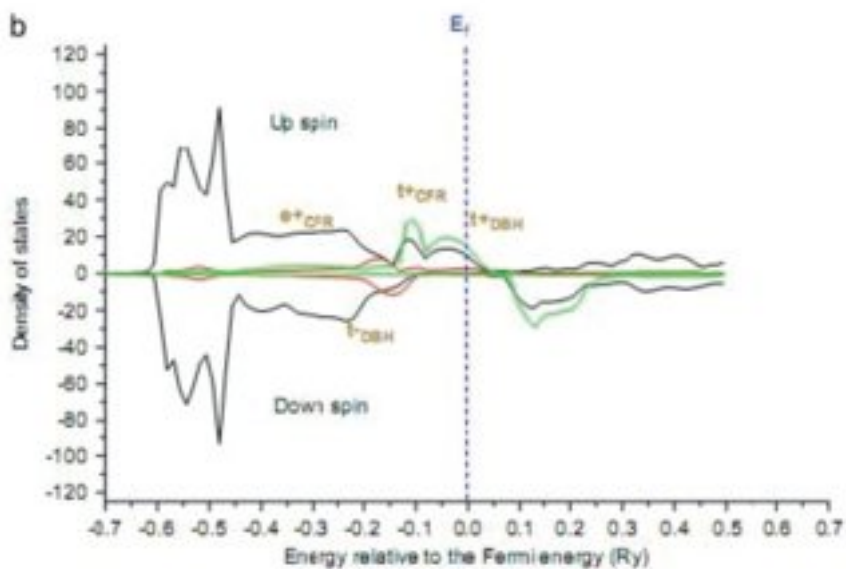


Figure 2 : Densité d'états électroniques total et partiel de l'oxyde magnétique dilué $\text{Zn}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_{0.9}\text{N}_{0.1}$; (Mounkachi et al. 2008)

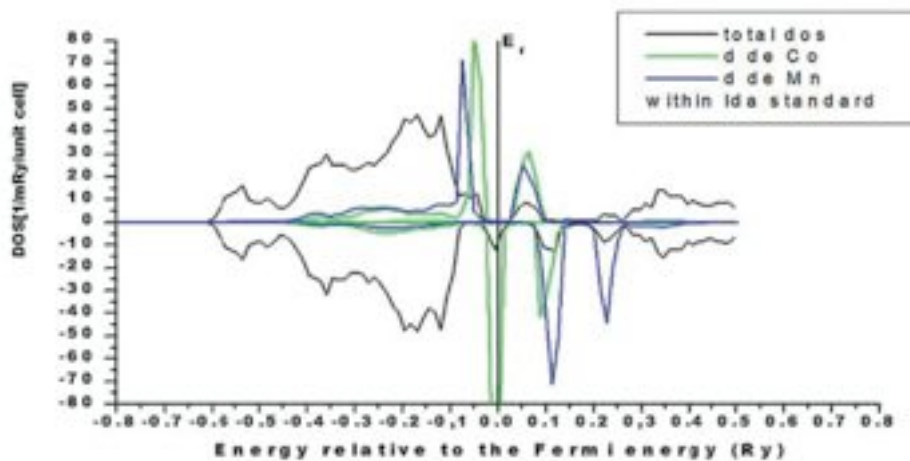


Figure 3 : Densité d'états électroniques de l'oxyde magnétique dilué $\text{Sn}_{0.9}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$: (Mounkachi et al. 2012)

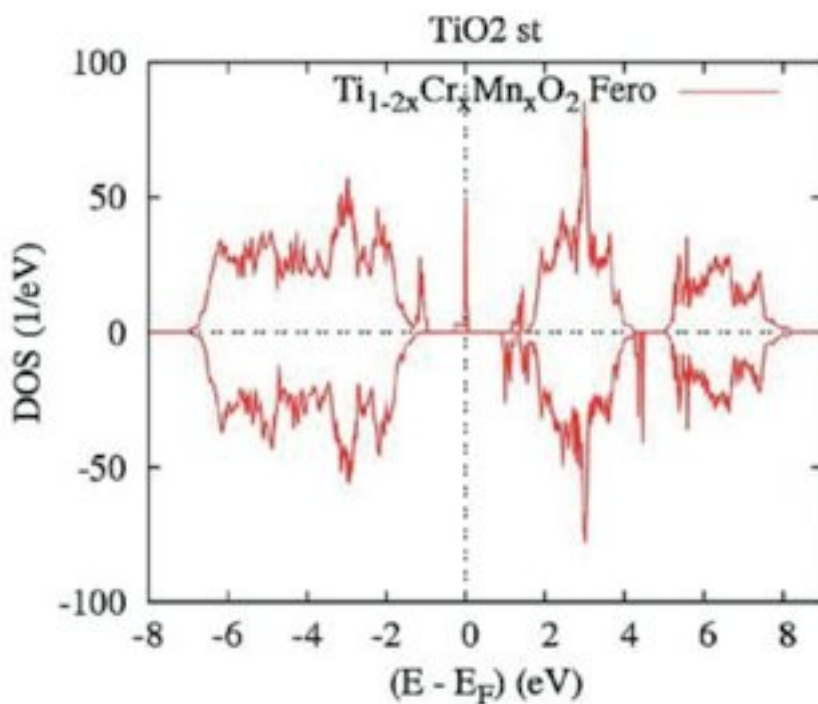


Figure 4 : Densité d'états électroniques de l'oxyde magnétique dilué $\text{Ti}_{0.9168}\text{Cr}_{0.0416}\text{Mn}_{0.0416}\text{O}_2$: (Fakhim et al. 2010)

DISCUSSION

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Merci Pr. Benyoussef pour cet exposé très clair et intéressant sur la spintronique et les nouveaux matériaux associés.

Nous avons le temps pour quelques questions à adresser aux quatre orateurs les professeurs Fuller, Hermann, Daoudi et Benyoussef.

- **Pr. Malik GHELLAB** (SMI)

J'ai une question pour mon collègue Abdelilah Benyoussef sur les opérateurs logiques à spintronique. Qu'est-ce qu'on cherche à faire? Est-ce qu'on cherche à faire simplement des portes de logique Booléennes et à ce moment là qu'est ce qui s'oppose à leur réalisation? Pourquoi ce n'est pas encore au point?

- **Pr. Abdelilah BENYOUSSEF** (SPC)

Pour les opérations logiques, au lieu d'utiliser seulement l'électron, on cherche à utiliser aussi les états de spin pour faire ces opérations là et donc ce n'est pas des logiques Booléennes.

Je voudrais poser une question à Hans Hermann à propos du remplissage de cavités. Il m'aurait semblé que les problèmes de flambage auraient pu se poser pendant le remplissage du fait de la compression ou est-ce quelque chose qui prend le pas sur la plasticité ou sur d'autres aspects.

- **Pr. Hans HERMANN** (Zürich)

Le flambage est purement élastique bien sûr, on le voit dans la cavité pas dans le fil. La cavité peut même flamber 2 ou 3 fois.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

J'ai une question pour M. Hermann sur la répétitivité de ces expériences numériques. Est-ce que vous arrivez à les récupérer?

- **Pr. Hans HERMANN** (Swiss Federal Institute of Technology (ETH) - Zurich, Suisse)

Il faut aller avec une résolution fine pour reproduire les résultats. On compare des résolutions jusqu'au moment où le résultat n'est plus dépendant de la résolution. Quant on a un système quantique comme par exemple la morphologie plastique, il y a des erreurs numériques plus petites qui peuvent générer bien sûr des configurations différentes. On utilise des fonctions de base spéciales qui s'appellent les fonctions de LOOP qui ont été inventées au départ dans les graphiques générés par ordinateur pour avoir des surfaces suffisamment lisses. Il faut que nos fonctions soient C2 sinon on a des problèmes de frottement.

- Pr. Ali BOUKHARI (ITIT)

Merci M. le Directeur des Séances. Je remercie tous les orateurs qui ont pris la parole cet après-midi sur un sujet très important. Je suis chimiste de formation. Je m'adresse à mon collègue Abdelilah Benyoussef concernant la synthèse et la préparation de ces matériaux puisque c'est un domaine de haute technologie. Est-ce que ces matériaux peuvent être préparés facilement ou bien au contraire dans des conditions draconiennes puisque la pureté de ces composés est fondamentale pour pouvoir vraiment jongler sur les spins et leurs orientations. Merci.

- Pr. Abdelilah BENYOUSSEF (SPC)

J'ai d'ailleurs donné dans ma présentation des exemples de matériaux qui ont été développés ici à Rabat. C'est vrai l'élaboration de ces matériaux est basée sur des méthodes plutôt physiques et qui sont en général coûteuses surtout pour les multicouches car elles sont nanométriques.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Je remercie tous les orateurs ainsi que l'audience.

Session Parallèle 1 :
Physique en Sciences de la Vie

Modérateur : Pr. Rajae El Aouad
Rapporteur : Pr. Sellama Nadifi

LA TOMOGRAPHIE D'EMISSION À POSITONS : TEP

Pr. Nezha BEN RAIS-AOUAD

*Chef de Service de Médecine Nucléaire,
Hôpital Ibn Sina
Directeur de l'Equipe de Recherche en Oncologie
Nucléaire Ibn Sina (ERONIS)
Faculté de Médecine et de Pharmacie
Université Mohamed V - Souissi, Rabat*



Résumé

La tomographie par émission de positons (TEP) est l'illustration de l'application de la physique à la médecine, elle consiste à mesurer la distribution tridimensionnelle d'une molécule marquée par un émetteur de positons.

Les émetteurs de positons sont des isotopes radioactifs (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F) produits par des cyclotrons qui peuvent facilement être incorporés aux molécules, sans altérer leurs propriétés biologiques.

Les travaux effectués par les centres de recherche et industriels ont permis le développement de la TEP dès 1970 permettant de réaliser des examens corps entier. Ces travaux combinés aux progrès de l'informatique et de l'algorithmique ont conduit à des reconstructions tomographiques à partir de projections mesurées dans des géométries d'acquisition de plus en plus complexes.

La réalisation d'une image de TEP est l'aboutissement d'une chaîne multidisciplinaire qui contient les étapes suivantes :

- la production d'isotopes émetteurs de positons par un cyclotron biomédical;
- la synthèse d'une molécule biologique et son marquage par un atome émetteur de positons;
- le contrôle de la qualité de ce produit radiopharmaceutique;
- l'injection d'une dose traceuse de la molécule marquée au sujet;
- l'acquisition du signal avec la caméra TEP;
- la reconstruction de l'image tomographique.

Parmi les traceurs de la TEP, le désoxyglucose marqué au ^{18}F (FDG): le FDG s'est imposé comme marqueur idéal nécessitant un cyclotron à distance et pouvant desservir plusieurs centres hospitaliers. Le FDG est particulièrement indiqué en oncologie permettant une approche fonctionnelle des pathologies, organes ou tissus dans lesquels une augmentation de la consommation de glucose est recherchée. L'examen TEP est devenu incontournable en cancérologie et trouve des indications particulièrement documentées dans :

- Le cancer bronchique
- Le cancer colorectal
- Le lymphome
- Les cancers ORL, et le mélanome

L'examen TEP présente des indications potentielles dans tous les cancers, dans certaines pathologies inflammatoires, en cardiologie et en neurologie: Maladie d'Alzheimer / Parkinson / Epilepsies partielles.

- La TEP est une méthode d'investigation médicale en perpétuelle évolution.
- C'est un examen incontournable pour le bilan d'extension initial, le diagnostic de récurrence, le re-staging, et l'évaluation de la réponse aux traitements.
- La fusion d'une TEP et d'un CT voir IRM dans un même appareil traduit la complémentarité des différentes modalités d'imagerie médicale pour le diagnostic et l'évaluation des traitements en cancérologie mais aussi en cardiologie et en neurologie

I. Introduction

La découverte de la radioactivité artificielle en 1934 par Irène et Frédéric Joliot Curie a été à l'origine de l'émergence d'une discipline médicale nouvelle : la médecine nucléaire.

La médecine nucléaire consiste en l'utilisation d'éléments radioactifs en sources non scellées. Les applications de la médecine nucléaire concernent le diagnostic et la thérapie: radiothérapie interne et métabolique.

Dans le diagnostic, on distingue l'imagerie scintigraphique fonctionnelle et la radio-analyse (qui regroupe l'ensemble des investigations biologiques utilisant les radioéléments sans imagerie).

L'imagerie scintigraphique est basée sur la détection du rayonnement gamma émis par l'élément radioactif et détecté par la gamma caméra, on distingue :

- l'imagerie planaire;
- l'imagerie tomographique : Tomographie d'Emission Mono Photonique : TEMP ou SPECT «Single Photon Emission Tomography»;
- l'imagerie hybride TEMP-CT ou SPECT-CT et depuis une dizaine d'années la caméra à positrons : Tomographie par Emission de Positrons : TEP. Ce type de gamma caméra est basé sur la détection du rayonnement gamma qui fait suite à l'annihilation du positron par un électron et émission de deux photons gamma de 511KeV à 180° l'un de l'autre et repérés par les détecteurs placés en anneaux autour du patient. Le couplage hybride de la TEP est représenté par la TEP-CT ou la TEP-IRM.

Au Maroc, la médecine nucléaire a commencé en 1965 au service des radio-isotopes à l'hôpital Ibn Sina et ce n'est qu'en 1998 que le service a été nommé service de médecine nucléaire.

Depuis la reconnaissance de la spécialité comme spécialité universitaire en 1999, le service de médecine nucléaire de l'hôpital Ibn Sina, a permis l'émergence et le développement de la spécialité par la qualité, la diversité des soins d'une part et la formation d'une quarantaine de spécialistes. Ce service a été l'unique service de notre pays jusqu'en 2001 et a contribué à la création de nouveaux services à l'hôpital militaire, au CHIS Ibn Rochd, et plus récemment au CHIS de Fès et au CHIS de Marrakech.

II. La caméra à positrons

La caméra par émission de positrons (TEP) mesure la distribution tridimensionnelle d'une molécule marquée par un émetteur de positrons.

Les émetteurs de positrons sont des isotopes radioactifs (^{11}C ; ^{13}N ; ^{15}O ; ^{18}F) qui peuvent facilement être incorporés aux molécules de l'organisme, sans altérer leurs propriétés biologiques.

Le problème réside en leur durée de vie courte tels ^{15}O de période de 2,03mn; le ^{13}N de période de 9,96mn; le ^{11}C de période de 20,4mn. L'utilisation médicale de ces radioéléments nécessite outre l'équipement en PET, un site de production et un cyclotron intra hospitalier.

Ces équipements restent à ce jour très coûteux.

Le ^{18}F avec une demi-vie de 109,8mn, peut être produit à distance et desservir plusieurs hôpitaux situés à une centaine de km. Grâce à la production de ce radioélément, l'imagerie TEP n'a plus été réservée aux seuls centres de recherches mais est devenue un outil diagnostique incontournable particulièrement en cancérologie.

Le Maroc en 2013, est le premier pays au Maghreb à disposer d'équipements TEP et on peut compter 6 caméras TEP avec 4 à Rabat et deux à Casablanca.

La réalisation d'un examen TEP :

La réalisation d'une image TEP est l'aboutissement d'une chaîne multidisciplinaire nécessitant :

- La production isotope émetteur de positrons par un cyclotron biomédical,
- La synthèse d'une molécule biologique et son marquage par un atome émetteur de positrons,
- Le contrôle de qualité de ce produit radio-pharmaceutique,
- L'injection d'une dose traceuse de la molécule marquée au sujet,
- L'acquisition du signal avec la caméra TEP,
- La reconstruction de l'image tomographique,
- L'interprétation de l'image.

III. Le ^{18}F -FDG

Le ^{18}F -FDG est le résultat du marquage du désoxy-glucose par le fluor 18. C'est l'analogue du glucose-2-désoxy-D-glucose, synthétisé pour la même fois à New York en 1976. Le groupement hydroxyle en positrons 2 a été supprimé et remplacé par un atome de fluoro-18, émetteur de positrons. Le FDG est le traceur du métabolisme glucidique.

Au Maroc, l'autorisation de mise sur le marché (AMM) du ^{18}F -FDG a été attribuée à deux sociétés privées :

- RIM : Radio Isotopes Méditerranée située à Bouznika qui dispose d'un cyclotron de 18 MeV et produit le ^{18}F -FDG depuis 2009.
- Cyclopharma Bouskoura qui dispose d'un cyclotron de 16,5 MeV et produit le ^{18}F -FDG depuis Novembre 2012.

En cancérologie : La cellule tumorale a un fonctionnement exagéré de la glycolyse, par augmentation des capacités de transport membranaire du glucose et par augmentation de l'activité des principales enzymes contrôlant la glycolyse.

L'aspect du tissu néoplasique sur scintigraphie au ^{18}F -FDG, apparaît sous la forme d'un foyer hyperactif. Les foyers infra centimétriques seront d'autant plus visualisés que leur activité métabolique est importante. La plus petite tumeur décelée par divers auteurs a généralement un diamètre de 5mm voire moins, la taille limite dépend des propriétés métaboliques de la tumeur.

La quantification de la fixation tumorale du ^{18}F -FDG a longtemps fait référence à un indice relatif de fixation normalisé : SUV «Standard Uptake Value» ou valeur standardisée de fixation. Actuellement l'estimation visuelle tend à remplacer le SUV.

La relative pauvreté des images TEP en structures anatomiques a fait émerger les machines hybrides TEP-CT, où le CT sert surtout à corriger l'atténuation et à assurer la fusion de l'image fonctionnelle au ^{18}F -FDG et d'une image anatomique.

Les causes de faux négatifs sont représentés essentiellement par le diabète sucré, la surcharge glucosée ou une hyper glycémie liée à la prise de corticoïdes qui produit une charge d'insuline avec une hyperfixation du ^{18}F -FDG sur les muscles.

Les causes de faux positifs sont représentés essentiellement par :

- Les muscles contractés;
- La graisse brune;
- La fixation du myocarde;
- L'activité gastrique ou colique;
- La stase dans l'arbre urinaire, un diverticule voire une souillure urinaire.

D'autres processus non malins peuvent fixer le ^{18}F -FDG: les tumeurs bénignes; le thymus, la moelle osseuse, les zones cicatricielles après intervention chirurgicale, et enfin l'infection et l'inflammation actives.



Figure 1 : Biodistribution normale du ^{18}F -FDG.

IV. Les principales applications cliniques de la TEP au ^{18}F -FDG :

IV. 1. En cancérologie :

Au Maroc, Le registre du grand Casablanca a montré dès 2004 que le cancer représente la deuxième cause de mortalité au Maroc avec au moins 30 000 nouveaux cas de cancer chaque année; 40% des cancers peuvent être évités en améliorant notre hygiène de vie; et plus de la moitié des malades peuvent être traités et guéris s'ils sont diagnostiqués à temps et pris en charge convenablement.

Le ^{18}F -FDG est indiqué en oncologie, parmi les examens d'imagerie, en permettant une approche fonctionnelle des pathologies, organes ou tissus dans lesquels une augmentation de la consommation de glucose est recherchée.

L'augmentation du transport intracellulaire du glucose et du ^{18}F -FDG, et l'hypermétabolisme glycolytique qui aboutit à la synthèse et à l'accumulation du FDG-6P sont à l'origine de l'hyperactivité des foyers cancéreux lors de l'examen. Ces anomalies quantitatives peuvent être présentes dans toute cellule maligne.

L'examen peut être utile dans tous les cancers solides lorsqu'une taille critique est atteinte, sauf certaines tumeurs où le FDG-6P peut être déphosphorylé et diffuser hors de la cellule maligne (hépatocarcinome en particulier). Ces anomalies sont moins apparentes dans les cancers quiescents ou très différenciés ou de certains types histologiques: cancer tumeurs malignes d'origine neuroendocrine.

Les limites de la TEP au ^{18}F -FDG peuvent être résumées comme suit :

- Le carcinome bronchiolo-alvéolaire : trop bien différencié, et de progression lente;
- L'hépatocarcinome : activité G6Pase conservée, trop bien différencié;
- Les cancers uro-génitaux : Rein, Vessie, Prostate;
- Les tumeurs neuroendocrines : peu évolutives(border line),trop bien différenciées.

Les indications particulièrement documentées :

- Cancer bronchique;
- Cancer colorectal;
- Lymphome;
- ORL, mélanome;
- La recherche de cancer primitif...

Les indications potentielles concernent tous les cancers, dans certaines pathologies inflammatoires, en cardiologie,et en neurologie : Maladie d'Alzheimer / Parkinson / Epilepsies partielles.

L'utilité clinique en oncologie intervient à différentes étapes de la maladie, en particulier:

- Le diagnostic;
- Le bilan d'extension initial;
- L'évaluation de la réponse thérapeutique;
- La caractérisation de masses résiduelles, la restadification;
- Le planning de radiothérapie.

La liste des indications explicitement désignées dans l'AMM comporte dans:

Le diagnostic :

- Le nodule pulmonaire isolé : caractérisation;
- L'adénopathie cervicale métastatique d'origine inconnue : recherche du cancer primitif .

La stadification :

- Le cancer primitif pulmonaire et détection des métastases pulmonaires;
- Les tumeurs des voies aérodigestives supérieures, y compris pour orienter les prélèvements biopsiques;
- La récurrence de cancer colorectal;

- Le lymphome malin;
- Le mélanome.

Le suivi de la réponse thérapeutique :

- Le cancer des voies aérodigestives supérieures;
- Le lymphome malin.

La détection des récides suspectées :

- Le cancer des voies aérodigestives supérieures;
- Le cancer primitif pulmonaire;
- Le cancer colorectal;
- Le lymphome malin;
- Le mélanome.

La détection des “récidives occultes” soupçonnées sur une élévation progressive de la concentration d'un marqueur tumoral (ACE, CA 125, CA 15.3, HCG, AFP, SCC, PSA, TG, CT ...) sans que l'imagerie conventionnelle ne puisse localiser le ou les foyers néoplasiques est une bonne indication de la TEP au FDG.

Illustrations d'examens TEP :

Au cours de la conférence, une quinzaine de cas cliniques ont été présentés, nous présentons dans ce résumé deux cas cliniques illustrant l'efficacité thérapeutique (Figure 2) et la supériorité diagnostique métabolique de la TEP dans la Figure 3 :

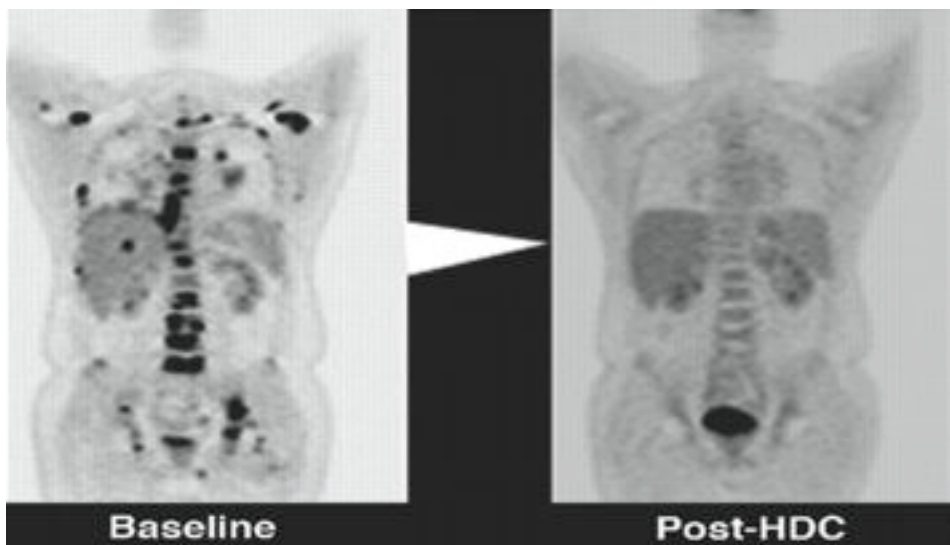


Figure 2 : Images TEP (en coupes coronales) montrant une réponse métabolique complète après chimiothérapie intensive (HDC), chez une patiente suivie pour un cancer mammaire métastatique.

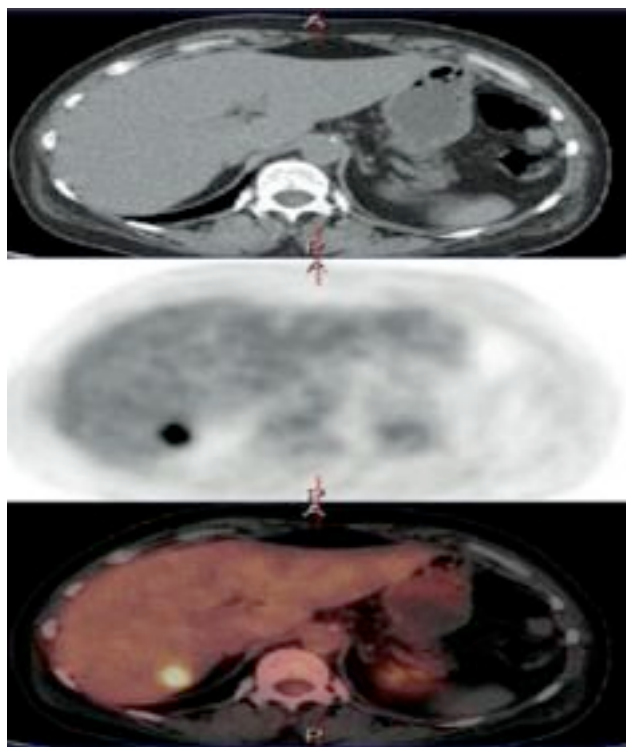


Figure 3 : Métastase hépatique non visualisée sur la coupe du scanner, franchement hyper-métabolique sur les coupes TEP et TEP-CT.

IV. 2. En pathologie inflammatoire

- Le diagnostic étiologique des fièvres d'origine inconnue;
- Le diagnostic d'infections en cas d'infections chroniques osseuses ou adjacentes (ostéomyélites, spondylodiscites) y compris sur prothèses, d'infections sur pied diabétique, des prothèses de hanche douloureuses, des prothèses vasculaires, de fièvre sur sida;
- Le bilan d'extension de l'inflammation des sarcoïdoses, des vascularites des gros troncs, des maladies intestinales inflammatoires;
- Le suivi thérapeutique médical de l'échinococcose alvéolaire inopérable...

V. Perspectives d'avenir

Le Maroc disposant de deux cyclotrons, qui à ce jour produisent exclusivement le ^{18}F -FDG, peuvent produire dans un futur proche d'autres radiopharmaceutiques qui permettront de sursoir aux limites et aux insuffisances du FDG ; Ainsi on pourrait produire :

- La ^{18}F - fluoro choline indiquée dans le cancer de la prostate;
- La ^{18}F -fluoro DOPA dans les tumeurs neuro endocrines;
- Le ^{18}F - fluorure de sodium pour une meilleure exploration du squelette...

Grâce au plan national de prévention et de contrôle de cancer 2010-2019, lancé par la fondation Lalla Salma de lutte contre le cancer, nous espérons que le nombre de TEP au Maroc va continuer à augmenter pour mieux répondre aux besoins des patients, optimiser le diagnostic et le traitement personnalisé, et contribuer à consolider les travaux de recherche particulièrement en oncologie.

Si notre pays dispose en 2013 de six caméra TEP, 9 à 10 caméras TEP sont prévues en 2014 (Rabat/Casa/Marrakech/Fés). Il est lieu de rappeler que le service de médecine nucléaire Ibn Sina, premier service du royaume et centre universitaire formateur disposant d'une équipe dynamique de recherche en oncologie nucléaire(ERONIS) ne dispose toujours pas de TEP.

VI. Conclusion

La tomographie par Emission de Positrons (TEP) : Méthode d'investigation médicale en perpétuelle évolution est devenue incontournable particulièrement en oncologie; en effet :

- C'est une technique performante pour le bilan d'extension initial, le diagnostic de récurrence, le re-staging, et l'évaluation de la réponse aux traitements.
- Elle a prouvé sa complémentarité par rapport aux différentes modalités d'imagerie
- Le dépassement des limites du FDG lance un nouveau chantier de production de nouveaux traceurs...
- Les projets de recherche avec les différentes structures de recherche en oncologie de l'université dont ERONIS...vont être consolidés et renforcés par la TEP.

GAMMA KNIFE RADIOSURGERY : AN ADVANCED NEUROSURGICAL THERAPEUTIC METHOD, AND PRIVILEGED FIELD OF APPLYING PHYSICS TO MEDICINE

***Pr. Abdeslam EL KHAMLICHI,
Pr. A. MELHAOUI, Pr. Y. ARKHA,
Pr. A. EL OUAHABI, Pr. M. JIDDANE,
Pr. B.K. EL GUEDDARI, Pr. K. BOUYAKHLEF***

***Department of Neurosurgery and National Center for
Rehabilitation and Neurosciences
Hôpital des Spécialités, Mohammed V University
Souissi, Rabat***



Pr. Abdeslam EL KHAMLICHI

Résumé

Dès les années 1950, Lars Leksell, neurochirurgien suédois eut l'idée d'utiliser la convergence de rayons ionisants pour traiter des lésions intracérébrales. Il a fallu attendre 1967 pour que le premier prototype de machines Gamma Knife voit le jour, et les années 1990 pour que la technique soit diffusée à travers le monde.

La dernière génération de ces machines est le Gamma Knife Perfexion, introduite en pratique clinique en 2006. Cette machine se distingue par sa structure et sa technologie singulières, lui permettant d'être actuellement l'appareil le plus sûr en termes de radioprotection aussi bien pour le patient que pour l'équipe soignante.

La Radiochirurgie est une technique neurochirurgicale de pointe. Elle permet de traiter aujourd'hui un grand nombre de pathologies. Elle a pu voir le jour grâce aux grands progrès réalisés dans plusieurs domaines de physique appliquée à la médecine. Elle s'appuie sur la méthode stéréotaxique qui permet d'atteindre avec une précision submillimétrique une cible intracrânienne à partir d'un repère de coordonnées X, Y, Z défini pour le système de cadre de stéréotaxie et qui découle du principe balistique. A l'aide de ce principe, la machine est capable de concentrer une multitude de microfaisceaux de radiations ionisantes émis par des sources de Cobalt 60, en un point précis ce qui permet de traiter efficacement un grand nombre de lésions cérébrales comme les tumeurs aussi bien bénignes que malignes, des malformations vasculaires ou des pathologies neurologiques fonctionnelles, le tout en épargnant parfaitement le tissu cérébral sain environnant. Enfin, cette technique a bénéficié des grands développements dans le domaine de l'imagerie médicale, notamment l'imagerie par résonance magnétique, qui permet une grande précision et une qualité de définition de la cible jusqu'ici inégalée. (<1mm de résolution).

Depuis son introduction au Maroc en 2008, plus de 650 patients ont été traités par cette technologie avec d'excellents résultats.

Summary

Objective : to present Gamma Knife radiosurgery as a model for applying physics to neurosurgery, and to show its positive impact on clinical activity and research, especially among teams of neuroscientists, since it was introduced at Hopital des Specialites, UHC of Rabat.

Method : the authors carry out an exhaustive review of literature regarding the link between physics and medicine, and also review the steps towards the development of the Gamma Knife by neurosurgeon Lars Leksell and physicist Borge Larson, and finally review the physical characteristics of the last Gamma Knife model, the Gamma Knife Perfexion. Starting with a review of a series of patients treated by the authors (710 patients over 4 years), they describe the various steps of a Gamma Knife radiosurgical treatment session. They also describe the clinical indications, the results for the various groups of treated pathologies, and finally give an overview of the future development of this cutting-edge technology that has revolutionized the clinical practice of neurosciences.

Results : the relationship between physics and medicine dates back to antique times. This relationship shows they are faithful to each other, as medicine has witnessed great advances thanks to the advances in modern imaging, optical magnification, and mechanics of the various microsurgical tools and instruments. Gamma Knife radiosurgery aims at treating or destroying intracranial lesions without opening the skull and without touching the brain. It draws several of its principles from physics. This constant need of neurosurgery to physics confirms even more the deep relationship between the two fields. Indeed, Gamma Knife radiosurgery requires the use of stereotactics as it is based on the Cartesian coordinates X, Y and Z that help locate a target (lesion) inside the skull. In order to visualize the lesions inside the brain, Gamma Knife radiosurgeons use all modern imaging techniques as the CT Scan based on the principle of classical X-Ray imaging, and nuclear magnetic resonance imaging based on the principle of nuclear magnetic resonance imaging, and also digital angiography.

In order to destroy a lesion inside the brain, Gamma Knife radiosurgeons use a high dose of ionizing radiations emitted by a Cobalt 60 source, through a technique focusing these radiations on the lesion, with a sharp falloff of the radiation dose outside the lesion, which makes this technique very safe for the neighboring structures.

A Gamma Knife radiosurgery session is carried out on conscious patients without previous anesthesia, and starts by putting the stereotactic frame over the patient's head. Then, several types of imaging are made (CT scan, MRI, and/or angiography) with the patient keeping the frame on his head. These images are later transferred from the imaging devices to the radiosurgery treatment console, and co-recorded using the stereotactic frame markers and the markers of the referential stereotactic space included in the Gamma Knife computer or Gamma Plan. The radiosurgical treatment planning as such consists in defining the target (lesion) inside the stereotactic space, and consists also in defining the radiation dose, taking into consideration the type of lesion, its size, its location and its neighboring structures. This treatment planning is later transferred to the Gamma Knife device that will automatically carry it out after the patient has been put inside.

Radiosurgery can treat a large spectrum of cerebral lesions: benign tumors, malignant tumors, vascular lesions, and lesions related to functional neurosurgery. Its degree of efficiency varies between 80-90% in a great number of pathologies like cerebral metastases, arteriovenous malformations, acoustic neuromas, meningiomas, or pituitary adenomas. The degree of efficiency and innocuousness of this technique is very high when the size of lesions is small (< 3.5 cm). Gamma Knife radiosurgery is a technique that very much differs from conventional radiotherapy.

Conclusion : radiosurgery results from putting together several advanced and complex aspects of physics, mathematics and computer science in order to ultimately reach a high degree of therapy efficiency for a high number of intracranial lesions with a very high degree of innocuousness. Its use throughout the world increases rapidly and exponentially. Its application requires the collaboration of multidisciplinary teams. This collaboration will certainly bring radiosurgery even more impressive advances in the near future.

Introduction

The relationship between physics and medicine dates far back in the history of both disciplines. Most developments in medicine have been engendered by the evolution of physics, since Hippocrates (4th Century B.C.) attempted to estimate the body temperature of patients by calculating the time it took for their clothes to dry up after having been previously soaked with moistened clay (6). Also to be mentioned are the theory of Ibn Alhaithem (also called Alhazem) in the 10th Century on the physics of light and vision (7), and the great discoveries of the 19th and 20th Centuries that have given birth to several machines, devices and tools we use in our everyday medical practice (2). In a series of articles published in *The Lancet*, April 2012, at the occasion of the anniversary of the deaths of Albert Einstein and Pierre and Marie Curie, one of the articles compared the relationship between physics and medicine to a marriage: “Physics and medicine – two tips for a long and happy marriage” (3).

The most successful marriage is probably the one between physics and neurosurgery, because all the progresses that have been made by the latter were made along with the evolution of modern physics and mathematics. Actually, the greatest advances lying behind modern neurosurgery have been made thanks to the progress in physics. The advances made in the physics of light and optic fibers have led to the invention of optic magnification devices as the operating microscopes and endoscopes that have, in their turn, led to microsurgery in the 1960s and 1970s. Also, the progress made in quantum physics and computer science have allowed for the development of modern imaging techniques (CT-scan, Magnetic Resonance Imaging or MRI, PetScan, ... etc.). These advances in imaging, along with the advances in micro-instruments and along with optic magnification devices, have given birth to minimally invasive neurosurgery in the 1980s and 1990s, so much so that if neurosurgery has been experiencing nowadays results that are as good, or sometimes even better than the results reached in the other fields of surgery, it is thanks to the advances made in surgical techniques and training, but also thanks to the advances in technology reached in physics, mechanics and computer science.

This great need for technology in neurosurgery, and therefore for applied physics, has two main reasons : from the anatomical point of view, the brain is a noble and very sensitive organ. It is isolated by several protective layers, namely the scalp, the skull, and the meninges. Being protected by these thick tissues, its access remains difficult for a direct medical observation (palpation and auscultation), and its exploration requires

advanced imaging techniques. The same applies to its access during surgery, which is sometimes difficult, even risky, especially when surgery is aimed at the skull base. From the physiological point of view, the brain is a highly-functional organ, and its tissue cannot regenerate. Therefore, cerebral surgery should avoid any damages to the normal cerebral tissue when a cerebral lesion is resected. Consequently, the best way to treat a cerebral lesion should be without opening the skull and without touching the brain, and this was the initial aim of radiosurgery.

The idea of radiosurgery has ripened in the mind of Lars Leksell (1907-1986) in the years 1940-1950, when he was professor of neurosurgery at Karolinska Institute, Stockholm, Sweden. Leksell practiced neurosurgery during World War II, and was disappointed by the results of neurosurgery at that time. He used to say that, “neurosurgery is plenty blood, sweat, and tears” (8). Therefore, Leksell aimed at finding a way of destroying cerebral lesions without opening the skull, and without touching the brain. He thought of using ionizing radiation beams, these being known at that time. Therefore, he defined radiosurgery as “the use of a single fraction of high dose irradiation delivered to a limited target volume of tissue deeply located in the brain, without opening the skull.” (4)

Gamma Knife Radiosurgery : A privileged field for the application of medical physics

In order to develop the concept of radiosurgery, Leksell had to solve two main issues: first, he had to find a way to locate a cerebral lesion very precisely. Second, he had to generate a radiation source and to focus the radiation beams in a dose that would be sufficiently high to destroy the lesion without damaging the neighboring cerebral tissue. In order to solve these two issues, Leksell and his team had to work for many years while exploring many aspects of physics applied to medicine. In 1968, he developed the first model of radiosurgery device he would call “Gamma Knife”.

To solve the first issue, namely locating a target inside the skull with a high degree of precision, Leksell had to use stereotaxy. This technique is based on Cartesian coordinates X, Y and Z. These coordinates make up the basics of analytical geometry, and are essential to several applications of physics. These coordinates help determine the location of a spot in relation to the three dimensions, and therefore help locate a target inside the skull. For Leksell to use this technique, he would work on adapting the stereotactic frame (basic tool for this technique).

The tool was already being used by neurophysiologists in laboratory experiments with the aim of studying the various anatomical and functional areas of the brain. Leksell would therefore work on adapting the stereotactic frame to the human skull. Once the frame has been fixed on the head of the patient, the sides and the height of the frame would give the Cartesian coordinates X, Y and Z. Starting from here, Leksell would determine a given target inside the skull with a high degree of precision, by calculating the location of the target in relation to the three dimensions X, Y and Z. He would later add an isocentric arc to the frame, to facilitate the trajectory towards the target, in both the coronal and sagittal plans (Fig.1).



Fig. 1 : Picture of the stereotactic frame fixed on the head of a patient, with its isocentric arc.

To solve the second issue, namely generating a radiation source and focusing the radiation beams in a dose that would be sufficiently high to destroy a lesion without damaging the neighboring cerebral tissue, Leksell would work with a team of physicists directed by Börge Larson. Both would first use X Rays, then proton beams emitted by a cyclotron. They would finally recourse to using Cobalt 60. Cobalt 60 is a radiation source with a high radioactivity level, with an adequate half-life (5.26 years). Its natural decomposition produces Gamma-ray photons with a high degree of energy, which can be used for treatment (Fig. 2).

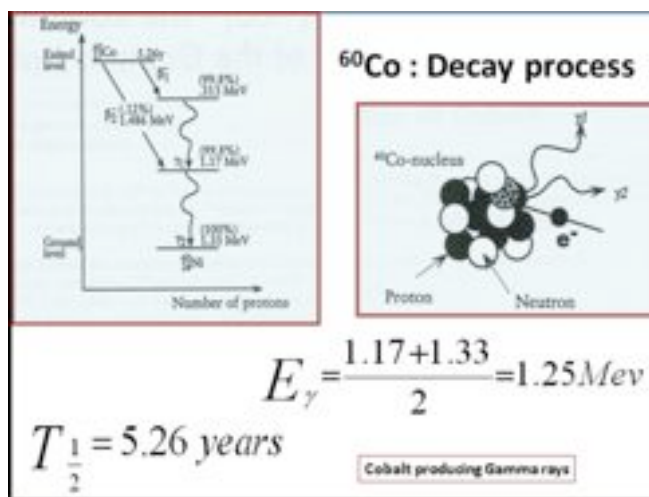


Fig. 2 : Picture of Cobalt producing Gamma-ray photons.
(Ref. 1, adapted from J.C. Ganz, Gamma Knife Neurosurgery, Springer 2011)

To be able to obtain a radiation dose high enough to treat a lesion without damaging the neighboring tissue, Leksell thought of using several Cobalt sources while guiding the beams of each source using a collimator, in order to focus all of them into one single spot, the target. In the first model of Gamma Knife, he used 201 Cobalt sources. In the last model, 192 sources are used. The Gamma rays that are given out by each source are directed towards a spot by a collimator with a variable diameter. In the last model, the diameter varies between 4, 8 and 16 mm. The set of collimators are placed in many sectors. They can be made to move automatically in various positions. During the treatment, they are placed in front of the sources, to direct the Gamma rays towards a single spot, the lesion (Fig. 3).

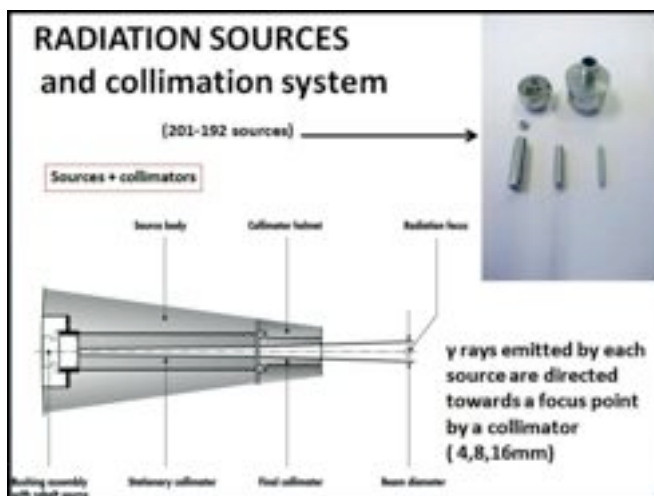


Fig. 3 : Picture of a source and a collimator,
(Ref. 5: adapted from Lunsford LD, Kondziolka D, Flickinger JC (eds):
Gamma Knife Brain Surgery. Prog Neurol Surg. Basel, Karger, 1998, vol 14, pp. 5-20)

The principle of multiple beams of ionizing radiation focusing into a single spot, makes up the basic principle of Gamma Knife radiosurgery. According to this principle (Fig. 4), a high dose of beams is focused on the target, and there is a sharp dose falloff that allows for a very low non aggressive dose beyond the target (Fig. 5) to avoid damaging neighboring tissue.

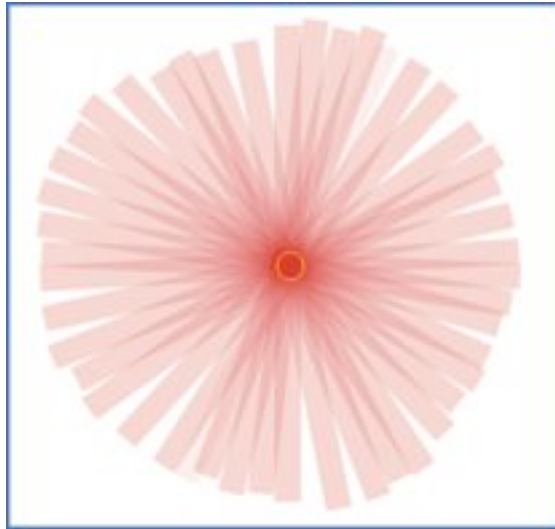


Fig. 4 : Principle of multiple beams converging into a single hot spot in the middle

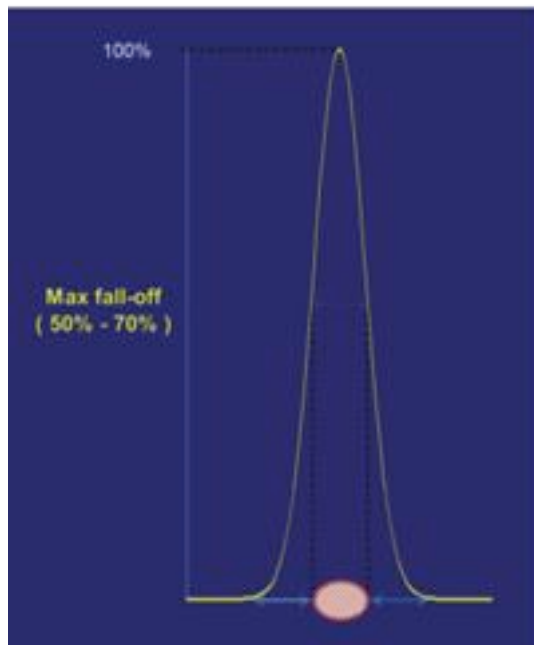


Fig. 5 : Bell-shaped curve showing dose distribution from a 4 mm collimator, and sharp dose falloff beyond the target

(Ref. 5: Adapted from Lunsford LD, Kondziolka D, Flickinger J.C (eds): Gamma Knife Brain Surgery. Prog Neurol Surg. Basel, Karger, 1998, vol 14, pp. 5-20)

If the hot spot principle is applied, meaning a spot where a high dose of ionizing radiation is applied to a living tissue, we can see the tissue is destroyed in a selective way, as if it had been cut with a knife. This is the reason why Leksell named the machine “Gamma Knife”, in comparison to the knife used in surgery, and named the technique “Gamma Knife radiosurgery”, comparing the Gamma rays to a surgical knife.

Therefore, after twenty years of research (1948-1968), the teams of Lars Leksell (neurosurgeon) and Börge Larson (physicist) developed the first prototype of Gamma Knife in 1968. It is a tool that can focus ionizing radiations in doses sufficiently high to destroy an intracranial lesion. The lesion will have been located previously with a high degree of precision using Cartesian coordinates applied to stereotaxy. However, even though the first model of Gamma Knife had been developed, radiosurgery would not make any remarkable advances in its clinical applications, because the imaging devices that were used at that time, were still undeveloped. In 1968, the only devices of cerebral imaging were gas encephalography, ventriculography, or angiography. These imaging devices only gave indirect signs of cerebral structures and pathologies, and would only help locate lesions approximately inside the brain. These tools did not meet the demanding precision required by stereotactic multibeam radiation used in the Gamma Knife.

Radiosurgeons had to wait for other advances in the field of physics, in order to reach a better imaging quality, and therefore to be able to locate lesions inside the brain with a higher degree of precision. The first step of advance in imaging will be made in 1971-72 with the birth of CT-Scan or computerized tomography, itself based on X-Rays imaging. The difference between X-Rays and computerized tomography lies in that the latter is enabled with computers that can build 3D pictures from several 2D pictures of the body taken in different incidences. This technique will allow for the visualization of soft tissues, but will mainly allow solve the dimension issue of the various structures of the human body. However, Magnetic Resonance Imaging (MRI) was the greatest advance in imaging. It is based on nuclear magnetic resonance that allows visualize atom nuclei of the various tissues of the human body. This technology would be a giant step in medical imaging at the beginning of the 1980s. Nuclear magnetic resonance is different from one tissue to another. It is also different between pathological tissues and normal tissues.

MRI will help visualize the normal and the pathological structures of the human body. It will help circumscribe cerebral structures with a high degree of precision, and even allow knowing their nature, because nuclear magnetic resonance will react differently according to the metabolic status of cerebral structures, and also according to their activity. This difference in reactions will help neurosurgeons obtain metabolic imaging, but also functional imaging of the brain. CT scan and MRI imaging have been reached thanks to the advances made in quantum physics, microprocessor making and computer technology. These advances will allow for a great development in the clinical use of Gamma Knife radiosurgery beginning 1980s, but also in the 1990s. We will later examine the importance of good imaging quality and computer technology in Gamma Knife radiosurgery.

The various steps of Gamma Knife radiosurgery treatment

All steps of the treatment are carried out on conscious patients, without previous anesthesia, except in case of early aged children. The first step of the treatment consists in fixing the stereotactic frame over the patient's head, under local anesthesia in the skin spots where the four screws are to be inserted, in order to fix the frame and the patient's

skull. The second step lies in taking several images of the patient's head with the frame fixed. Generally, two to three types of imaging techniques are used: the CT scan and the MRI, and in case of vascular malformations, cerebral angiography is required. Before the patient accesses these three imaging devices, a specific helmet is fixed above the stereotactic frame for each type of imaging. The helmet bears markers or fiducials. These markers will help align the images with the stereotactic coordinates of the frame, and will help merge these images with a 3D stereotactic space inside the computer program (Gamma Plan). This computer program will later set up the treatment planning.

The third step of treatment consists in recording the patient's images, meaning the markers of the stereotactic frame on the patient's images have to be aligned, or the markers of the reference stereotactic space included in the Gamma Plan have to be aligned. The fourth step consists in defining the size of the patient's skull compared to the stereotactic frame, through the use of a ghost frame or bubble. These measurements are then inserted in the computer. This will allow the Gamma Plan to define the morphology of the patient's skull wearing the frame, in order to prevent any collisions between the patient's skull and the parts of the radiosurgery device during treatment. The fifth step of the treatment consists in the treatment planning which starts by defining the target (lesion), then by defining the radiation dose, taking into account the type of the lesion, its size, and its location in relation to the neighboring structures, and also by checking the equal distribution of the dose over all parts of the lesion without damaging the neighboring structures. The planning should then be approved by a neurosurgeon, a radiotherapist, and a radiophysicist. Then, it is printed and signed by the three specialists, before it is transferred to the radiosurgery machine. The treatment is then carried out automatically after the patient has been introduced inside the radiosurgery machine.



Fig. 6 : Pictures of the various steps of Gamma Knife radiosurgery treatment

When the treatment ends up, the patient is helped out of the device. The stereotactic frame is taken out, pieces of dressing are put on the screw insertion spots on the patient's head, and the patient can then go back home after having had some rest at the hospital,

or he may as well choose to spend a maximum of one day at the hospital. The patient can resume work on the following day or 48 hours after treatment.



Fig. 7 : Picture of a patient with small pieces of dressing placed on the screw insertion spots, after the frame has been taken out

Main indications for Gamma Knife radiosurgery

As we have seen earlier, Gamma Knife radiosurgery is a very recent technique. The first model of Gamma Knife device was developed in 1968. Its clinical use around the world has started at the end of the 1980s and the beginning of the 1990s. Nowadays, there are approximately 300 Gamma Knife devices being used around the world, with almost 100 of them belonging to the last model, the Gamma Knife Perfexion, which was developed in 2006. More than 80% of these devices are set up in Europe, North America, and Japan.

In Morocco, this device was purchased thanks to an NGO, Hassan II Foundation for the Prevention and Cure of Nervous System Diseases, created in 1989. It is a public utility non-lucrative foundation. This foundation acts mainly towards the purchase of new technologies with the aim of helping public hospitals. Between 2001 and 2007, Hassan II Foundation directed a project for the benefit of the University Hospital Center of Rabat. This project consisted in building the National Center for Rehabilitation and Neurosciences (NCRNS). This center gathers up all the technologies required for the management of nervous system diseases. It includes a radiosurgery unit with a Gamma Knife Perfexion (last model to date). This unit was opened to patients on June 9, 2008 at the National Center for Rehabilitation and Neurosciences, at Hôpital des Spécialités, UHC of Rabat.

The clinical application of radiosurgery is very useful, because it allows for the treatment of a large number of cerebral lesions: benign tumors, malignant tumors, vascular lesions, and functional neurosurgery. However, the size of these lesions has to range between 30-40 mm. The smaller the lesion is, the more treatment efficiency is close to 100%, and the smaller the risk is. Since this technology has been applied clinically (beginning of the 1990s), the number of indications has increased exponentially for all cerebral lesions.

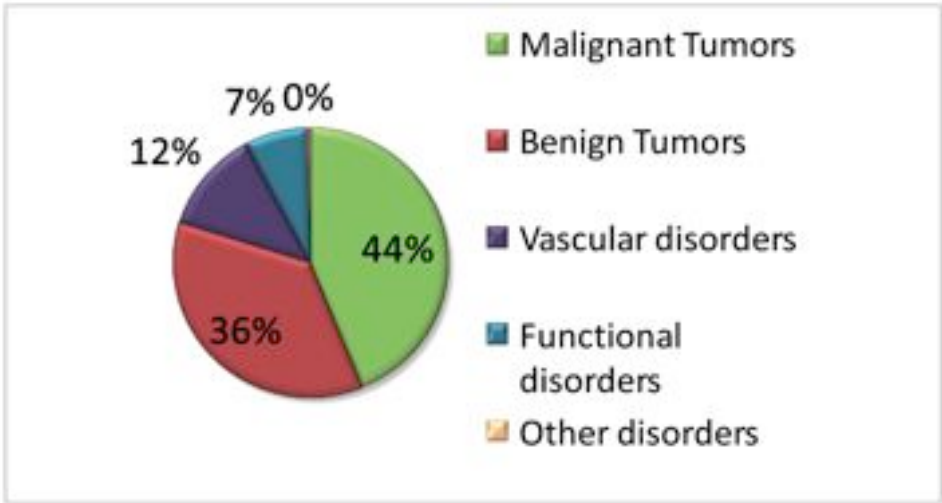


Fig. 8 : Diagram with the distribution of indications treated by Gamma Knife radiosurgery (World Statistics 2011, Leksell Gamma Knife Society)

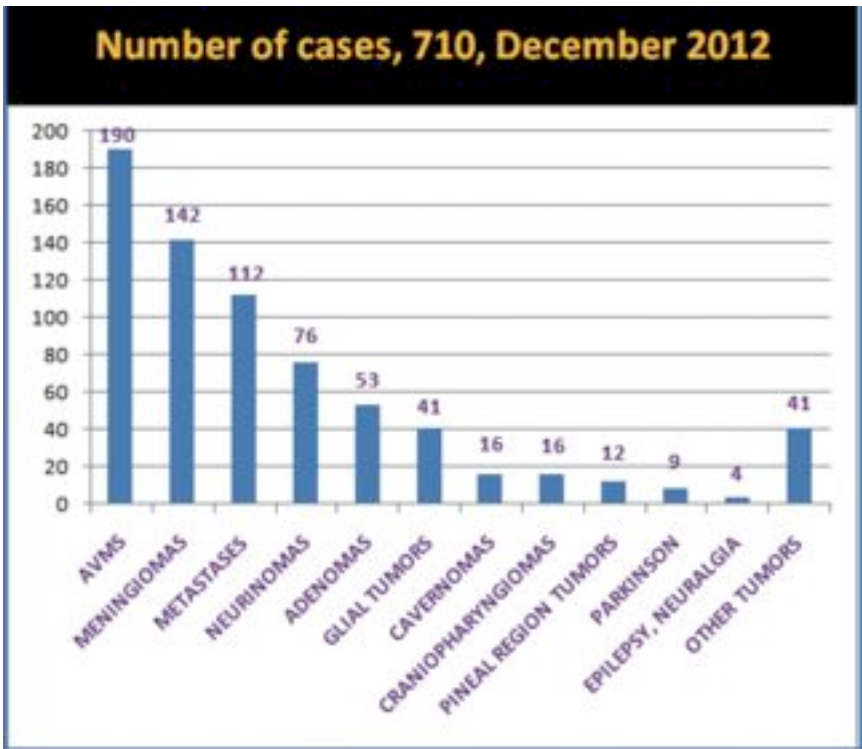


Fig. 9 : Diagram with the distribution of indications treated by Gamma Knife radiosurgery (Statistics of the Gamma Knife radiosurgery Unit at the National Neurosciences Center, Rabat, 2012)

Without dealing with all the pathologies that can be treated with radiosurgery, we will give four examples to illustrate the efficiency of this new therapy :

- Arteriovenous malformations (AVMs) are congenital vascular abnormalities where arteries abnormally communicate with veins (shunts) at the level of the brain. These malformations are frequent among young people, and may have several neurological consequences, the worst being cerebral hemorrhage. When these AVMs are located in a non-functional area of the cortex, they can be treated surgically. However, when they are deeply seated or when they are located in a functional area of the brain, even though surgery proves to be efficient, it can also cause damages like paralysis or a loss of cognitive functions. Gamma Knife radiosurgery can treat these lesions and cure them completely in more than 80% of cases 2 to 3 years after treatment.

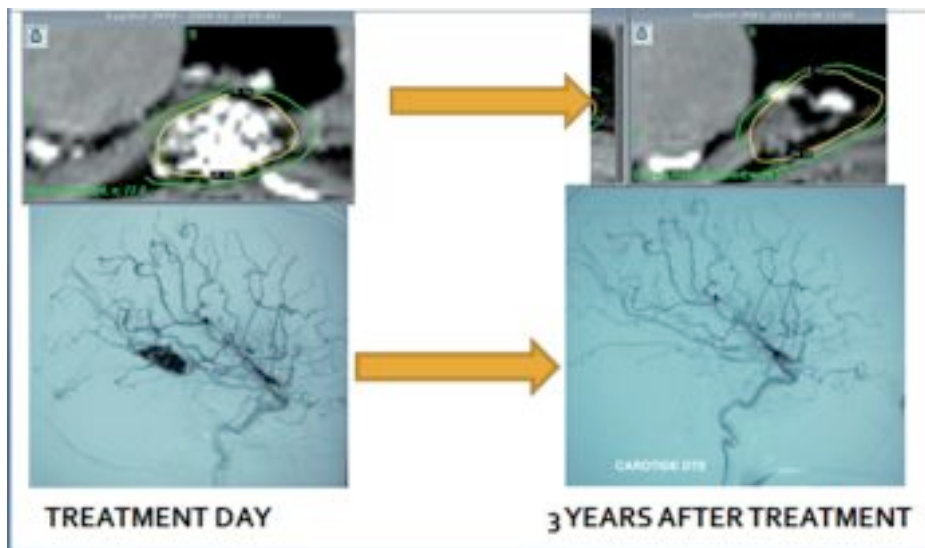


Fig. 10 : Occipital AVM (red arrow) treated by Gamma Knife radiosurgery. MRI and angiography imaging confirm full recovery 3 years after treatment

- Cerebral metastases are tumors developing from malignant cells reaching the brain from a primary malignant tumor located in another organ (breast, lung, kidney, prostate, ...). Consequently, these cerebral tumors are called metastases or secondary tumors. Metastases are frequent, as 15 to 20% of cancers may extend to the brain, and engender secondary cerebral tumors or metastases. Twenty years ago, when a patient with cancer developed cerebral metastases, this was considered as a fatal event for the patient. He underwent a conventional radiotherapy treatment of the brain, knowing that his life expectancy would not go beyond 6 months. Nowadays, Gamma Knife radiosurgery can control, meaning it can stop the growth of metastases, and cure them completely in more than 85 to 90% of cases. Patients with cancer do not die anymore of their cerebral metastases, but more of their primary cancer when it cannot be controlled through usual therapy means. Moreover, putting aside conventional radiotherapy of the brain as a whole and adopting radiosurgery to eradicate metastases, guarantees patients a better quality of life, because it prevents functional handicaps for the period of time the primary tumor allows them to survive. Besides, Gamma Knife radiosurgery can treat several secondary cerebral tumors in a single session.

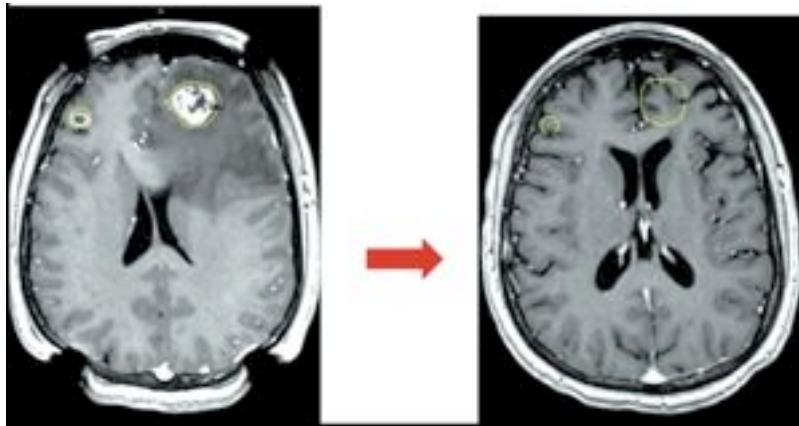


Fig. 11 : Patient treated by Gamma Knife radiosurgery for two cerebral metastases from breast cancer.

MRI imaging 6 months after treatment shows the eradication of the metastases

- As examples of benign tumors being treated efficiently with Gamma Knife radiosurgery are vestibular schwannomas or neurinoma of the VIIIth cranial nerve. These are benign tumors growing on the vestibular nerve (the vestibular nerve controls the balance of the body). These tumors appear in a deep part of the skull base, close to other cranial nerves like the cochlear nerve (that controls audition) and the facial nerve (that controls face movements), and close to the brain stem where all the vital centers of the body can be found. Surgical treatment is efficient to remove these tumors. However, despite the advances of micro-neurosurgery, complications may appear, like paralysis of cranial nerves, or even death, especially when these tumors have been discovered at a late stage, when they have grown to a big size. Nowadays, radiosurgery can stop these tumors from developing in more than 95% of cases for tumors with a diameter below 35 mm. For bigger tumors with a diameter above 4-5 cm, the best treatment would be to carry out a limited surgical exeresis. This would limit any complications engendered by the total removal of the tumor. The second step would be to treat the remaining part of the tumor through Gamma Knife radiosurgery.

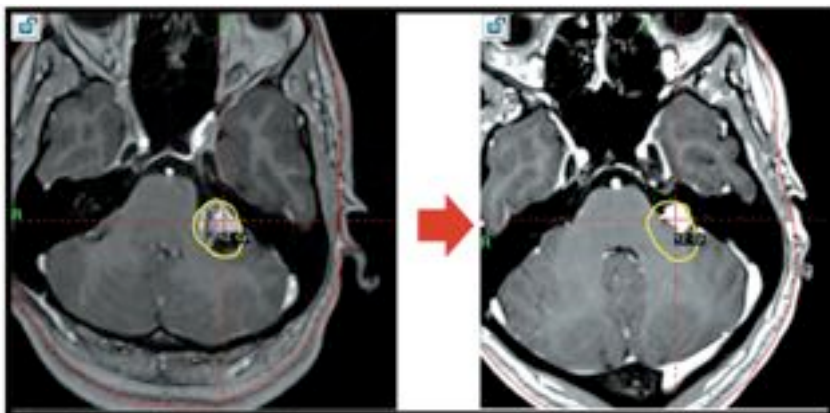


Fig. 12 : Patient treated for acoustic neuroma.

MRI imaging 3 years after treatment shows a decrease of more than 70% of the initial size of the tumor

Apart from neurinomas, other benign intracranial tumors encountered frequently may also be treated with Gamma Knife radiosurgery, like meningiomas, pituitary adenomas, and craniopharyngiomas.

- Gamma Knife radiosurgery proves to be very efficient in various types of functional neurosurgery, the branch of neurosurgery that deals with the treatment of symptoms. Among the indications of radiosurgery that are being currently applied, some types of neuralgic pain of the face like trigeminal neuralgia or tremors in Parkinson disease, or some types of epilepsy.

We can see through these examples that the list of indications of Gamma Knife radiosurgery is even longer than the indications treated by conventional radiotherapy, and its results are even better and the risks lower. There are other main differences between the two techniques. Table 1 summarizes the main differences between conventional radiotherapy and Gamma Knife radiosurgery: the treatment using Gamma Knife radiosurgery is carried out in a single session with a single radiation dose, while in conventional radiotherapy, treatment extends over several weeks, with doses fractionated for daily treatment; the dose is low in radiotherapy, because the overall dose is fractionated over several sessions, while the dose provided in a single session is very high in radiosurgery; the degree of precision is very low in radiotherapy and is measured in centimeters, while it is measured in tenths of millimeters in radiosurgery; the size of treated lesions in radiotherapy is large, while in radiosurgery, the size should be small or limited; the risk of radiation-induced malignant tumors is very high in radiotherapy (around 10%), while it is very low in radiosurgery; side effects occur frequently in radiotherapy, while they are very rare in radiosurgery (for instance, alopecia constantly occurs in radiotherapy, but never in radiosurgery. Also, the effects on cognition, namely memory, occur frequently in radiotherapy, but not in radiosurgery); and finally, radiotherapy cannot be applied to children and old patients, while radiosurgery can be used for patients of all ages.

Table 1 : Comparison between Gamma Knife radiosurgery and radiotherapy

Criteria	Radiotherapy	Radiosurgery
Technique	Fractionation	Single session
Selectivity	Biological	Anatomical
Dose	Low	High
Degree of precision	Low (in cm)	High (1/10th mm)
Distribution of dose	Homogeneous	Heterogeneous
Indications	Malignant tumors	Benign tumors and metastases
Size of lesions	Big	Small
Tumorigenesis	10%	< 1 / 10 000
Side effects	Frequent	Rare
Alopecia	Yes	No
Cognitive effects	Yes	No
Sensitivity of aged and young patients	Yes	No

The radiobiological effects of Gamma Knife radiosurgery

From the radiobiological point of view, the effects of radiosurgery are also different from those of radiotherapy. The high selectivity between anatomical structures allowed by radiosurgery enables this technique to treat lesions with a high radiation dose in a single session. This main difference with radiotherapy engenders a difference in the reaction of tissues to ionizing radiations. To achieve the same radiobiological effect on a given tissue, the doses required in radiotherapy are much higher than those used in radiosurgery (up to 10 times). Ionizing radiations affect DNA bits differently when fractionated radiotherapy or when single-session radiosurgery is used. This interaction with living tissues engenders several phenomena, which might be acute or chronic, depending on the applied dose. This will affect in its turn the tumor itself through programmed cell death (apoptosis). In case of arteriovenous malformations, the therapy will not affect cells, but rather vessels. Radiosurgical therapy will engender obliterating endarteritis that will gradually occlude the malformation. This effect on vessels may also help treat tumors through controlling lesions by devascularization.

Future development and fields of research in Gamma Knife radiosurgery

As we have just seen, Gamma Knife radiosurgery has changed the way neurosurgery is practiced, but also all clinical neurosciences during the last two decades. This technology results from the complex association of several advanced aspects of physics, mathematics and computer science giving birth to a very efficient therapy dealing with a large array of cerebral lesions, all this with a very high degree of innocuousness. Its use throughout the world has increased very rapidly and exponentially. Several multidisciplinary teams interfere in its application and developments, namely teams dealing with clinical and medical sciences (neurosurgeons, neurologists, neuroradiologists, neuro-oncologists, radiotherapists, neuropathologists) and teams of physicists and engineers who are familiar with the applications of physics and mathematics used in radiosurgery (ionizing radiations, imaging, computer science).

The future advances of radiosurgery will undoubtedly occur rapidly, and will come out from the research carried out by the teams taking part in this technique. For instance, neurosurgeons look for the optimal way to apply Gamma Knife radiosurgery to large lesions, and clinical studies have already begun in three ways: combined treatments we have already talked about (surgery followed by radiosurgery), hypo-fractionation (meaning applying radiosurgery over two or three sessions), and treatment over several sessions, meaning dividing a large lesion into two to three parts, and treating each of these parts separately with the same dose in every session over 3 to 6 months.

Neuropathologists try to understand the radiobiological effects of Gamma Knife at the molecular and cellular levels. This will certainly allow for a better definition of radiation doses, and for a better limitation of side effects. Imaging has been developing very rapidly too, and will allow for a better determination of lesions in the future. This will certainly push forward the frontiers of radiosurgery. While dealing with imaging, it should be mentioned that Gamma Knife radiosurgery makes use of a very limited number of MRI sequences, and that the majority of advanced sequences like spectroscopic MRI, functional MRI and diffusion MRI, are not included in the Gamma Plan application of the Gamma Knife. Studies are intensively led currently to include all these advanced MRI sequences and other types of imaging like 3D angiography, Pet Scan, and other current advancements in imaging.

Finally, several advances will come up when radiosurgery is extended to other types of cerebral pathologies. To sum up, radiosurgery is a large field where teams of physicists and engineers on the one hand, and teams of clinical and fundamental neuroscientists on the other, will exchange and collaborate more in the future. In order to help these teams work together in our country, research in physics should be encouraged, and some units of physics should be included in the medical curriculum of studies. This will help physicians understand and use advanced technologies that are included in the various fields of medicine.

Conclusion

The initial idea of Lars Leksell (neurosurgeon) and Börge Larson (physicist) of applying a single focused dose of ionizing radiations to destroy a lesion inside the brain has gradually become an efficient and attractive therapeutic technique to treat a larger number of lesions of the central nervous system. This technique should witness impressive advances in the future. The complexity of the physical roots of this technology differs with the simplicity of its use by physicians and its innocuousness for patients. It is a remarkable example of how physics can collaborate with life sciences, which deserves to be deeply thought of, and followed by physicists and clinicians in universities, especially by those who work in the fields of medical physics and neurosciences. The introduction of a Gamma Knife Perfexion device 5 years ago in Hôpital des Spécialités at the University Hospital Center of Rabat makes of Morocco the only African and Arab country that has been equipped with this technology to this date. Its introduction in a hospital dedicated to head specialties has stimulated the various multidisciplinary teams of clinical neuroscientists, and helped them get closer to the teams of physicists, mathematicians and computer scientists at the Faculty of Science of Rabat, by choosing common research topics aiming at bringing a Moroccan touch to the future development of this technology.

N.B. Our thanks and acknowledgements go to The Hassan II Foundation for the Prevention and Cure of Nervous System Diseases which provided this technology, built and equipped the National Center for Rehabilitation and Neurosciences at Hôpital des Spécialités, University Hospital Center of Rabat.

Bibliography

- 1- Ganz J.C., Gamma Knife Neurosurgery. Springer 2011
- 2- Keevil S.F.: Physics and medicine: a historical perspective, *Lancet* 2011; 379: 1517-24
- 3- Knight P.: Physics and medicine – two tips for a long and happy marriage. *The Lancet*, 2012, Vol. 379, Ap. 21; 1463-64
- 4- Leksell L.: Brain fragments, in Steiner L., Lindquist C., Backlund EO (eds): *Radiosurgery baseline and trends*. New York, Raven Press, 1992
- 5- Lunsford LD, Kondziolka D, Flickinger JC (eds): *Gamma Knife Brain Surgery*. Prog Neurol Surg. Basel, Karger, 1998, vol 14, pp 5–20
- 6- Otsuka K., Tagawa T.: Hippocratic thermography. *Physiol Meas* 1997; 18: 227-32
- 7- Russell GA., Emergence of physiological optics. In Morikón R. Rashed R, eds. *Encyclopedia of the history of Arabic science*. London: Routledge, 1996
- 8- Steiner L., Yeu CP: Gamma Knife radiosurgery for vascular malformations, tumors and functional disorders of the brain. *Pan Arab Journal of Neurosurgery, Supplement*, Ap. 2011

RADIOTHÉRAPIE AU MAROC (PASSÉ, PRÉSENT ET FUTUR)

Pr. Abdellatif BENIDER

*Université Hassan II, Aïn Chock - Casablanca
Association Lalla SALMA de lutte contre le Cancer*



Résumé

La radiothérapie représente une arme majeure dans le traitement des cancers ; elle existe depuis la découverte des rayons X par W. Roentgen en 1894.

Au Maroc, le premier centre a été créé en 1928 à Casablanca, appelé jadis centre Bergonié. Il est resté le seul centre de traitement de cancer par radiothérapie au Maroc jusqu'à 1985, date de création de L'institut National sidi Mohamed Ben Abdellah (INO) à Rabat. La radiothérapie dans le secteur privé a vu le jour en 1989 par la création du premier centre à Casablanca.

Les premières techniques d'irradiation utilisées au Maroc date de 1933 à Casablanca, faisant appel pour la radiothérapie externe à des appareils de rayon X de bas voltage (100Kv-300Kv) pour la curiethérapie aux sources de radium.

Le 1^{er} cobalt moderne installé au Maroc date de 1982 à Casablanca et 1985 à Rabat; c'est dans les années 90 que le 1^{er} accélérateur a été installé au Maroc (INO) suivi par l'installation d'autres accélérateurs dans le secteur privé puis publique.

La Radiothérapie au Maroc a connu un réel développement aussi bien sur le plan technologique qu'infrastructure à partir de 2005, date de création de l'Association Lalla SALMA de lutte contre le Cancer.

Avant 2005, la prise en charge des malades atteints du cancer était limité à Casablanca et Rabat aussi bien dans le secteur publique que privé, de même le nombre d'accélérateurs installé au Maroc ne dépassait pas 6 accélérateurs. Actuellement les centres sont répartis dans les différentes régions du Maroc et le nombre d'accélérateurs installé est aux alentours de 25, tout en sachant que pour l'OMS les normes sont d'un accélérateur pour un million d'habitant, en outre sur le plan purement technique tous les centres sont dotés

d'équipement leur permettant la réalisation des nouvelles techniques d'irradiation en particulier la radiothérapie conformationnelle.

le domaine de la curiethérapie a connu aussi la mise en place d'une nouvelle technique de curiethérapie appelée (HD) haut débit, technique permettant une meilleure radio protection du personnel soignant et évitant toute hospitalisation de malade durant le traitement.

Dans un avenir proche nous prévoyons développer d'avantage nos techniques d'irradiation pour généraliser la radiothérapie par modulation d'intensité; la radiothérapie stéréotaxique et la radiothérapie des cibles mobiles.

Session Parallèle 2 :
Physique et Agronomie

Modérateur : Pr. Albert Sasson
Rapporteur : Pr. Mohamed Besri

AGRICULTURAL INSTRUMENTATION AS ONE OF THE OPPORTUNITIES FOR INTERNATIONAL COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY, SPECIFICALLY BETWEEN BRAZIL AND MOROCCO

Pr. Silvio CRESTANA

EMPRAPA, Brazil

***Associate member, Hassan II Academy
of Science and Technology***



Abstract

Agricultural instrumentation is the use of advanced techniques and knowledge, methods, systems, and instruments to develop equipment, methodologies, processes, sensors, measuring and control devices, drivers, and signal transmitters and processors applied to agriculture. Also, to simulate, model, monitor and manage agricultural production systems to generate new knowledge and technology from basic sciences as Physics, Biology and Mathematics as well as from the different areas of Engineering. In Brazil, one of the responsibilities of Embrapa, the Brazilian Corporation for Agricultural Research, linked to the Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply is to carry out research in agricultural instrumentation.

Since 1984, Embrapa started its activities in this research area throughout its national center called Embrapa Agricultural Instrumentation. Today, Embrapa Agricultural Instrumentation is one of the 45 research centers of Embrapa. Embrapa Instrumentation plays an important role in increasing productivity and quality of products, for the purpose of ensuring the sustainability and competitiveness of Brazilian agriculture. Some of Embrapa Agricultural Instrumentation lines of research are applied to: agro-energy, family agriculture, soil and water resources management, precision farming, quality evaluation of products, environment, rapid diagnosis and early detection of diseases, nanotechnology, post-harvest and agricultural wastes. Nowadays, the converging technologies and sciences as Information Technology, Biotechnology, Nanotechnology and Cognitive Sciences became essential for managing agricultural systems and agribusiness in a sustainable way.

IT and Biotech are already present in the day by day of the Brazilian agricultural activities in the lab and field as well as in the innovation agenda of the private sector. The next coming wave of innovation and development in agriculture will be materialized by the use of Nanotechnology and Cognitive Sciences. Not only but added to the Management and Engineering of Complex Systems and possible synergies coming from the converging technologies. In this context, agricultural instrumentation is receiving great attention concerning to the management of land, advanced automation, development of embedded systems like unmanned aerial vehicles (drones), imaging techniques, robotics, and artificial intelligence just to mention some of them. It is important to notice that researcher time has become increasingly scarce.

The cost of manpower increases exponentially and its availability for field work is decreasing. As a consequence work-saving machines are very much in demand. Taking all into account, the public and private research and educational system are under strong pressure to redefine their roles at local, regional, national and international level. Mainly, regarding to the preparation of new professionals and entrepreneurship actions to reach the new challenges demanded by the markets, public policies and “mega tendencies” foreseen for the next years. The growth or disappearing of such institutions seems to be directly conditioned to the immediate construction of strategies in order to establish planning, commitments and actions not only in the short term but principally in the long term.

International cooperation is one of the essential strategies and tools. Cooperation in Science and Technology applied to agriculture, water resources and environment, between Brazil and Morocco, is already in place but, undoubtedly should be reinforced and amplified. One of the opportunities is in the field of agricultural instrumentation as will be presented.

- Pr. Mohamed BESRI (Modérateur)

Nous allons écouter maintenant un exposé du Pr. Mohamed Ettarid qui est topographe de formation et professeur à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II où il assure actuellement l'intérim du Directeur de cet institut. L'exposé va porter sur la télédétection en agriculture et ses applications.

LA TELEDETECTION EN AGRICULTURE

Pr. Mohamed ETTARID

***Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II
Rabat, Maroc***



Résumé

Avec une population sans cesse croissante et la pression de plus en plus forte exercée sur les ressources naturelles et le souci d'assurer production agricole qui puisse assurer l'alimentation à cette population, une gestion moderne des ressources agricoles est nécessaire.

Pour moderniser son agriculture, le Maroc s'est doté depuis 2008 d'une stratégie, Plan Maroc Vert (PMV), qui pour répondre à ce besoin, vise entre autres, à Imprimer au secteur agricole une dynamique d'évolution harmonieuse, équilibrée et évolutive, mais également à exploiter les marges de progrès pour valoriser au mieux les potentialités du secteur.

En effet, outre la définition des programmes de développement dans les différentes filières, la prise en compte des aspects organisationnels et la mobilisation des financements que le PMV a assuré, il est primordial pour être efficient, de disposer de données fiables sur la quantité, mais aussi la qualité et la localisation de ces ressources. L'acquisition d'information et statistiques sur les cultures, les parcours, le cheptel et autre ressources agricoles est très importante pour une prise de décisions efficiente afin de gérer, planifier et décider des priorités d'allocation de ressources pour les filières à développer.

L'imagerie satellite et la télédétection constitue un outil important pour l'acquisition de ces données. Une fois l'information acquise, celle-ci doit être traitée intégrée à d'autres informations socio-économiques et analysée pour servir comme base pour une prise de décision fiable. Dans cette perspective, les systèmes d'information géographique constituent un complément incontournable à la télédétection, puisque couplés aux technologies de positionnement par satellite et aux moyens de calculs rapides, ils offrent un outil très puissant.

Les applications de la télédétection à l'agriculture, qui trouve leur fondement dans les travaux de William Allen et Wolley Joseph qui ont fourni la grande part de la théorie de base liant les caractéristiques morphologiques des plantes de culture et leurs propriétés optiques (Allen et al., 1969), sont largement utilisées de par le monde.

Au Maroc, la télédétection reste d'un usage très limité en agriculture et peut encore apporter pour appuyer les prises de décision.

L'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, institut polytechnique et composante importante dans le système de formation recherche dans les sciences agronomiques, de par les missions de formation recherche développement qui lui sont confiées et à travers elle l'accompagnement de l'agriculture marocaine dans son développement, accorde une place de choix à cette discipline dans ces missions.

Dans cette présentation nous allons essayer de retracer le développement de la télédétection, ou plutôt de la géomatique, puisque comme il a été souligné auparavant, la télédétection ne saurait conquérir toute son importance que lorsqu'elle est couplée aux systèmes spatiaux de positionnement et aux systèmes d'information géographiques.

Au niveau de la mission de formation, nous présentons les compétences et ressources disponibles ainsi que l'importance de la discipline dans le cursus de formation des ingénieurs dans les différentes spécialités. Nous développons également, au niveau de la mission recherche, les axes et unités de recherche qui développent et utilisent la discipline de télédétection, ainsi que les thématiques de recherche et projets conduits à l'IAV en relation avec cette discipline.

En terme d'applications, nous présentons quelques travaux ou l'implication des compétences de l'IAV a été très forte, et dont :

- Un projet de Conservation de la Biodiversité par la Transhumance dans le versant sud du Haut-Atlas (CBTHA), lancé en 2001 et supervisé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), et le Fonds pour l'Environnement Mondial. Dans cette étude, les images SPT XS ont été utilisées pour cartographier l'occupation des sols et la détection des changements des mises en culture.
- Le projet Désertification dans lequel Le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD) qui visait l'adaptation du Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification aux spécificités zonales. Le projet vise la mise en place d'un système de suivi rigoureux du processus selon des indicateurs spécifiques, en vue d'orienter la politique de lutte contre la désertification sur une base objective. La télédétection dans ce projet a été utilisée pour l'Elaboration de la carte de sensibilité des terres à la désertification à l'échelle nationale afin de choisir et mettre en place un observatoire pour le suivi de la désertification. La télédétection a été utilisée en conjonction avec les SIG, utilisant le modèle MEDALUS pour établir les cartes de sensibilité à la désertification
- Le projet «Incendie des forêts» qui a été lancé par le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification en collaboration avec la FAO pour faire face au phénomène récurrent et impondérable des incendies. La télédétection et les SIG ont été utilisés pour établir des cartes statiques du risque d'incendie. Un site WEB a également été mis en place pour évaluer le risque dynamique des incendies de forêts.

- Le PAPSA (Programme d'Appui à la Politique Sectorielle Agricole) qui est un projet du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime et financé par l'UE ou il a été demandé d'établir des plans de gestion écosystémiques globaux et spécifiques pour tenir de la composante environnementale dans les programmes et projets de développement agricole. Des données extraites des images LANDSAT TM5 et MODIS combinées avec des données provenant de sources diverses ont permis d'établir des cartes de formations végétales et les carte des tendances aux changements du couvert végétal.

En conclusion, nous présenterons les perspectives de développement de l'outil télédétection en agriculture et l'apport que certaines applications peuvent apporter au développement du secteur.

Introduction

Avec une population sans cesse croissante et la pression de plus en plus forte exercée sur les ressources naturelles et le souci d'assurer production agricole qui puisse assurer l'alimentation à cette population, une gestion moderne des ressources agricoles est nécessaire.

Pour moderniser son agriculture, le Maroc s'est doté depuis 2008 d'une stratégie, Plan Maroc Vert (PMV), qui pour répondre à ce besoin, vise entre autres, à Imprimer au secteur agricole une dynamique d'évolution harmonieuse, équilibrée et évolutive, mais également à exploiter les marges de progrès pour valoriser au mieux les potentialités du secteur.

En effet, outre la définition des programmes de développement dans les différentes filières, la prise en compte des aspects organisationnels et la mobilisation des financements que le PMV a assuré, il est primordial pour être efficient, de disposer de données fiables sur la quantité, mais aussi la qualité et la localisation de ces ressources. L'acquisition d'information et statistiques sur les cultures, les parcours, le cheptel et autre ressources agricoles est très importante pour une prise de décisions efficiente afin de gérer, planifier et décider des priorités d'allocation de ressources pour les filières à développer.

L'imagerie satellite et la télédétection constitue un outil important pour l'acquisition de ces données. Une fois l'information acquise, celle-ci doit être traitée intégrée à d'autres informations socio-économiques et analysée pour servir comme base pour une prise de décision fiable. Dans cette perspective, les systèmes d'information géographique constituent un complément incontournable à la télédétection, puisque couplés aux technologies de positionnement par satellite et aux moyens de calculs rapides, ils offrent un outil très puissant.

Les applications de la télédétection à l'agriculture, qui trouve leur fondement dans les travaux de William Allen et Wolley Joseph qui ont fourni la grande part de la théorie de base liant les caractéristiques morphologiques des plantes de culture et leurs propriétés optiques (Allen et al, 1969), sont largement utilisées de par le monde.

L'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, institut polytechnique et composante importante dans le système de formation recherche dans les sciences agronomiques, assure, de façon intégrée les missions de formation-recherche-développement. Les trois missions sont réfléchies de telle sorte à assurer un accompagnement de l'agriculture

marocaine dans son développement, et accorde une place de choix à la télédétection comme outil de collecte et d'analyse aux données relatives aux différents phénomènes pour supporter les décisions de planification et d'intervention.

2. La mission de formation

Dans la mission de formation, l'IAV forme des cadres dans six domaines différents, à savoir : l'agronomie, les industries agro-alimentaires, le génie rural, sciences géomatiques et ingénierie topographique, l'horticulture et la médecine vétérinaire. De par la structuration de ses programmes et la spécificité du profil formé la formations en sciences géomatiques et ingénierie topographique est une filière ou la télédétection, les systèmes d'information géographiques et le positionnement par satellite aux côtés d'autres disciplines occupent une place de choix dans le cursus. Mais au regard de leur forte implication dans la gestion de l'espace, des ressources naturelles et le besoin de puissants outils d'aide à la décision, les autres formations réservent également une place importante aux enseignements de la télédétection et des systèmes d'information géographique.

Des cours de télédétection ont été introduit dans le cycle de formation des ingénieurs depuis le début 80's. Une simple inspection des programmes des activités pédagogiques révèle que le volume horaire réservé aux seuls enseignements de télédétection dans les différents départements de l'IAV totalise 210 heures de cours.

Ces disciplines sont assurées par un corps d'enseignants et les compétences de l'Établissement qui ont été formés dans plusieurs universités prestigieuses à travers le monde, dont : le Canada, les Etats-Unis d'Amérique, la France, la Belgique, le Japon ... etc. Leurs intervention concernent les domaines de : Cartographie des espèces forestières, Cartographie et qualité des sols, positionnement par satellite, extraction automatique des objets, détection des changements, qualité des données...

3. Mission recherche

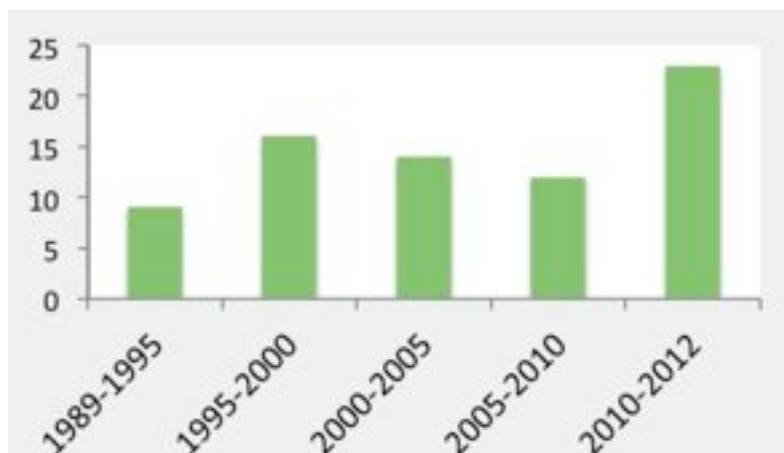
La stratégie de recherche à l'IAV Hassan II repose sur une approche fondée sur la conjugaison de l'excellence scientifique, l'interdisciplinarité entre sciences du vivant, sciences de la matière et sciences humaines, en intégrant les nouvelles technologies et l'écoute responsable des attentes des différents acteurs de la société. La vision dans cette stratégie est d'accroître l'impact de la recherche scientifique sur le développement et la formation en rehaussant les capacités de recherche au plan institutionnel et en élaborant une politique sur la recherche stratégique et la recherche-développement.

Dans sa stratégie de recherche de l'IAV s'appuie sur la définition, la hiérarchisation et le choix d'actions ciblées pour assurer la génération de nouvelles connaissances scientifiques, de savoir-faire et de technologies adaptées aux conditions du pays. Ces actions convergent vers la contribution aux efforts de développement arrêtés dans le cadre national des orientations du Département de l'Agriculture. Elle a été conçue sur la base :

- des orientations stratégiques prises pour la recherche agricole nationale,
- de la nécessité de garder et de renforcer la spécificité de l'IAV Hassan II concernant l'intervention au niveau de la recherche agricole,
- des capacités de recherche existantes et potentielles,
- des réformes récentes dans le système de l'enseignement supérieur et la mise en concordance de l'IAV avec les textes des réformes adoptées.

La recherche scientifique dans l'Établissement a pris son développement avec le vaste programme de formation des formateurs initié avec des universités américaines, avec un programme de doctorat en «sandwich». D'un autre côté, dans le cadre de la formation qui s'étalait sur six ans, la recherche scientifique a naturellement pu trouver sa place en faveur des mémoires de fin d'études qui s'étalaient sur une année entière.

Dans les différentes recherches réalisées, la télédétection a occupé une place importante. Le graphe suivant donne l'évolution de l'activité de recherche dans ce domaine à travers le nombre de mémoires et thèses appliquant la télédétection à l'agriculture.



Fondée au départ sur des initiatives individuelles des scientifiques autour de leurs thématiques d'expertise, l'action de recherche a ensuite été restructurée sur la base d'une politique scientifique institutionnelle affirmée qui incite au regroupement des équipes de recherche, à l'intensification des contrats d'association avec des partenaires et à une plus forte présence des équipes au sein de programmes scientifiques internationaux.

L'opportunité offerte par les grands chantiers stratégiques du pays, notamment «le Plan Maroc Vert» et «le Plan Halieutis», ainsi que la restructuration du système d'enseignement recherche, ont permis à l'Établissement de structurer l'activité de recherche en identifiant les points d'ancrage dans les axes et les priorités de ces plans.

Dans sa stratégie de recherche, l'IAV Hassan II a défini dix axes de recherche en accord avec les priorités nationale de la recherche scientifique et également en harmonie avec les priorités du Plan Maroc Vert. Au moins 4 parmi les dix axes inscrivent la télédétection comme thématique importante dans l'activité de recherche, et dont :

- **Axe 1:** Gestion de l'espace, préservation de l'environnement et exploitation rationnelle de la biodiversité agricole pour une production durable
- **Axe 3:** Gestion économique de l'eau d'irrigation, étude du climat et mitigation de la sécheresse
- **Axe 4:** Intégration des nouvelles technologies d'information et développement des systèmes de télédétection et d'information géographique
- **Axe 7:** Développement des bases de l'agriculture de précision et de l'agriculture biologique

Dans le cadre de la création du centre des études doctorales également, plusieurs des unités de recherche accréditées accordent une grande importance à la télédétection dans leurs activités de recherche, parmi les 22 unités accréditées, on peut citer :

- **UR 4** : Application de Nouvelles Technologies en Agriculture
- **UR 16** : Gestion des ressources en eau : Eau, irrigation et infrastructures
- **UR 18** : Développement de concepts, d'outils et de modèles en géomatique.
- **UR 19** : Technologies de l'espace au service du développement territorial de la gestion des ressources naturelles et du suivi de l'environnement.

**Matrice montrant certaines thématiques traitées
Par les unités de recherche dans le cadre des axes de recherche de l'établissement**

	Axe 1 Gestion espace	Axe 3 Gestion Eau	Axe 4 Nouvelles technologies	Axe 7 Agriculture de précision
UR 4 ANTA	Cartographie des espèces forestières	Management des ressources en eau et des sols	Détection des changements	Détection des changements
UR 16 Eau		Changements climatiques et ressources en eau		
UR 18 concepts	Urbanisation et agriculture		Extraction automatique des objets	Dégradation de la végétation
UR 19 Espace	l'érosion des sols		Positionnement par satellite	Cartographie et qualité des sols

La politique scientifique de l'Etablissement incite au regroupement des équipes de recherche, à l'intensification des partenariats aussi bien avec le monde scientifique et universitaire qu'avec la profession à une plus forte présence des équipes au sein de programmes scientifiques internationaux.

Dans le domaine de la télédétection, plusieurs programmes de recherche ont été menés avec des équipes universitaires étrangères, dont nous citons :

4. Mission Développement

L'activité de développement a initialement démarré grâce à des initiatives individuelles ou grâce aux projets conjoints entre l'Institut et différentes structures nationales de développement et /ou de recherche. L'Etablissement a su rester toujours à l'écoute des attentes des partenaires économiques et sociaux afin de consolider son intervention à l'échelle des régions à travers des partenariats avec les professionnels.

Dans ce cadre plusieurs projets dans le domaine de la télédétection ont pu être réalisés avec partenaires (laboratoires et universités) étrangers, ou avec des partenaires nationaux et dont nous présentons certains exemples.

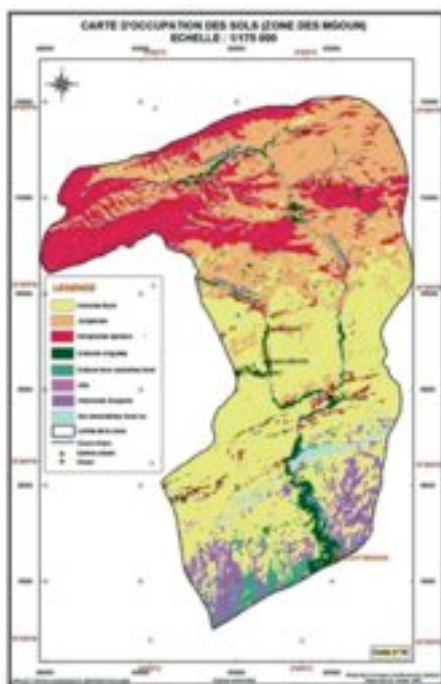
En partenariat avec des laboratoires et instituts étrangers, plusieurs projets de recherche ont été menés, dont :

- Projet SIGMA : Système d'information géographique pour la mise en valeur agricole des terres arides et semi-arides non-irriguées.
- Action de Recherche Concertée (ARC) «Télédétection des ressources en eau» effectuée dans le cadre d'un réseau de quatre laboratoires appartenant à autant de pays du Nord et du Sud dont le Laboratoire de conservation des sols et de l'eau de l'IAV Hasan II.
- Cartographie et calcul de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et d'un SIG : cas du bassin versant d'oued Aricha (Settat).

Les chercheurs de l'IAV ont également contribué dans d'autres projets avec des partenaires nationaux divers. Les projets en question concernent :

a. Projet 1 : Conservation de la Biodiversité

Un projet de **Conservation de la Biodiversité par la Transhumance** dans le versant sud du Haut-Atlas (CBTHA), lancé en 2001 et supervisé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), et le Fonds pour l'Environnement Mondial. Dans cette étude, les images SPOT XS ont été utilisées pour cartographier l'occupation des sols et la détection des changements des mises en culture.



Le projet a concerné une zone d'action qui s'étend sur une superficie de 700 000 ha. La population cible est constituée par les éleveurs et leurs familles, les agro-pasteurs, les chefs coutumiers, les femmes utilisant les ressources naturelles et des bénéficiaires secondaires représentés par les éleveurs transhumants utilisant cet espace d'une manière coutumière et temporaire. La population cible correspond aux ethnies des Aït Sedrate, les M'goun et les Imaghranes. Les autres bénéficiaires ciblés sont : (1) le personnel technique des administrations partenaires du projet en lui assurant une formation et un renforcement de ses capacités et (2) le secteur privé du tourisme en lui assurant la formation et l'élaboration d'une charte d'éco-tourisme.

Son objectif principal était de conserver la biodiversité dans le paysage productif du versant sud du Haut Atlas par l'utilisation durable et la relance de la transhumance. Ce projet a permis la conception et la mise en

œuvre de 12 plants intégrés de conservation de la biodiversité et de gestion durable, et la réalisation d'études et d'inventaires liés à la biodiversité ainsi que l'organisation de formations et de journées d'information.

Dans cette étude les images SPOT XS ont été utilisées pour la cartographie du couvert végétal, la détection des changements en vue de l'élaboration du plan intégré de conservation de la biodiversité et de gestion durable.

b. Projet 2 : Désertification

Le projet **Désertification** est une étude dans laquelle Le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD) visait l'adaptation du Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification aux spécificités zonales. Le projet vise la mise en place d'un système de suivi rigoureux du processus selon des indicateurs spécifiques, en vue d'orienter la politique de lutte contre la désertification sur une base objective. La télédétection dans ce projet a été utilisée pour l'Elaboration de la carte de sensibilité des terres à la désertification à l'échelle nationale afin de choisir et mettre en place un observatoire pour le suivi de la désertification. La télédétection a été utilisée en conjonction avec les SIG, utilisant le modèle MEDALUS pour établir les cartes de sensibilité des terres à la désertification.



Les paramètres d'entrée à ce modèle sont l'indice de surpâturage, l'indice de la qualité de la végétation, l'indice de la qualité du climat et l'indice de l'érosion.

- L'indice de surpâturage est défini par le rapport de la charge réelle à celle d'équilibre. En premier lieu, il a été question d'acquérir les données sur les effectifs du bétail par espèce (bovin, ovin, caprin et camelin) et par commune rurale. La somme des 4 types de bétail exprimée en UPB est divisée par la superficie des terrains de parcours au niveau de la commune pour déterminer la charge réelle.
- L'Indice de Qualité de la Végétation (IQV) a été dérivé par la superposition des données sur le Risque d'Incendie (RI), la Résistance à la Sécheresse (RS), la Protection contre l'Erosion (PE) et sur le Couvert Végétal (CV).
- L'indice de qualité du climat a été dérivé par la superposition des données sur les précipitations totales (PP) et de l'indice d'aridité bioclimatique de Bagnouls-Gaussien (IA). Ce dernier est plus facile à déterminer que l'évapotranspiration potentielle.
- La carte de l'érosion sols a été élaborée en considérant les états érosifs éoliens et hydriques des sols. Les états érosifs éoliens des sols ont été obtenus par superposition de la texture des sols et de la vitesse du vent. Pour les états érosifs hydriques des sols, il a été question d'abord de dériver la carte de l'érosion hydrique potentielle par

superposition de la carte de friabilité des sols et celle des pentes. De même, la carte des états érosifs hydriques des sols a été générée par superposition de la carte des états érosifs hydriques des sols et celle de la protection des sols.

- Dans cette étude, la carte de texture et de friabilité des sols ont été générées à partir de la carte des sols par reclassification thématique.
- La carte de protection des sols a été dérivée à partir de la carte de l'occupation des sols. Cette dernière a été élaborée par superposition de la carte des grands systèmes agricoles, carte des essences forestières et carte des grands écosystèmes pastoraux.
- La carte des pentes a dérivée à partir du Modèle Numérique du terrain de résolution de 30 m.

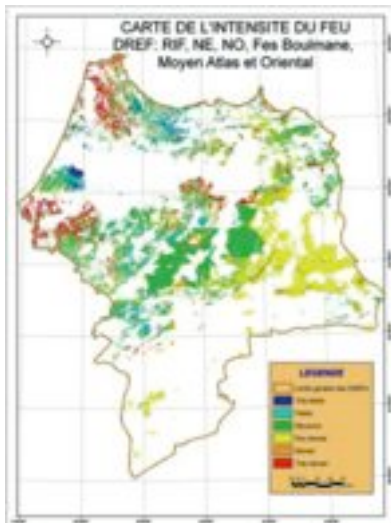
Enfin la **carte de sensibilité des terres à la désertification (ISD)** a été obtenue en superposant la carte de l'Indice de l'Erosion (IE), de l'Indice de la Qualité du Climat (IQC), l'indice de la Qualité du Couvert Végétal (IQV) et de l'Indice du Surpâturage (IS) sous SIG selon la formule ci-dessous :

$$ISD = (IE * IQC * IQV * IS)^{1/4}$$

c. Projet 3 : Incendies de forêts

Le projet «Incendie des forêts» été lancé par le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification en collaboration avec la FAO pour faire face au phénomène récurrent et impondérable des incendies. La télédétection et les SIG ont été utilisés pour établir des cartes statiques du risque d'incendie. Un site WEB a également été mis en place pour évaluer le risque dynamique des incendies de forêts.

Le Plan Directeur de lutte contre les incendies vise la mise en place d'un dispositif cohérent et efficace pour la maîtrise de ce fléau à travers, entre autres :



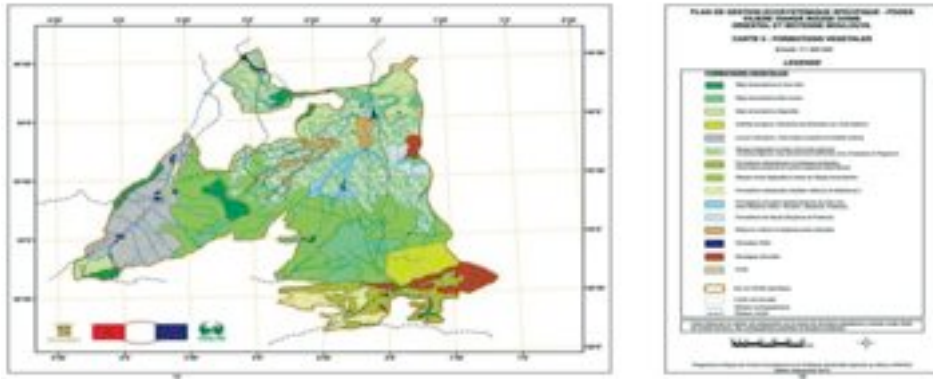
- l'élaboration d'outils de prédiction permettant d'évaluer le danger et d'anticiper sur le risque d'incendie au moyen de mesures préventives et dissuasives adéquates,
- l'optimisation et l'amélioration de l'efficacité des équipements et des moyens d'intervention,

En effet, le risque des incendies de forêts est constitué essentiellement du risque d'éclosion et du risque de propagation qui dépendent, en plus des conditions météorologiques, d'un certain nombre de facteurs du milieu dont notamment : le type de végétation (structure et composition) et son état de dessèchement ainsi que la pente et l'exposition aux vents dominants.

L'étude a pour objet de développer une approche interdisciplinaire et intégrée pour mieux comprendre le phénomène incendie et développer en conséquence un modèle approprié qui explique mieux le risque d'incendie des forêts. Ceci permettra ainsi de prendre les meilleures décisions en termes d'aménagement et d'intervention en cas d'incendie de forêt.

C'est dans ce cadre que des cartes de risque statique ainsi que des cartes de risque dynamique des incendies de forêts ont été élaborées.

d. Projet 4 : Plans de Gestion Ecosystémique



Cartographie des formations végétales en utilisant les images Landsat TM5

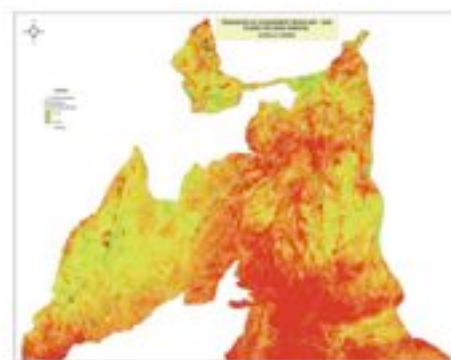
Connu sous le nom de **PAPSA** (Programme d'Appui à la Politique Sectorielle Agricole) ce projet du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime et financé par l'UE ou il est demandé d'établir des plans de gestion écosystémiques globaux et spécifiques pour tenir de la composante environnementale dans les programmes et projets de développement agricole.

Le PAPSA se propose, entre autres, d'apporter l'appui et l'encadrement nécessaires à la composante transversale «Développement durable» du PMV par l'élaboration de **plans de gestions écosystémiques (PDGE)** participatifs, globaux et spécifiques, par filière, pour les territoires concernés par les projets PAR-ADA et leurs aires d'influence (de façon à considérer l'ensemble des sources de pression).

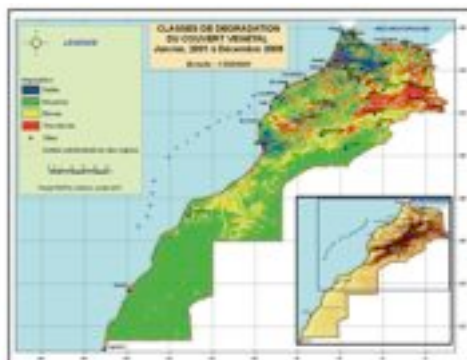
Des PDGE spécifiques à chaque entité territoriale, indiqueront de manière précise et opérationnelle les stratégies de gestion et les activités de développement durable pour le territoire concerné par les actions PAR du PMV pilier 2 pour la filière ciblée, incluant son aire d'influence.

Ces PDGE globaux vont permettre de tracer les grandes tendances et orientations stratégiques pour le développement durable de chaque filière ciblée et des écosystèmes qui la soutiennent, ainsi que les préalables nécessaires pour la mise en œuvre réussie des PDGE spécifiques.

Des données extraites des images LANDSAT TM5 et MODIS combinées avec des données provenant de sources diverses ont permis d'établir des cartes de formations végétales et les carte des tendances aux changements du couvert végétal.



Tendances au changement MODIS
2001 - 2009



Dégradation du couvert végétal en utilisant les
images MODIS 2001 - 2009

Tableau synthétique des projets

Projet	Données	Méthodes et modèles	Télédétection/SIG	Résultat
CBTHA	SPOT XS	- Classification supervisées suivie par convolution floue - Différence d'images	Télédétection	- Occupation des sols - Détection des changements des mises en cultures
Désertification	Variées	- Modèle MEDALUS	SIG	Carte de sensibilité à la désertification
Mise ne place d'observatoires de suivi de la désertification	Variées + NDVI images MODIS	- Modèle Saaty	Télédétection et SIG	Réseau d'observatoires
Risque statique et dynamique d'incendie des forêts	Variées	- Diversees formules + formule de Byram pour le calcul de l'intensité du feu	SIG	Cartes statiques du risque d'incendie Site WEB du risque dynamique des incendies de forêts
PAPSA	Variées + LANDSAT TM5 + MODIS	- Classification supervisée - ANalyse de tendance saisonnière	Télédétection et SIG	Carte des formations végétales Carte des tendances aux changements du couvert végétal

- Pr. Mohamed BESRI (Modérateur)

Merci beaucoup Pr. Ettarid pour cet exposé extrêmement intéressant et très complet sur les relations entre la télédétection et l'agriculture. Je crois que vous avez réussi à tracer et à nous expliquer quels sont les liens étroits qui existent entre la télédétection et l'agriculture. Nous avons écouté et compris les principes de la télédétection, la problématique de l'eau et des cultures et l'intérêt de la télédétection pour mesurer le stress des plantes qu'il soit biotique ou abiotique, mais également pour l'estimation des rendements. La dernière partie était réservée à l'implication de l'IAV Hassan II dans la formation, la recherche et le développement dans le domaine de la télédétection ainsi l'importance des projets de recherche dans la formation des jeunes mémorisants et des jeunes doctorants.

M. Riad Balaghi, qui est chercheur à l'INRA, et M. Mohamed Badraoui, qui en est le Directeur Général, ont accepté l'invitation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques pour présenter un exposé sur la prédiction agro-météorologique des rendements céréaliers au Maroc. C'est M. Balaghi qui va faire l'exposé.

LA PRÉDICTION AGROMÉTÉOROLOGIQUE DES RENDEMENTS CÉRÉALIERS AU MAROC

Dr. Riad BALAGHI & Pr. Mohamed BADRAOUI

*Institut National de la Recherche
Agronomique (INRA) Rabat, Maroc*



Dr. Riad BALAGHI

Résumé

La sécurité alimentaire repose sur une céréaliculture sensible aux aléas climatiques, aussi bien au Maroc que dans le monde. La production nationale de céréales est fortement exposée au risque climatique car elle est localisée essentiellement dans les zones arides et semi-arides qui présentent des ressources en sol et en eau limitées, insuffisantes par rapport aux besoins de ces cultures. En année moyenne, la production céréalière nationale ne suffit pas à couvrir les besoins alimentaires voire industriels du pays. Ces besoins sont en partie importante assurés par les importations qui pèsent lourdement sur la balance commerciale du pays. Le poids du déficit céréalier est appelé à croître en raison de l'augmentation des prix des produits céréaliers sur le marché international, qui est due à une demande soutenue, à la hausse du coût de certains intrants, à la spéculation internationale, à l'utilisation des matières premières agricoles pour la production de biocarburants et aux conséquences du changement climatique.

Le suivi de la campagne agricole ainsi que la prédiction des récoltes est une composante essentielle de la gestion du risque climatique. Dans le monde développé, mais surtout dans les pays en voie de développement, peu d'expériences de systèmes opérationnels et fiables de prédiction des récoltes agricoles sont connues. Dans les pays disposant de tels systèmes, on se rend compte qu'ils sont souvent la résultante d'une bonne gouvernance climatique avec la mise en place de programmes de recherche appliquée à long terme avec des équipes dédiées.

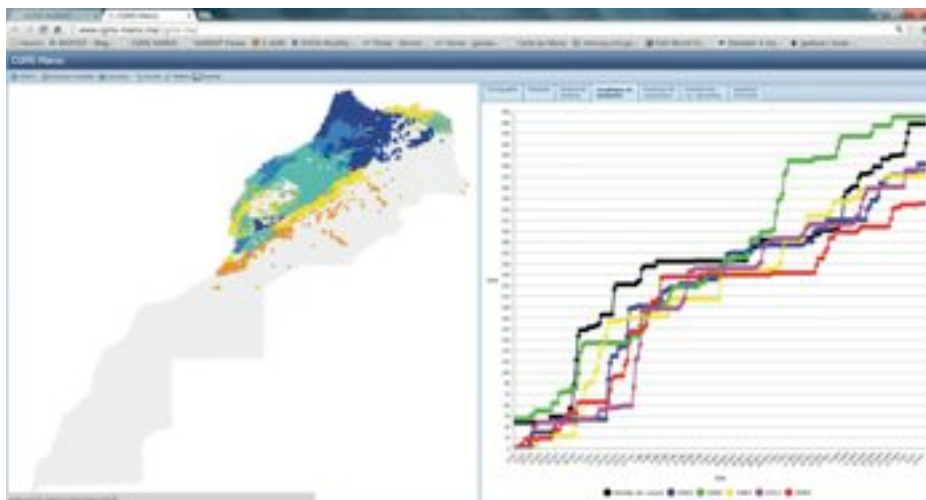
Les recherches de long terme, entreprises par l'INRA depuis le début des années 1990, ont permis de développer une approche scientifique dite «combinée» pour suivre l'état des cultures et pour prédire les récoltes céréalières au Maroc, en partenariat avec des institutions de recherche internationales : le Joint Research Centre (JRC, Union Européenne), l'Institut flamand de recherche technologique (VITO, Belgique), Alterra (Université de Wageningen, Pays-Bas), et l'Université de Liège (Belgique). Cette approche met à contribution des informations agronomiques, météorologiques et satellitaires qui sont traitées par des techniques d'analyses statistiques, parfois simples et d'autres fois très pointues ainsi que par des modèles de simulation.

Grâce à un développement technologique, entrepris depuis 2007 en collaboration avec le Centre de Recherche Commun de l'Union Européenne, cette approche scientifique a été formalisée dans un système national de prédiction des récoltes céréalières, appelé «**CGMS-MAROC**» (*Crop Growth Monitoring System – Maroc*, www.cgms-maroc.ma).

Le développement du système a également été appuyé par des institutions de recherche européennes et financé en partie par l'Union Européenne. CGMS-MAROC est piloté par l'INRA et géré en consortium formel avec la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et la Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS) du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime.

CGMS-MAROC est composé d'une interface Web de suivi bioclimatique de la campagne agricole, hébergée à l'INRA (www.cgms-maroc.ma), et d'un logiciel de traitement statistique, appelé CGMS Statistical Tool (CST), qui permet de prédire les récoltes céréalières à l'échelle nationale, au niveau des zones agro-écologiques et à l'échelle des provinces. L'interface Web est alimentée quotidiennement en données climatiques (Pluviométrie, température, évapotranspiration de référence) provenant de toutes les stations synoptiques de la DMN ainsi qu'en produits d'images satellitaires (NDVI, DMP), provenant chaque 10 jours du VITO. Elle permet le suivi bioclimatique de la campagne agricole à l'échelle des provinces et communes, et également de procéder à des analyses préliminaires de l'état de la campagne agricole.

Le logiciel CST, qui est alimenté en données météorologiques, satellitaires et agricoles, permet de procéder à des analyses statistiques poussées, afin de prédire les rendements céréaliers des trois principales céréales (blé tendre, blé dur et orge), à l'échelle nationale, des zones agro-écologiques, des provinces et des communes.



Le système CGMS-MAROC de suivi et de prédiction de la production céréalière. Sur la fenêtre gauche la pluviométrie cumulée sur la saison sur les zones agricoles, à l'échelle du pays (grilles de 10x10 km). Sur la fenêtre droite, la pluviométrie cumulée dans la commune de Ben Ahmed (Settat), prise comme exemple, est comparée aux données historiques afin de détecter des similarités avec les campagnes agricoles antérieures.



Le logiciel «CGMS Statistical Toolbox» d'analyse statistique, pour la prédiction des rendements céréalières.

CGMS-MAROC est ainsi le premier système opérationnel de suivi de la campagne agricole et de prédiction agrométéorologique des récoltes céréalières au Maroc, institutionnalisé par un partenariat stratégique qui permet son développement et sa pérennisation. CGMS-MAROC est utilisé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, en appont des enquêtes statistiques standard de terrain, pour réaliser le suivi de la campagne agricole et estimer précocement la production céréalière, à partir du début du mois de mars.

Des bulletins de suivi de la campagne agricole et de prédiction des rendements céréaliers des campagnes agricoles de 2008-2009 à 2012-2013 (disponibles sur le site Web de l'INRA), ont été réalisées grâce à CGMS-MAROC.

Les recherches prévoient d'intégrer prochainement dans CGMS-MAROC des modules de prévision saisonnière du climat (2 à 3 mois), développés par la DMN, de façon à anticiper les événements météorologiques majeurs (pluie, vagues de chaleur et froid). De même, il est envisagé d'y incorporer des modules de prévision des aléas biotiques (maladies, insectes). Le système permettra donc de développer des produits d'avertissement agricole, au profit des agriculteurs ou des conseillers agricoles, qui pourraient bénéficier au conseil agricole. Le champ d'action de l'avertissement agricole est large, pouvant inclure, en plus de la protection phytosanitaire, la gestion de la fertilisation, de l'irrigation d'appont ou le choix de la date de semis des céréales. C'est un champ de recherche appliquée à développer au Maroc, qui peut avoir des retombées positives importantes sur l'agriculture et l'environnement.

L'intérêt additionnel de ce système de prédiction est qu'il permettrait d'aborder le marché international des céréales dans les meilleures conditions. Il permettrait également de planifier à l'avance les aides aux agriculteurs, de quantifier les impacts des sécheresses lorsqu'elles surviennent dans la perspective d'indemnisations par l'assurance agricole par exemple.

Cette recherche scientifique de long terme entreprise par l'INRA a été publiée dans un livre novateur de vulgarisation scientifique avancée, qui expose les étapes d'élaboration des approches de prédiction développées à l'INRA ainsi que les technologies utilisées par le système CGMS-MAROC, livre disponible à l'adresse suivante :

<http://www.inra.org.ma/publications/ouvrages/prediction1212.pdf>).

Ce livre est destiné aux professionnels, praticiens, universitaires et étudiants désirant comprendre comment le climat agit sur la production agricole au Maroc et comment utiliser ce savoir pour appuyer la gestion du risque climatique de façon générale et prédire les récoltes céréalières en particulier. Il présente également une mise en perspective des connaissances actuelles, par rapport aux approches éprouvées par le passé, dans le domaine de l'écologie végétale et de l'agrométéorologie opérationnelle.

- Pr. Mohamed BESRI (Modérateur)

A part ce que vient de dire el Pr. Albert Sasson, le temps du chercheur travaillant tout seul dans son coin est révolu. Actuellement les choses ont beaucoup changé. Pour faire du développement, pour faire de la recherche, nous avons besoin d'équipes pluridisciplinaires et multi-institutionnelles et de la coopération internationale et donc développer des partenariats Sud-Sud, Sud-Est, etc. Les pays du Nord ont pris conscience de l'intérêt qu'ils peuvent tirer de la coopération avec les pays du Sud, pour preuve les nombreux projets de coopération qui se mettent en place et qui sont financés par l'Union Européenne et par d'autres organismes européens ou internationaux.

Je crois que le Maroc a actuellement les moyens humains et matériels pour relever tous les défis se posant à l'agriculture et l'exemple qui a été donné par le Pr. Ettarid est extrêmement édifiant. L'IAV Hassan II a pu former en topographie de brillants chercheurs qui sont connus tant sur le plan national qu'international.

La recherche ne peut pas se faire sans une solide collaboration entre institutions, elle n'est plus individuelle mais pluridisciplinaire comme le montre la coopération entre l'INRA, la DSS et la Direction de la Météorologie Nationale pour la prédiction des rendements céréaliers. Chaque partie apporte ses moyens et son expertise, mais il reste beaucoup à faire pour parfaire les prédictions.

Merci beaucoup.

Session Parallèle 3 :
Physique et Sciences économiques

Modérateur : Pr. Nouredine EL Aoufi

INTRODUCTION : QUAND LA PHYSIQUE S'INVITE DANS L'ÉCONOMIE

Pr. Rachid BENMOKHTAR BENABDELLAH

*Directeur de l'Observatoire National
du Développement Humain - Rabat, Maroc*



Résumé

Entre la physique et l'économie les liens sont très anciens. Ils se sont renforcés avec les évolutions profondes ayant marqué le monde économique depuis la fin du siècle dernier, faisant dépendre de façon plus étroite les politiques économiques des fluctuations récurrentes et imprévisibles des phénomènes économiques, réels et financiers.

Les enseignements de la physique quantique ont été décisifs pour la science économique et se sont traduits par une prise en compte des phénomènes d'instabilité et de crise comme faisant appel au calcul des probabilités, aux mathématiques du hasard pour résoudre les questions de risque et d'incertitude.

Ce «nouveau paradigme», incorporant les résultats des sciences exactes, notamment de la physique, est fondé sur des élaborations théoriques et empiriques nouvelles autour des concepts de chaos, de liens entre l'ordre et le désordre (Dupuy, *Ordres et désordres*, Seuil, 1982), d'auto organisation, d'autonomie, etc. (voir Dumouchel et Dupuy dir., *L'auto organisation*. De la physique au politique, Colloque de Cerisy, Seuil, 1983), de trajectoires, d'irréversibilité (Boyer, Chavance et Godard dir., *Les figures de l'irréversibilité en économie*, EHESS, 1991).

La montée en régime de la financiarisation à partir des années 1980-90 n'a pas manqué de renforcer la prégnance des catégories de volatilité, de risque et d'incertitude dans les domaines aussi essentiels que la microéconomie des marchés, la macroéconomie financière, la démographie, la décision économique, l'analyse comportementale, la théorie de la décision, l'économie du développement, etc.

L'objectif de cette session parallèle, qui s'inscrit dans le cadre du thème général de la session de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques (voir Note de présentation), vise à faire le point sur développements récents de la discipline économique liés, peu ou prou, aux avancées théoriques des sciences de la physique, à ses applications transdisciplinaires et à sa portée épistémologique dans les domaines de la macro-économie, de la finance, du management, de la croissance, du développement, etc.

L'ÉCONOMIE EXPÉRIMENTALE : QUEL RAPPORT À LA PHYSIQUE

Pr. Guillaume HOLLARD

*Centre d'Economie de la Sorbonne,
Paris, France*



Résumé

La théorie économie partage avec les sciences physiques plusieurs points communs. En particulier, l'économie s'est dotée d'outils expérimentaux multiples (expériences en laboratoire, expériences de terrain, recours aux outils d'observation en provenance des neuro-sciences, etc).

L'objet de cette intervention sera de faire un bilan de ces méthodes et de les comparer aux techniques expérimentales en vigueur dans d'autres sciences. Cela permettra d'en faire ressortir les limites et de dessiner des perspectives pour l'approche expérimentale en sciences sociales.

La question du risque servira de fil conducteur à l'exposé.

CHINA'S ECONOMIC DEVELOPMENT

Pr. Yu YONGDING

Membre de l'Académie des Sciences Sociales de Chine

*Membre associé de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*



China's pre-reform growth model : Fel'dman model

- Capital goods are divided in two sectors: capital goods sector and consumer goods sector
- The ratio $I_1/I = r$ will decide the dynamics of the two sectors
- *Current slower growth in the consumer goods sector implies higher growth in the capital goods sector, which will lead to higher growth in consumer goods sector in the future*
- In practice, policy is aimed at achieving highest the higher the investment rate the better

$$C = Y_2 = \frac{K_2}{V_2}$$

$$= C_0 + \frac{1-r}{r} \frac{V_1}{V_2} \left[\left(1 + \frac{r}{V_1} \right)^t - 1 \right]$$

Mahalanobis, a confirmed Left intellectual, had lifted a Soviet growth model of the 1920s authored by Fel'dman, and introduced it into Indian planning without acknowledging the original authorship. For years, Fel'dman's model was passed off in India as "Mahalanobis' Growth Model", till MIT economist Evsey Domar discovered the truth, and laid it bare." **BIBEK DEBROY**

East Asian Model

- High investment rate supported by high saving rate
 - In 1990s, the investment rate was about 35 percent
 - The saving rate was also very higher (lower than the investment rate)
 - High investment in human capital (education expenditure 3.7 percent of GDP, secondary education was emphasized)
- Emphasis on the importance of efficiency
 - Market competition and coordination
 - Industrial policy
 - Outward-looking growth strategy
 - export-promotion
 - Capital importing

The Chinese model

- Initial conditions : socialist heritage
 - Public ownership of lands and other properties
 - relative good infrastructures
 - A self reliant and self sufficient industrial structure
 - A relative good education system
 - A hard working and skilled work force and a large amount of well-trained engineers
 - An effective government administration
- High investment rate supported by high saving rate
- Preference treatment to FDI
- Export promotion
- A conservative fiscal policy
- A very expansionary monetary policy

achievements

- GDP
 - The second largest in the world
 - Share of world GDP 11% in 2011 vis-à-vis 1% in 1978
- GDP per capita
 - 5417 US dollar in 2011 vis-à-vis 155 US dollar in 1978
 - 89th in the world in 2011 vis-à-vis the second last in 1987
- Trade
 - The largest in the world vis-à-vis negligible in 1978
- Foreign exchange reserves
 - Almost zero in 1978 to 3.2 trillion US dollar in 2011

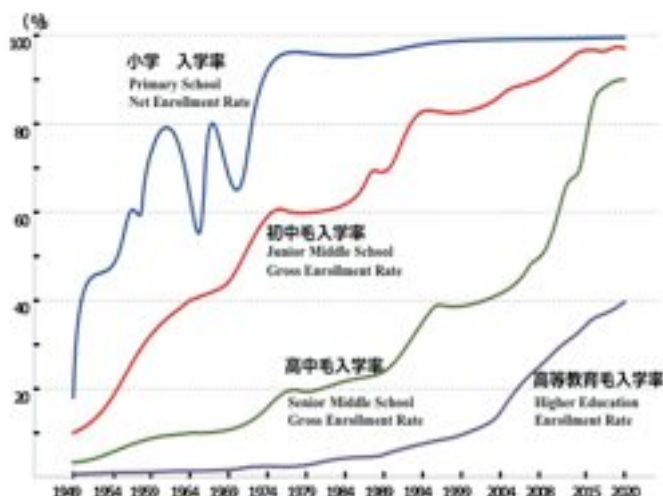
Major tasks in the next decade and beyond

- Human capital
- Infrastructure
- Innovation and creation
- Rebalancing the international and external economy

Some main development targets in the 12th five-year plan (2010-2015)

- GDP : 55.8 trillion yuan, 7%
- Job creation : 45,000,000
- Share of services : 47% of GDP, 4 percentage point higher
- Urbanization rate : 51.5%, 4 percentage point higher
- Share of value-added of merging strategic industries : 8% of GDP
- Education indicators : next slide
- R&D expenditures : 2.2% of government expenditures
- Disposable income : 26810 (urban), 8310 (rural), yuan>7%
- Population 13.9 billion
- Life expectancy : 74.5

School enrollment rates



Source : Angang Hu : China : from Populous Country to Superpower of Professionals in the World, 2010

Number of engineers and scientists

- Full time engineers and scientists engaged in R&D activities in selected countries (thousand, 1980-2030)

	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2007	2009	2020	2030
China	323	336	350	547	69.3	1112	1423	1820	3000	4500
US	651	802	924	985	1264	1356	1426	1413	1800	2200
EU				1056	1087	1288	1448	1599	1800	2300
Japan	625	763	906	992	1045	1010	1052			
Russia				563	505	465	469			
World				5382	6876	8226	7210		1000 0	1500 0
US/China	2.0	2.4	2.6	1.8	1.8	1.2	1.0	0.78	0.60	0.49

The Building of National Expressway Network

- As of the end of 2010, China had 74,000 kilometers of expressways.
- By 2020, China expects to have 83,000 kilometers of expressways. This compares to the US total of approximately 92,000 kilometers, including non-interstate freeways.
- 7 radiate, 8 vertical and 18 horizontal lines Reach to all cities with population more than 200,000.



China's construction of railway system

- 4 vertical and 4 horizontal lines
- Reach all cities with more than 500,000 population
- By the end of 2010, the operating rail network traverses the length and breadth of the country, covering a total length of 91,000 km (56,545 mi), making only the rail networks in the United States and Russia larger in size.
- **High-speed rail in China**
with an average speed of 200 km/h (124 mph) or higher
- China has the world's longest high-speed rail (HSR) network with about 9,676 km as of June 2011
- By the end of 2015: 45,000 km



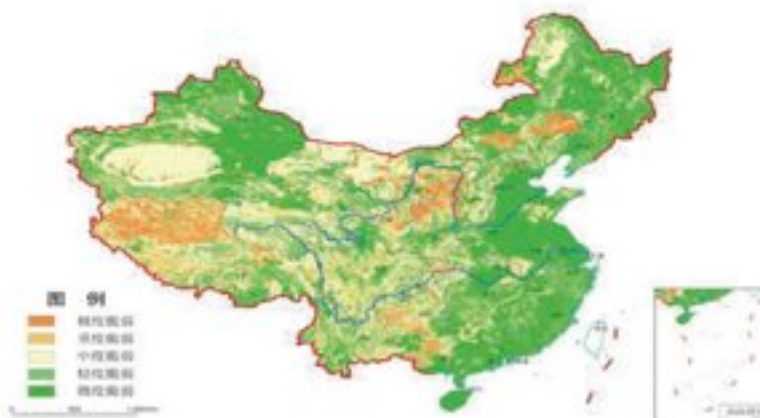
Planning for geographic distribution of economic activities

- China is divided into four types of regions
 - Priority development areas
 - Important development areas
 - Limited development areas
 - Forbidden areas for development
- The division is based on
 - Natural conditions
 - Historical conditions

Division of labor of different type of functional areas

- For the priority and targeted areas
 - Urbanization
 - Industrial products and services
- For the limited development areas and development forbidden areas
 - Agricultural products
 - Ecological products

For Example : Ecological vulnerable areas



the focus of the 12th five-year Plan : innovation and creation

Table 35. The new Magic 7

Emerging strategic industries	Main content
Energy-saving and environmental protection	Energy efficiency, advanced environmental protection, recycling
Next generation information technology	Next-generation communications networks, Internet of things, network convergence, new flat panel display, high-performance integrated circuits and high-end software
Bio-technology	Bio-medicine, bio-agriculture, bio-manufacturing
High-end manufacturing	Aeronautics & astronautics, marine engineering equipment, high-speed rail, high-end smart equipment
New energy	Nuclear, solar, wind, biomass
New materials	Special function and high-performance composite materials
Clean-energy vehicles	Plug-in hybrid vehicles and pure electric cars

Source: State Council (http://www.gov.cn/jdhd2010-09/08/content_168664.htm)

Why china emphasize indigenous innovation and creation

A Case : China's automobile industry

- In 2009, China produced 13.9 million unit cars, surpassing the US to become No.1 car producing country in the world
- However
 - 90 % of the cars are foreign models produced by joint ventures
 - Prices of the cars are much higher than international prices
 - Some 80% of real revenues are obtained by the foreign partners of joined venture

The achievement of China's automobile industry

After 20 years' "market for technology",

- Not a single car model has been developed by Chinese car makers independently
- All platforms of development established by Chinese car makers before the joint ventures have disappeared
- The production in the joint venture has been increasingly subject to the sway of foreign partners

The problem with the automobile industry:
state monopoly + preferential FDI policy

- Create **high barriers** to new entries so as to protect the monopoly of a few large joint ventures between state-owned and foreign-owned automobile enterprises
- The Chinese partners of joint ventures have no incentive to develop any new models, because high profitability is guaranteed by the government-protected monopoly
- Hopes come from competition policy

Defects of China's growth pattern

- Environmental costs too high
- lack of ability of innovation and creation
- Misallocation of resources in the form of accumulated too much foreign exchange reserves with very low returns
- Widening gap between the rich and poor
- others





The rebalancing of the Chinese economy

- Speed up economic readjustment and growth paradigm shift
 - Reduce dependence on exports
 - Reduce dependence on FAI, especially investment in real estate development
 - Reduce the gap of income distribution
 - Increase the flexibility exchange rate and interest rates
 - Encourage outbound FDI
 - Environment protection
- Despite all the problem, china should be able to maintain relative high growth rate for the next one or two decades

Some other quantified or non-quantified tasks to be accomplished

- Length of high-speed railways reaching 45,000 km
- Length of highway networks reaching 83,000 km
- A new airport in Beijing
- 36 million new affordable apartments for low-income people
- Inviting of foreign investment in modern agriculture, high-tech, and environment protection industries
- Moving coastal regions from being the "world's factory" to hubs of research and development, high-end manufacturing, and the service sector
- More efficient development of nuclear power under the precondition of ensured safety
- Increased momentum for large-scale hydropower plants in southwest China (wiki)

SESSION PLÉNIÈRE III :
PHYSIQUE ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INSTRUMENTATION POUR LES LASERS À IMPULSIONS ULTRA-COURTES

Pr. Daniel KAPLAN

*Membre de l'Académie des Sciences, France
Président de la Société Fastlite*



Résumé

Le développement dans les vingt dernières années de sources laser à impulsions puissantes et ultra-courtes (durées comptées en femtosecondes et plus récemment en attosecondes) a conduit au besoin d'instruments permettant le contrôle et la mesure de la forme temporelle et spatiale de ces impulsions lumineuses. Il s'agit principalement de concentrer l'énergie de l'impulsion de manière à obtenir des densités de puissance extrêmes, qui ouvrent des possibilités nouvelles à l'optique non linéaire en termes de science et d'applications, par exemple l'accélération de particules par des lasers, l'usinage de matériaux à l'échelle de quelques dizaines de nanomètres, la génération d'effets relativistes, etc...

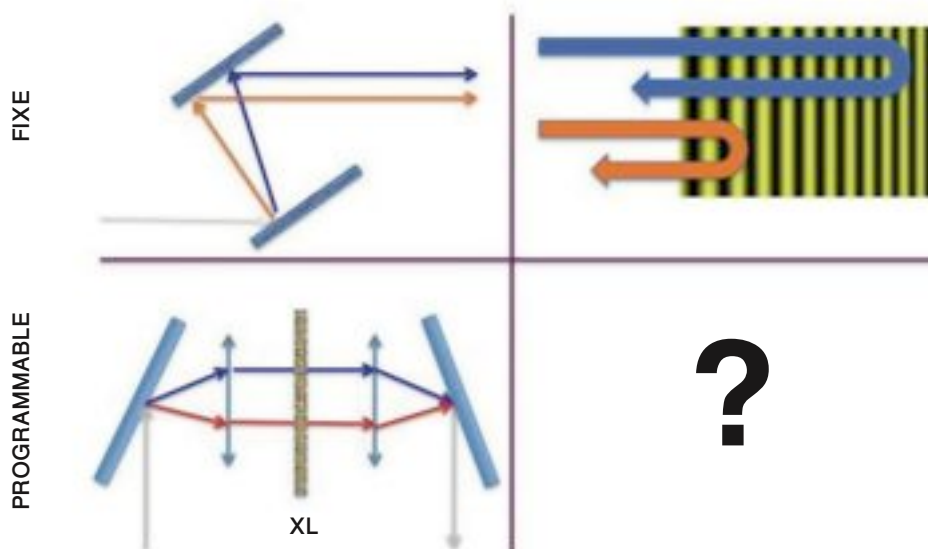
Après une vue générale des nouveaux problèmes de contrôle posés par ces lasers, on racontera concrètement l'histoire de FASTLITE, une petite société créée il y a plus de dix ans pour apporter des approches originales à la solution de ces problèmes.

L'objectif de cette présentation est de retracer l'historique d'une petite entreprise dans le domaine de l'instrumentation scientifique, dont le parcours constitue un exemple atypique, mais porteur de réflexions sur les moyens de construire une activité économique issue de la recherche fondamentale. La société a été créée en 1999 par deux Seniors expérimentés Daniel Kaplan et Pierre Tournois au moment où ils atteignaient l'âge officiel de la retraite. Elle a recruté essentiellement des jeunes docteurs en sciences qui s'impliquent dans tous les aspects de l'activité de l'entreprise. Elle opère dans le contexte de la recherche sur les impulsions lasers ultracourtes, principalement dans le domaine du contrôle et de la mesure de la forme temporelle de ces impulsions.

Depuis une vingtaine d'années, les laboratoires ont conçu et utilisé des lasers à impulsions de durée très courtes (exprimée en femtosecondes) et de puissance instantanée élevée (exprimée en Terawatt). La durée très courte implique que le spectre fréquentiel de ces

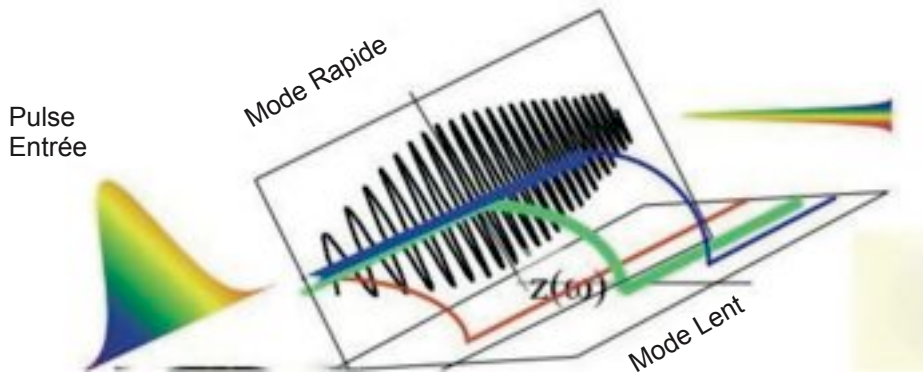
impulsions est très large. La puissance élevée a obligé à contrôler la forme temporelle des impulsions en les étirant pour réduire leur puissance instantanée avant amplification et les recomprimant après amplification. Il existe aujourd'hui des lasers commerciaux dans la gamme du Petawatt (1015 W) et des projets visant l'Exawatt (1018 W). Les facteurs d'étirement/recompression nécessités par ces fortes puissances peuvent dépasser cent mille et deviennent difficiles à maîtriser en utilisant des moyens optomécaniques traditionnels. Il existait donc un besoin clair d'un dispositif permettant de contrôler électroniquement la forme temporelle et c'est en inventant un tel dispositif que la Société Fastlite a lancé son activité. Ultérieurement, le dispositif a trouvé d'autres applications comme le contrôle des réactions photochimiques où le contrôle absolu de la phase dans les interactions optiques non-linéaires en physique atomique, qui ont récemment permis d'explorer le domaine temporel des attosecondes.

Le contrôle de la forme temporelle d'une impulsion de lumière visible ne peut être réalisé directement dans le domaine des temps. On opère dans le domaine des fréquences en ajustant la phase de chaque composante fréquentielle du signal. La figure ci-dessous montre de manière schématique les deux grandes classes de méthodes pour y parvenir. Dans la première méthode, on sépare spatialement les diverses fréquences et on réalise un montage optique introduisant un chemin optique différent pour chaque fréquence. Dans une version contrôlable électroniquement de cette méthode, chaque fréquence traverse un élément séparé introduisant un délai ajustable électroniquement. L'élément peut par exemple être une cellule à cristal liquide; La deuxième méthode utilise la diffraction par un réseau d'indices volumique apériodique, le réseau étant conçu pour diffracter chaque longueur d'onde en un point différent, C'est le principe des miroirs diélectriques apériodiques.



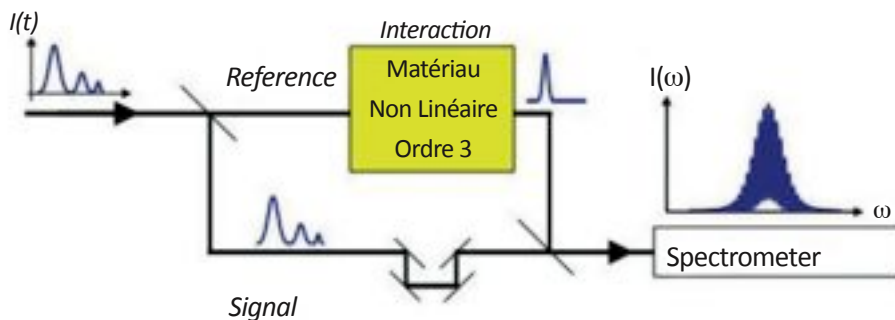
L'invention de Fastlite [1] a consisté dans la conception d'un diffracteur apériodique à base d'interaction acousto-optique. La forme de l'onde acoustique détermine la modification temporelle de l'impulsion optique. La figure ci-dessous montre le principe d'un tel système : l'onde acoustique générée dans un milieu anisotrope fait commuter l'onde optique entre deux modes de vitesse de propagation différente : le choix du point

de diffraction détermine le délai optique programmé à la longueur d'onde choisie. On réalise à partir d'un cristal un dispositif de faible volume, simple, quantitatif, extrêmement stable (il permet des mesures interférométriques) et ne nécessitant pratiquement pas de calibration.



La Société a ensuite utilisé ce concept pour réaliser des dispositifs de mesure de la forme temporelle des impulsions, qui exploitent le fait que la diffraction réalise la transformation optique linéaire la plus générale et peut ainsi émuler à l'intérieur du cristal des montages optomécaniques très divers [2].

Plus récemment, Fastlite a introduit une méthodologie de mesure nouvelle de la forme temporelle. Cette méthodologie utilise l'idée que si une impulsion optique X a une forme connue, alors en mesurant le spectre d'interférence de cette impulsion X de référence avec une autre impulsion Y signal, il est possible de remonter aux caractéristiques de l'impulsion Y (voir figure ci-dessous). L'invention consiste alors à produire l'impulsion X à partir de l'impulsion Y par un processus d'interaction fortement non linéaire qui atténue de manière importante toute variation de phase spectrale. On obtient ainsi une interférométrie spectrale autoréférencée, qui se concrétise sous la forme d'un dispositif encore une fois compact, et simple à aligner [3]. Il permet des mesures à très haute dynamique dépassant de ce point de vue de plusieurs ordres de grandeur les dispositifs existants.



Ainsi à partir d'une équipe constituée principalement de scientifiques chevronnés ou jeunes, on a pu réussir à construire une activité économique, basée sur des produits inventés par la Société, sans équivalents dans le monde et qui sont utilisés par des laboratoires sur l'ensemble de la planète. Il y a certainement de nombreuses niches de ce type accessibles à des petites sociétés à haute compétence scientifique. Le mouvement est favorisé par le fait que le développement de l'instrumentation dans les laboratoires eux mêmes apparait moins rentable et qu'il est raisonnable pour ces laboratoires de voir ces instrumentations réalisées par ces petites sociétés scientifiques et de se consacrer aux recherches qu'ils permettent dans de nombreux domaines de la science.

Références

- [1] D. Kaplan et P. Tournois, «Theory and performance of the acousto-optic programmable dispersive filter used for femtosecond laser pulse shaping», *Journal de Physique IV Proceedings*, vol. 12, no 5, p. 69-75, 2002.
- [2] S. L. Cousin, N. Forget, A. Gruen, P. K. Bates, D. R. Austin, et J. Biegert, «Few-cycle pulse characterization with an acousto-optic pulse shaper», *Optics Letters*, vol. 36, no 15, p. 2803–2805, août 2011.
- [3] T. Oksenhendler, S. Coudreau, N. Forget, V. Crozatier, S. Grabielle, R. Herzog, O. Gobert, et D. Kaplan, «Self-referenced spectral interferometry», *Applied Physics B-lasers and Optics*, vol. 99, no 1-2, p. 7–12, 2010.

DISCUSSION

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Merci Pr. Kaplan pour avoir partagé avec nous cette expérience d'une entreprise innovante. Je pense qu'on peut prendre une ou deux questions.

- **Pr. Driss ABOUTAJDINE** (SMI)

Toutes ces expériences sont présentées dans le domaine de l'optique et en tant que traicteur de signaux je me disais – je sais que la technologie ne le permet certainement pas aujourd'hui – dans combien de temps on pourrait convertir tout cela en signaux électriques et peut-être passer au numérique qui offre d'autres avantages.

- **Pr. Daniel KAPLAN** (Académie des Sciences et Académie des Technologies, France)

Et bien je n'avais pas le temps de couvrir ça, mais dans les faits quand je vous avais présenté les applications qu'on envisageait dans ce type de systèmes, j'ai noté en bleu la génération de signaux TeraHz. Effectivement, quand on prend ces impulsions ultra-courtes et qu'on les fait interagir de manière adéquate dans un matériau, on peut sortir un signal TeraHz dont la forme temporelle reflète l'intensité du système optique. Aujourd'hui, ces formes de signaux que je vous ai décrites ici sont transformées en signaux radioélectriques pour faire de la spectroscopie à très haute fréquence sachant que le domaine des picosecondes est le domaine maximum de la transformation numérique-analogique. Il faut passer d'abord par cette transformation de fréquence et on ne sait pas encore faire ces opérations de manière directe.

- **Pr. Mohamed SMANI** (R&D Maroc)

Merci beaucoup M. Kaplan, j'ai vraiment apprécié votre communication et je suis très passionné par ce cas de la société Fastlite parce que c'est une entreprise de recherche dont les clients sont des laboratoires de recherche. Il y a un besoin énorme en financements de la R&D que vous faites en termes de ressources humaines. Est-ce que vous pouvez nous dire un peu plus sur le business modèle de cette entreprise?

- **Pr. Daniel KAPLAN** (Académie des Sciences et Académie des Technologies, France)

En général, je décris ça en disant «new technology-old economy» c'est-à-dire que cette entreprise là est entièrement autofinancée. Nous sommes partis en 1999, avec mon partenaire dans cette affaire, avec 60.000 € investis à moitié entre les deux. Aujourd'hui c'est une société qui ferait 2,8 millions € de chiffre d'affaires. Ces domaines d'instrumentation sont des domaines où on peut croire lentement. Cette société a fait 10% de croissance chaque année, et donc elle a pu en permanence s'autofinancer.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Merci Pr. Kaplan. On passe à la deuxième conférence par le Pr. Bousmina qui est Chancelier de l'Académie et Président de l'Université Euro-méditerranéenne de Fès. Il va nous parler des Matériaux cellulaires pour des applications piézoélectriques. Merci.

- **Pr. Driss OUAZAR** (Directeur des Séances)

Nous allons démarrer la séance plénière de ce matin sur la physique et l'ingénierie. Nous aurons quatre conférenciers, deux avant la pause café et deux après la pause. Je prie les orateurs de bien vouloir respecter le temps imparti aux présentations. Notre premier est le professeur Daniel Kaplan, qui est membre de l'Académie des Sciences et de l'Académie des Technologies de France, et il va nous parler de l'instrumentation des lasers à impulsions ultra-courtes. Pr. Kaplan, vous avez la parole.

MATÉRIAUX CELLULAIRES POUR DES APPLICATIONS PIÉZOÉLECTRIQUES

Pr. Mostapha BOUSMINA

*Chancelier de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*

*Président de l'Université Euro-Méditerranéenne,
Fès-Maroc*



Résumé

Les matériaux piézo-électriques ont la propriété de transformer une contrainte mécanique en une réponse électrique et inversement un potentiel électrique induit une déformation du matériau. Cette propriété est derrière le fonctionnement de nombreux dispositifs tels que les capteurs, les injecteurs et actionneurs de moteurs, les résonateurs, les hauts parleurs, les allume-gaz, les films minces des Smartphones, les filtres électroniques, les dispositifs de positionnement de la pointe des microscopes à force atomique et à effet tunnel, etc.

De nombreux matériaux naturels ou synthétiques sont dotés du caractère piézoélectrique et ceci inclut, entre autres, le bois, l'os, la soie, l'ADN, le Quartz, les pérovskites, les céramiques et quelques semi-conducteurs. Bien que ces matériaux soient largement utilisés dans l'industrie, leur rigidité et leur densité restreignent leur application dans des domaines où la flexibilité, la densité et l'épaisseur (films minces) sont des critères importants.

Nous exposerons dans cette présentation une nouvelle catégorie de matériaux polymères cellulaires bon marché et caractérisés par une importante flexibilité et une très faible densité tout en offrant la possibilité de les mettre en œuvre sous forme de films minces. Nous discuterons également l'importance de leur modification par le graphène pour augmenter la réponse piézoélectrique du matériau final tout en le dotant de nouvelles propriétés inédites.

DISCUSSION

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci Pr. Bousmina pour cet excellent exposé qui a permis de relater une expérience de design industriel d'un matériau cellulaire piézoélectrique. Bien qu'on ait 10 mn de retard, nous allons nous permettre quelques questions pour un échange et un débat.

- Pr. Philippe TANGUY (CITIT)

Merci Pr. Bousmina pour ce magnifique exercice de pédagogie. J'ai une question qui est vraiment reliée à l'application industrielle de ces nano-composites piézoélectriques. La récupération d'énergie des vibrations est quelque chose qui est effectivement très prometteur et l'une de vos «slides» de début montre effectivement une application routière qui a vraiment attiré mon attention à savoir ce qu'on appelle les «smart roads» en anglais. Est-ce qu'on a une idée sur ce qu'on est capable de récupérer comme énergie? Est-ce que cela est viable économiquement? Et est-ce qu'il y a une voie potentiellement intéressante là-dessus?

- Pr. Mostapha BOUSMINA (SPC)

Merci cher collègue. Effectivement la question est importante. Pour le moment la technologie n'est pas viable; il y a deux expériences qui ont été réalisées en faisant deux tranches d'autoroutes, l'une en Israël et l'autre en Finlande. Ils récupèrent une certaine énergie, mais cette énergie est très faible parce que les matériaux qui ont été utilisés n'ont pas un coefficient de piézoélectricité extrêmement élevé. Il faut avoir des matériaux extrêmement flexibles et vous avez raison le bitume est un mélange d'asphaltène et de maltène. Dans les pays nordiques, en raison du gradient thermique, on modifie le bitume par adjonction de polymères. Ce qui n'a pas été fait à ce jour c'est d'incorporer au bitume des polymères qui agiraient comme capteurs.

- Pr. Ali BOUKHARI (ITIT)

Tout d'abord je tiens à remercier M. Bousmina pour cet exposé très pédagogique et surtout qui démontre une démarche scientifique vraiment bien structurée. Ceci montre le souci du chercheur pour mettre au point son travail de recherche. Je sais que vous n'aviez pas suffisamment de temps pour détailler la deuxième partie sur le graphène mais je reste un peu sur ma faim parce que quand on prend le graphène et on en fait une poudre à inclure dans le polymère, il y a quand même des conditions très difficiles pour optimiser l'utilisation de tous les facteurs (concentration, température, etc.). Est-ce que les plans de graphène que vous avez présentés sont isolés les uns des autres? Est-ce que le traitement thermique n'induit pas la formation de boules?

- Pr. Mostapha BOUSMINA (SPC)

Vous avez raison cher collègue de mettre le doigt sur, probablement, la difficulté majeure. La difficulté majeure en ce moment ce n'est pas d'obtenir le graphène, ça l'était il y a ans, le problème c'est la dispersion comme vous avez dit. Si vous voulez disperser n'importe quelle particule inorganique dans un matériau organique vous avez les difficultés que j'ai expliquées : comment casser les agglomérats? Vous avez des forces de Van der Waals qui sont extrêmement fortes. Aller de l'agglomérat dense et dispersé vers le feuillet, on sait faire. On peut calculer l'interaction et l'énergie d'adhésion des lamelles. Le point crucial du procédé c'est d'atteindre l'état de feuillet du polymère.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Nous allons arrêter pour aller à la pause café. Je remercie les orateurs et l'audience et je vous propose de reprendre à 11h.5mn.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

S'il vous plaît, il est temps de reprendre nos travaux. Je vous signale qu'après les deux présentations, et avant d'aller déjeuner, nous allons accueillir les nouveaux membres de l'Académie. On commence par le Pr. André Zaoui qui est membre de l'Académie des Sciences de France et membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Il va nous parler de : **L'expérimentation a-t-elle (encore) sa place en mécanique des matériaux?**

L'EXPÉRIMENTATION A-T-ELLE (ENCORE) SA PLACE EN MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX?

Pr. André ZAOUI

Membre de l'Académie des Sciences, France

*Membre Associé de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques, Maroc*



Résumé

Les progrès importants et rapides réalisés récemment en matière de modélisation et de simulation numérique en mécanique des matériaux peuvent donner à penser que l'expérimentation n'a plus rien à apporter dans ce domaine de recherche. Chacun reconnaît certes la nécessité des expériences classiques d'identification des comportements mécaniques (en déformation et en rupture) et de validation des modèles, mais le doute existe quant à l'apport de l'expérimentation à la compréhension et à la prédiction (et donc à l'amélioration/optimisation) de ces comportements. Il apparaît donc opportun d'examiner le rôle que peut effectivement jouer une expérimentation moderne adaptée en micromécanique des matériaux dans un dialogue renouvelé avec la modélisation et la simulation numérique.

Le contexte actuel des développements numériques et expérimentaux en mécanique des matériaux apparaît très favorable. D'une part, les puissances de calcul et les méthodes numériques (X-FEM, FFT...) ont fait des progrès considérables, débouchant sur une capacité accrue de calcul numérique sur microstructures complexes. D'autre part, les techniques expérimentales, tant en matière de caractérisation des microstructures (EBSD, microtomographie par Rayons X, microdiffraction, AFM...) que d'essais mécaniques poussés in situ (MEB, MET, RX, mesures de champs...) débouchent sur une capacité accrue de caractérisation mécanique et structurale à micro-échelle. Les conditions semblent ainsi réunies pour un dialogue de type nouveau entre expérimentation et modélisation en micromécanique des matériaux.

On en donnera ici quelques illustrations dans le domaine de la mécanique des matériaux cristallins, en plasticité et endommagement, en montrant quelques répercussions des progrès récents des techniques expérimentales et numériques sur la modélisation. L'accent

sera mis sur l'utilisation combinée de l'EBS, des essais mécaniques dans le MEB et des mesures de champs de déplacement associées, pour répondre aux nouveaux besoins de la modélisation par changement d'échelle, dans trois domaines différents :

- l'analyse des champs mécaniques locaux ;
- l'identification du comportement intracristallin ;
- la définition du volume élémentaire représentatif.

Au total, l'expérience aura ouvert à la modélisation de nouveaux champs d'application; elle lui aura permis de déboucher sur de nouvelles méthodologies; elle aura conduit à lui poser de nouvelles questions théoriques qui n'ont, pour le moment, pas encore reçu de réponses. Il est vraisemblable que de tels apports de l'expérimentation ne soient pas spécifiques de la micromécanique, à condition de développer une mécanique résolument multi-échelle et multi-physique, de consacrer les efforts voulus à la mise au point des techniques expérimentales innovantes adéquates et de mener les recherches en couplant étroitement expérience, simulation numérique et modélisation.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci Pr. Zaoui

- Pr. Ali BOUKHARI (ITIT)

Merci M. Zaoui de cette intervention vraiment très importante sur les matériaux. J'ai une seule question : quel est le taux de compacité des produits frités parce que les propriétés physico-chimiques en général dépendent un peu du frittage et le taux de compacité peut aussi faire varier ces propriétés.

- Pr. André ZAOUI (SPC)

En réalité pour les matériaux dont j'ai illustré les réponses, aucun d'entre eux n'avait été fabriqué par frittage, donc cette difficulté là ne s'est pas présentée à nous.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci Pr. Zaoui. Il est temps de donner la parole au Pr. Juan Carlos Castilla de l'Université Catholique du Chili qui est également membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, il va nous parler du Quadrant de Pasteur : **Rôle de la science post moderne par rapport aux besoins de la société et catastrophes naturelles.**

REVISITING THE PASTEUR QUADRANT, POST-NORMAL SCIENCE AND STRATEGIES FOR RESEARCH ON NATURAL HAZARDS AND DISASTERS

Pr. Juan Carlos CASTILLA

*Centro de Conservación Marina, Estación Costera de
Investigaciones Marinas, Las Cruces.
Facultad de Ciencias Biológicas.
Pontificia Universidad Católica de Chile.
Casilla 114-D, Santiago, Chile*

*Associate member of the Hassan II Academy
of Science and Technology, Morocco*



Introduction

What is called “Normal Science” has been defined by Kuhn (1972) as : “research firmly based upon one or more past scientific achievements; achievements that some particular scientific community acknowledges for a time as supplying the foundations for its further practice”. If these achievements are sufficiently unprecedented and attract an enduring group of scientist away from other unprecedented achievements, and if they are sufficiently open-ended to leave problems to be redefined, they are called by Kuhn “science paradigms.” Kuhn beautifully describes the way in which old science paradigms are replaced by new ones, previous to the presence of a “sense of malfunction”, a prerequisite for scientific revolution, which are described as punctuated interludes where scientific paradigms are sequentially replaced. Some of the main and initial scientific revolutions occurred around the nineteenth century that reinforced in the first half of twenty century, greatly helped to shape what we use to call the modern-world or the world where material progress has occurred at a comparative faster rate. Philosopher of the sciences and political scientists have scrutinized not only in the structure of such scientific revolutions, but also with regards to the associated scientific policies schemes implemented by leading developed countries, particularly after World War II and at the end of the so called cold war. Donald E. Stokes was one of such political scientists deeply thoughtful about policy processes and that deeply understood science. Stokes’ book “Pasteur’s Quadrant : Basic Science and Technological Innovations” (1979) is a landmark on the matter.

On the other hand, Post-normal science (at the beginning much linked to ecological economics) is a truly new conception of the management of complex science-societal related issues (Funtowicz and Ravetz, 1994, 2008, Ravetz 1996, Ekersley 2001), advocating the inclusion and integration of knowledge derived from science, but also addressing : a) uncertainty, b) value loading, c) plurality and importantly c) communication of science to society. In other words Post-normal science addresses the need to focus on complex societal-problem-solving via the coupling of science together with the relevance of human commitments and values and face epistemology as well as governance issues. This approach goes over and above concepts used in the literature such as integrative, interdisciplinary, transdisciplinary or landscape research (Tress et al. 2006)

The suddenness and unpredictability of natural hazards (= naturally occurring physical phenomena caused by either rapid or slow onset of events having atmospheric, geologic and hydrologic origins on solar global, regional, national or local scales; definition according to UNESCO) such as earthquakes, tsunamis, flooding, landslides, droughts; or for the matter human-driven step by step building processes leading to earth systems towards tipping points (Scheffer, 2009), such as climate change, global warming, water shortages and associated risks that seriously and dramatically affect nations. These are indeed critical research areas that urgently need to be approached via post-normal science, complemented or assisted with the so-called Pasteur's Quadrant, Research Strategy. To accomplish that, a country needs to develop well thought research plans regarding own research on natural catastrophes priorities and to allocate long-term resources. In this regards, science and technology academies, like the Kingdom of Morocco, Hassan II Academy of Science and Technology, may play a crucial role in it.

Revisiting Pasteur's Quadrant

Around the world, governments and research institutions have approached the planning and financing of Normal science research from different angles using various models. Perhaps two of the better-known models are:

a) The Linear Research Model (a lineal one-dimensional plane model), comprising basic research at one end and applied research at the other (Bush, 1945, Stokes, 1997). The structure of the model is that linearly basic research, leads to applied research, resulting in development and eventually into production, operations and technological innovations (Stokes, 1997). In this model, each of the successive stages depends upon the preceding one/ones, and as bluntly Bush's (1945) described it in "Science - The Endless Frontier: A Report to the President on a Program for Postwar Scientific Research" : "applied research invariably drives out pure research"; what is known as Bush's perverse law governing research. Here, the main paradigm is that there is a tension between curiosity-driven basic research that is performed without thought of practical use or end and applied research, which tends to be planned and developed directed toward some individual, groups or users. In fact, according to Bush (1945) "basic research is the pacemaker of technological progress". In USA it was Bush's (1945) Science - The Endless Frontier Program that, five years later, lead to the creation of the National Science Foundation, a powerful research funding agency that it was thought and established independently, as much as possible, from political control (Stokes, 1997).

b) The Quadrant Model of Scientific Research (a two-dimensional Cartesian plane model) proposed by Stokes (1997) (Fig 1). In this model the vertical axis represents the degree to which a given body of research seeks to extend the frontier of fundamental understanding, while the horizontal axis represents the degree to which the research is guided by considerations of use. Stokes (1997) characterized four main research type of quadrants: a) the empty bottom left-hand quadrant, where there is no considerations either for developing fundamental knowledge or consideration for use, b) the upper left-hand quadrant (baptized as the Bohr quadrant), where the quest for fundamental understanding is high, but no so regarding considerations for use of the information, c) the bottom right-hand quadrant (baptized as the Edison Quadrant), where the quest for fundamental research is rather low, by high the consideration for use of the information, d) the upper right-hand quadrant (baptize as the Pasteur Quadrant), where both the quest for understanding and consideration for use of the information are high. This quadrant can be labeled as the “Use-Inspired Basic Research Quadrant” (Stokes, 1997); but also as the: Applied, Mission Oriented or Service Oriented Research Quadrant.

In Stokes (1997) book is found a full description about how dissents (researchers, agencies, countries) of the Bush (1945) one-dimensional Linear Research Model, developed different research models away from the linear one-dimensional model, for the planning, implementation and the creation of new research agencies or national research structures for the allocation of basic, applied or mixed research funds. All of them recognizing a more complex relationship between the quest for fundamental understanding and considerations for the use of the information (applied research), aiming to bridge research and industrial development according to country priorities. Nevertheless, no abandoning the idea that curiosity-driven basic research is a key part of the puzzle.



Figure 1. Stokes (1997) Quadrant Model of Scientific Research.
(Taken and modified from Stokes, 1997).

Hereby, I will pose that in many circumstances there is a need for countries to prioritize and allocate adequate long-term funds for research on natural hazards, associated risks and disasters and that strategies needed to focus such research needs in integrated interdisciplinary teams aligned, one way or another, with the Mission Oriented Pasteur Quadrant. By this I mean making sure that the fundamental research to deal with natural hazards and disasters was duly developed inside the country (- obviously taken advantage of global produced knowledge -), and at the same time that advanced knowledge was indeed of high scientific quality (- judged for instance for the level, quality and impacts of publications -). But, at the same time, importantly considering the transference of the information to society and enhancing governance schemes. Here, is exactly the space to integrate a "Pasteur Mission Oriented Research Strategy" on natural hazard and disaster and associated risks in connection with the relevance of such knowledge to human communities, values and governance issues. This is to say, moving into the direction of the new paradigm labeled as Post-normal science.

Visiting Post-modernism and Post-normal science

The so-called pre-modern era was one where Normal science (see above) was practically unknown and religion and traditional knowledge were the main sources of truth and explanation of reality. In the modern era, step-by-step, science became the predominate source for truth and the gold fountain to explain nature and reality. The Sun, Earth and the age of planet Earth may serve as an example. Copernicus, a Catholic cleric, in 1543 argued that the Sun, not the Earth, was the center of the Universe, this against the well accepted opposite general believe. In 1633, Galileo was placed under house arrest by the Inquisition for endorsing this theory. At that time it was overwhelmingly accepted that the planet Earth was created around 6000 years ago.

Actually, English-speaking Christians accepted that God had created Earth on October 23, 4000 B.C. (see Repcheck, 2003). James Hutton, in 1778, presented proofs showing that planet Earth was significantly older than 6000 years and sustained that in fact its age was incalculable: it could be hundreds, millions of billions of years. In 1854, Charles Darwin, heavily influenced by Hutton's theories, sustained that *Homo sapiens* was descendent from an ancestor shared with the common ape. In the past 180 years we have unearthed 27 separate hominin fossils (-ancient and modern humans) that split off from a common chimp-like ancestor around 7 millions years ago. Surely, 26 of them are not longer with us, but we know amazing details about their anatomies, physiologies, behaviors and about their scattering around the world. We are the last survivors of the 27 variety of hominin so far discovered on Earth (Walter, 2013).

The list of scientific advances and discoveries in this and many other areas is long. Nevertheless, narratives as those of the Scottish Enlightenment times are definitely gone. At present "knowledge is constructed, not discovered, it is contextual, not foundational" (Elliot, 1996). Today, we find ourselves in a post-modern world, or in the Anthropocene era (see Castilla, 2012), that lacks powerful narratives and where science is not, necessarily, any longer the past gold fountain for the explanation of realities. Further, where the cultural constructions perhaps still depends on some science, but where influences are much smaller of physical sciences, much larger in the social sciences and lesser in pure than in applied science (Eckersley, 2001). Hence, Post-normal science is a new conception of the management of complex science-social related issues and it focus more on aspects of problem-solving heavily impregnated by uncertainty and risks (Bradshaw and Borchers, 2000, Kinzig et al., 2003), values loading and plurality of societal

legitimate perspectives (Funtowicz and Ravetz, 1994, 2008, Ravetz 1996). Post-modernity is the time of science-societal complexities and uncertainty of human commitments and values and one marked by deep human-driven changes on earth and sustainability. Concurrently, is the time for Post-normal science, that necessarily advocates the inclusion and integration of knowledge derived from science, but now addressing, uncertainty, value loading, plurality and most important than all, the communication of science to society. The science ivory tower paradigm anchored in universities is over. It has been replaced by a complex and entangling combination of science-societal fundamental and mission oriented applied science, going through professional consultancy (if necessarily) and flowing through the turbulent waters of Post-normal science with value loading, science communication to society, and ideally reaching policy spheres and governance schemes (Fig. 2). Not a minor task.

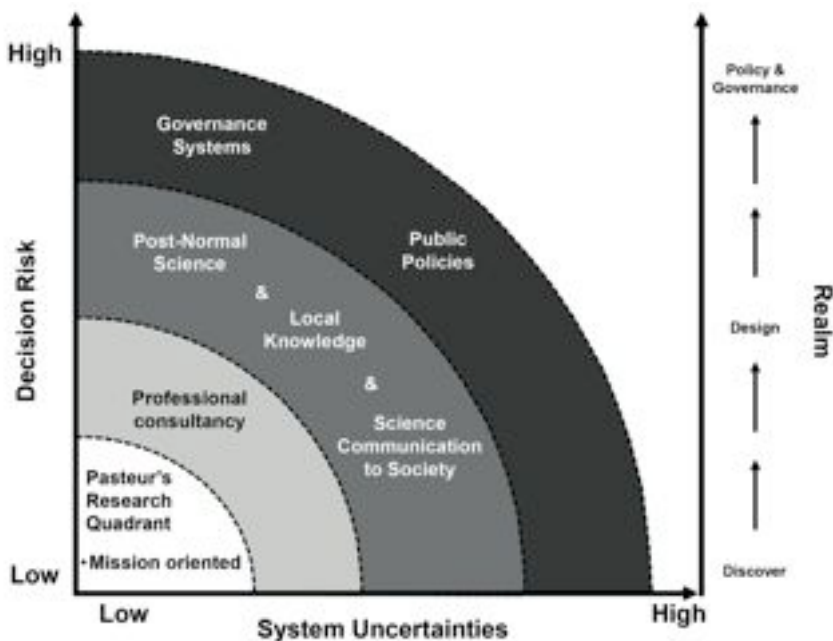


Figure 2. Problem solving diagram. When uncertainties and risk are low, we are in the Normal-science “discover” realm. In the middle, most often scientific expertise will be not enough and there would a need for professional consultancies and elements of Post-Normal science; we are in the “design” realm. When risk and uncertainties are high we are in the “policy and governance” realm. Here, defensive strategies could appear, challenging even advanced knowledge. (Taken and modified from Funtowicz and Ravetz, 2008).

Natural hazards, disasters, mission oriented research and the role of Post-normal science

According to UNESCO, natural disasters are the combination of hazards conditions of vulnerability and insufficient capacity or measures to reduce the potential negative consequences of risk. Nevertheless, natural disasters are not necessarily entirely “natural”, since people can be active local or global agents of disasters (environmental human-driven hazards and disasters). Hence, flooding may be exacerbated by deforestation or the

improper management of watersheds. Climate change, global warming and modifications of the carbon cycle are undoubtedly global hazards been driven by humans (Stern, 2002, Stern 2007, Global Change, 2009). Not all, by many natural disasters can be greatly mitigated. As proposed by UNESCO International Strategy for Disaster Reduction, mitigations include the fields of risk awareness and assessment, building of local and global knowledge, public information, commitments and the development of appropriate institutional frameworks; as well as early warning systems including forecasting, dissemination of warnings, preparedness measures, reaction capacities and above all education. At a national level the approach to these complex interdisciplinary fields require the adoption of forethought planning strategies at different institutional levels. There are several fields of knowledge that do require basic information (Normal-science approaches) related to different geo-bio-physical as well as socio-economic disciplines. At the nation-level research planning to deal with natural hazards and to mitigate natural disasters is one of the most fruitful field for the developing of Mission Oriented Team of Researchers (see above) and for the implementation of Post-normal science strategies, where the dissemination of knowledge and education to society, as well as the use of local knowledge, are critical aspects. It will not just be a matter of developing more up-to-day information (that is much needed), but moreover developing new tools and mechanisms to address how to tackle complex science-social potential hazards and disaster issues impregnated by uncertainty and risks.

In this regards, the February, 27th, 2010 Chilean mega-earthquake and tsunami disaster is a case worth to address. The earthquake occurred at around 4 AM and had a magnitude 8,8 MW (the fourth largest even recorded with instruments in the world; see Madariaga et al. 2010). Normal-science had predicted in 2009, that concerning the seabed fault in Chile along 35-37°S : "... , in the worse case scenario, the area already has a potential for an earthquake of magnitude as large as 8-8,5, [and] should it happen in the near future" (Reugg et al. 2009). Obviously, the exact date of the earthquake was not predicted. But the amount of accumulated energy in the geo-fault area, since the previous large quake in the same area in 1835 (- witnessed by Charles Darwin during his stay in Chile; see Castilla et al. 2010 -), make the scientific prediction a very valid one. Indeed, this was exactly the area where the earthquake and tsunami occurred in February 2010. It can be stated that Reugg et al.(2009) paper, and several related previous papers (see references in Melnick et al. 2006, Reugg et al. 2009, Vargas et al. 2011, Jaramillo et al. 2012) made a proper job from a geo-physical Normal-science perspective. Unfortunately, Reugg et al. were no part of a larger and comprehensive team dealing with complex earthquake and tsunami hazards in Chile that would have the possibility to use that information in a more comprehensive and science-societal perspective. As scientists Reugg et al. (2009) just made a good job: they produced outstanding science and published in good international scientific journals.

The lesson (in short) is that Normal-science is just one part (a very important one indeed!) of a Mission Oriented Research Team or a Post-normal Research Team, dealing with hazards, disasters and risks, such as earthquake or tsunamis; nevertheless, it may be consider that regarding the occurrence of natural hazards and disasters ... the population preparedness is at stake. In Chile, at the time, that mission oriented research strategy, and proper allocation of resources, did not exist. It is no possible (or proper) to speculate if the existence of such teams in Chile would had helped or nor to a better preparedness of the population, mitigating in that way the impacts and fatalities (but see Marín et al. 2010), but the international experience signs in that direction. It seems to me that in this respect the Chilean government has learnt some lessons, since in the past two years a special

Team-research Program has been developed and funded to deal with natural hazards and disasters in the country. This is a step forward in the right direction.

Conclusions

Research on natural hazards and disasters represent critical challengers for governments and particularly for the developing world. On the matter, long-term strategic research policies need to be implemented and priorities to be set. Concurrently, long-term and adequate funding is absolutely essential. Natural hazards (real natural ones or human-driven ones) may seriously affect economy of countries and societies as a whole (i.e. for climate change see Stern, 2007). The so-called Normal-science is absolutely necessary to advance in generating curiosity-driven knowledge in these arenas, but not sufficient. Natural hazards encircle the management of complex science-societal related issues, and national research policies, strategies and tools such as those proposed by Stokes (1997), regarding the application of a bi-dimensional Quadrant Model of Scientific Research, rather than the usual one-dimensional Linear Research Model is worth to consider.

In the tackling of national research on natural hazard, risks and disasters a mission team-research oriented strategy is suggested. Furthermore, post- modernity, and the era of the Anthropocene in which we live, calls for science-societal Post-normal science integrated approaches. Hazards and disasters are extremely complex research arenas. So Post-normal science approaches advocate that the knowledge derived from transdisciplinary scientific approaches, including, uncertainty, value loading and plurality needs to be communicated to society. Eventually the processes should lead into the direction of public policies and governance spheres.

The case of the 2010 devastating earthquake and tsunami in Chile is a good example where the existence of just outstanding Normal-science knowledge, on a critical recurrent hazard for the country (earthquakes), was not enough to confront it. From this and other examples, lessons need to be derived: the costs involved in research leading to the mitigation of natural hazards and disasters are, generally speaking, small as compare to the costs of relief, recovery and lost of lives. Developing countries need to invest in well team-organized and modern planned research with regards to own natural hazard and disaster priorities.

There is most often the perception that tackling mission-oriented work will reduce the quality of research. Nevertheless, the experience of Japan, USA and Australian indicates the contrary. For instance, in Australia the increase focus on mission-oriented research (mostly via the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO) has indeed increase Australia's ranking as one of the leading source of intellectual property (CNIC, 2011).

Acknowledgments

I sincerely acknowledge the invitation by Professor Omar Fassi-Fehri, Perpetual Secretary of the Academy, to deliver this presentation during the 2013 Rabat Plenary Session of the Hassan II Academy of Science and Technology, Kingdom of Morocco, and also for the kind invitation of Professor Albert Sasson. This is a contribution of the "Núcleo Milenio, Centro de Conservación Marina", Estación Costera de Investigaciones Marinas, Las Cruces. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Católica de Chile.

References

- [1] Bradshaw, G.A., Borchers, J.G., 2000. Uncertainty as Information : Narrowing the Science-policy Gap. *Conservation Ecology* 4 (1) : 7 [online] <http://www.consecol.org/vol4/iss1/art7/>
- [2] Bush, V., 1945. Science - The Endless Frontier - A Report to the President on a Program for Postwar Research. United States Government Printing Office, Washington DC. [online] <http://www.nsf.gov/od/lpa/nsf50/vbush1945.htm>
- [3] Castilla, J.C., 2012. Conservation and social-ecological systems in the 21st century of the Anthropocene era. *Contributions to Science* 8 : 11-21.
- [4] Castilla, J.C., Manríquez, P.H., Camaño, A., 2010. Effects of rocky shores coseismic uplift and the 2010 Chilean mega-earthquake on intertidal biomarker species. *Marin Ecology Progress Series* 418: 17-23.
- [5] Consejo Nacional de Innovación para la Competitividad, Chile (CNIC). 2011. Agenda de Innovación y Competitividad 2010-2020. 2011. Evaluation Report of National Innovation Strategy for Competitiveness, Chile International Panel. Santiago. Pp. 111-156.
- [6] Ekersley, R., 2001. Post Modern Science: The Decline or Liberation of Science. In : *Science Communication in Theory and Practice*, Stockmayer SM et al. (Eds), pp 83-94. Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
- [7] Elliot, A., 1996. Subjects to ourselves: Social theory, psychoanalysis and postmodernity. Polity Press, Cambridge, UK; Blackwell, Cambridge, MA.
- [8] Funtowicz, S., Ravetz, J., 1994. The Worth of a Songbird: Ecological Economics and Post-normal Science. *Ecological Economics*, 10 (3), 197-207.
- [9] Funtowicz, S., Ravetz, J., 2008. Post- Normal Science In : *Encyclopedia of Earth*. Cleveland CJ (Ed). [online] <http://www.eoearth.org/article/Post-Normal-Science>
- [10] Global Change 2009. International Geosphere-Biosphere Programme. Issue 74, 43 pp.
- [11] Jaramillo, E., Dugan, J.E., Hubbard, D.M., Melnick, D., Manzano, M., Duarte, C., Campos, C., Sánchez, R., 2012. Ecological implications of extreme events : Footprints of the 2010 earthquake along the Chilean coast. *PLoSOne* 7 (5) : e35348. doi:10.1371/journal.phone.0035348.
- [12] Kinzig, A., Starren, D., 2003. Coping With Uncertainty: A Call For New Science-Policy Forum. *Ambio*, 32 (5): 330-335.
- [13] Kuhn, T.S. 1972. *The Structure of Scientific Revolutions*. The University of Chicago Press, 210 pp.
- [14] Madariaga, R., Marianne, M., Vigny, C., Campos, J., 2010. Central Chile finally breaks. *Science* 328: 181-182.
- [15] Marín, A., Gelcich, S., Araya, G., Olea, G., Espíndola, M., Castilla, J.C. 2010. The 2010 tsunami in Chile: Devastation and survival of coastal small-scale fishing communities. *Marine Policy* 34: 1381-1384.
- [16] Melnick, D., Bookhagen, B., Echtler, H.P., Strecker, M.R., 2006. Segmentation of megathrust rupture zones from for arc deformation patterns over hundreds of millions of years, Arauco Peninsula, Chile. *Geol. Soc. Amer. Bull* 118: 1463-1480.

- [17] Ravetz, J.R., 1996. Science Knowledge and its Social Problems, Transaction, New Brunswick, NJ and London.
- [18] Repcheck J., 2003. The man who found time. Persus Publishing Cambridge, MA, 247 pp.
- [19] Ruegg, J.C., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R., de Chabaliér, J.B., Campos, J., Kausel, E., Barrientos, S., Dimitrov, B., 2009. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 175: 78-85.
- [20] Scheffer, M., 2009. Critical Transitions in Nature and Society. Princeton University Press, Princeton and Oxford, 384 pp.
- [21] Stern, P.C., 2002. Human Interactions with the Carbon Cycle. Summary of a Workshop. National Academy Press, Washington, D.C. 41 pp.
- [22] Stern, N., 2007. El Informe Stern. La verdad sobre el Cambio Climático. Ediciones Paidón Ibérica SA, Barcelona. 389 pp.
- [23] Stokes, D.E., 1997. Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovations. Brookings Institution Press, Washington D.C. 180 pp.
- [24] Tress, B., Tress, G., Fry, G., 2006. Defining concepts and the process of knowledge production in integrative research. In: Volume 12 "From Landscape Research to Landscape Planning : Aspects of Integration, Education and Application", Tress B. et al. (Eds), pp. 13-26.
- [25] Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S., Melnick, D. 2011. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology* 38 (1): 219-238.
- [26] Walter, C. 2013. Last Ape Standing. Walker Publishing Company, N.Y., 220 pp.

DISCUSSION

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

Merci Pr. Castilla pour cette excellente présentation qui a pu mettre en exergue le rôle de la science post-normale, le rôle de la connaissance locale qui est souvent négligé et le rôle de la gouvernance dans la gestion de l'homme et des catastrophes naturelles.

- Pr. Albert SASSON (STV)

Muchas gracias Juan Carlos. Es una presentación muy interesante y también que lleva a una lección en el futuro en otras actividades. Hace tiempo que estamos interesantes en organizar tal vez una sesión plenaria sobre catástrofes naturales. Es que Marruecos también es un país de catástrofes naturales. Estamos también tuvimos el terremoto de Agadir y hay también olas importantes.

Lo que me preocupa en tu presentación es esta causa del conocimiento local. Que entendemos por conocimiento local? Hemos en este campo hay un trabajo muy importante, un trabajo educativo para educar a la gente que se prepare a las catástrofes naturales. A veces no podemos prever a un terremoto, enseñarlo muy bien lo de concepción, fue previsto y ocurrió exactamente según la predicción pero en otros casos no. Sin embargo podemos preparar a la gente y los japoneses lo hace muy bien. Hay cuadernos cómo comportar, se poner debajo de la mesa, etc.

El conocimiento local en varios casos no esta sometido al rigor científico, es de tipo ser emocional. La otra causa es que hay que verifica este conocimiento local, hay que someterlo al filtro científico también para que tenga valor y que sea realmente un conocimiento que sea positivamente al otro. En el caso del tsunami en Japón en 2011, el conocimiento local no puede hacer nada porque es un trabajo de geophysics.

Pienso que sería muy interesante para nuestra Academia de pensar en 2013 en un seminario internacional pero pequeño donde podemos analizar cómo esta causas y aplicaría a Marruecos y eso sería el trampolín para una sesión plenaria que siendo en 2014 o 2015 no importa.

Muchas gracias Juan Carlos de nuevo y con todas sinceradas de tu aporte.

- Pr. Malik GHALLAB (SMI)

Thank you very much for this interesting presentation that raises many issues. We all agree that science is responsible for providing knowledge that can bring light to decision-makers and I am sure that we will come back in this Academy many times about this issue and how we can address several points as my two colleagues said before me. So, let me raise the example that took place few months ago in Italy where an appeal court decided that seismologists and geologists were guilty because of their advice and condemned them to severe sentences that led to a lot of concern within the scientific community.

What you said about post-modern science explains this gap between modern science and society as exemplified by this court decision and the way science works. So what do you think about this court decision in Italy?

- Pr. Juan Carlos CASTILLA (STETM)

I am not well aware of the example. But I think scientists have some responsibility in certain areas. Concerning natural catastrophes, they should be making more efforts in communicating knowledge (stress on awareness of predictions) to both authorities and to the general public.

- Pr. Marcelo DE SOUZA VASCONCELOS (STETM)

Me gustaría añadir algo más a la discusión. Puedo referido a la economía, podemos añadir el agua, sabemos todos que tenemos el problema de los avances de la desertificación. Marruecos, Portugal y España sufren sus resultados. Yo modificado un poco la terminología, en vez del conocimiento local me gustaría decir el conocimiento tradicional y aquí los científicos tienen una experiencia clara es por ejemplo la agricultura. El conocimiento tradicional de los camposinos ha contribuido a la resolución de muchas problemas y permito de recordar que nosotros humanos

- Pr. Rachid BENMOKHTAR BENABDELLAH (ESDE)

I just want to thank you for bringing on the table of discussion this issue of “post normal science” and all the issues of the economy, social development and governance. I also want to mention that there are different approaches when talking about social sciences, political sciences and economy and many people stay on what we can call “orthodox sciences”. Nowadays, what is really happening is that sciences in general and applied sciences are starting in fact to come to the social and economic studies and everything that is related to the human being. Here, in Morocco, we are already using some of the approaches that are really focused on human development. For example we are using the behavioral economics such as the regression discontinuity design for studying the link between political programs and poverty for example. The same can be applied to the influence of governance on people. All these methods are very rich.

The other aspect that is very important is experimental economy which is used to evaluate the influence on the social capital of the people of policies implemented by the Government.

- Pr. Philippe TAQUET (STETM)

Thank Pr. Castilla,. I enjoyed your talk. I am a geologist, so I want to speak on geology. The International Union of Geological Sciences has a special commission called “International Commission for the Study of Geology” and I was President of this commission during 4 years. One of our last meetings took place in Japan and the topic was : History of Tsunamis on Earth Crest just before the incident of Fukushima. One of the conclusions of this meeting is to make very detailed mapping of the coasts because geological events leave traces from the past to date. These geological memories are very strategic to learn where and how much happens in the some zones. Apart from geophysics, stratigraphy is fundamental for the study of Tsunamis and Earthquakes.

- Pr. Francisco GARCIA-GARCIA (STV)

Muchas gracias Señor Director por permitir me participar. La verdad que la reflexión y el debate son ricos precisamente en esta presentación que quiero felicitar al Profesor Castilla. El no la mencionado, pero sí que quiero compartir con ustedes la siguiente información precisamente

por la presentación de este modelo. Además de su experiencia académica y profesional previa, el profesor Castilla sido membrado un reconocimiento internacional, el premio nacional de Ciencias y Tecnología de México de mi país en el año 2012, precisamente por la presentación de este modelo que nos acaba de compartir.

Es una reflexión, es un debate que al igual estamos haciendo el día de hoy con una riqueza muy profunda de la ciencia y tecnología que habla y se vincula los distintos aspectos de la austeridad que todos los países y gobiernos estamos haciendo donde se vincula precisamente la ciencia con ese conocimiento tradicional y con el efecto que debe de tener precisamente el deseno de políticas públicas. Como ha anticipada El profesor Albert Sasson, creo que El Academia deberá reflexionar también sobre este aspecto esta es plantear en el futuro cercano haber un debate el más amplio y de proyección intersectorial entre los distintos aspectos ásala de la física pura. La física pura también interviene en este debate y por eso el no la ha mencionado Prof. Castilla pero yo sea me compartirlas y de este reconocimiento que nuestro país México le hace precisamente porque estamos preocupados también.

Parte del deseno de la políticas públicas pase mas por la eficacia o las decisiones políticas ampararlas en la ciencia, en la información científica, pero también creo que piénsanos que no es todos ciencia y tecnología sino que hay conocimiento tradicional de la gente en la cual como los académicos y científicos también debemos de reconocer su valor importancia. Muchas gracias.

- Pr. Driss OUAZAR (Directeur des Séances)

En votre nom à tous je remercie tous les orateurs et je vais donner la parole à Monsieur le Secrétaire Perpétuel pour présenter les nouveaux membres de l'Académie.

Cérémonie d'accueil des nouveaux membres de l'Académie

- Pr. Omar FASSI-FEHRI (Secrétaire Perpétuel)

Merci M. le Directeur des Séances.

Nos chers invités, mes chers collègues,

Nous nous retrouvons dans cette séance pour procéder à l'exercice d'accueillir parmi nous de nouveaux membres; il s'agit de membres qui viennent compléter la composition de notre Académie – au moins de compléter de manière partielle parce qu'il y a encore des sièges vacants au vu de l'effectif total prévu par la Loi. Nous espérons d'ailleurs très vite faire de nouvelles propositions à Sa Majesté Le Roi en essayant de corriger la situation des collègues sous-représentés et également éviter certaines frustrations qui ont pu être ressenties.

Sachez chers collègues que nous sommes entrain d'apprendre et de mettre en application un texte sur plusieurs questions pour la première fois. On va essayer dans cette mise en œuvre de faire en sorte qu'on améliore notre travail en assurant une meilleure communication entre les différentes instances de l'Académie, au niveau de ses organes, mais aussi au niveau des collègues scientifiques et même au niveau de chaque membre, en incitant fortement tous nos collègues résidents, associés et correspondants dès les jours, dès les semaines, dès les mois à venir, à faire part de leurs suggestions, propositions et critiques pour améliorer notre travail. Ceci afin, et ça c'est très important, que notre institution reste toujours et garde toujours sa crédibilité et continue à susciter l'optimisme chez notre communauté scientifique malgré toutes les difficultés que connaît le secteur de la recherche scientifique dans notre pays.

Chers collègues,

J'ai tenu à faire ce commentaire en cette séance publique, c'est une question d'engagement et de transparence.

Chers collègues,

Les nouveaux membres que nous accueillons aujourd'hui ont été retenus selon la procédure prévue par la Loi créant l'Académie, en particulier sur propositions faites par le Conseil d'Académie à Sa Majesté Le Roi qui les a agréées. Je voudrai aujourd'hui renouveler notre gratitude et notre reconnaissance à Sa Majesté Le Roi pour Sa sollicitude, Sa confiance et Ses encouragements. Mes collègues du Conseil d'Académie ont opté pour faire une présentation globale des nouveaux membres concernés : deux membre résidents, deux membres associés et six membres correspondants. Ils m'ont aussi demandé de faire cette présentation de manière globale, j'en suis honoré et je suis honoré de présenter nos nouveaux collègues. Les nouvelles nominations concernent :

*** En qualité de membres associés :**

- Le Pr. Yves COPPENS

S'il fallait être un peu complet ce serait des pages et des pages à consacrer au Pr. Coppens pour le présenter. Je voudrai me limiter quand même à ces quelques données. Il a été directeur et professeur au sein du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris. Il a été élu à la Chaire de Paléontologie et Préhistoire au Collège de France en 1983 et depuis 2005 il est professeur honoraire. En 2006 il est nommé au Haut Conseil de la Science et de la Technologie. Il est membre de plusieurs académies de France (Académie des Sciences et Académie de Médecine) de Belgique, du Royaume-Uni et d'Afrique du Sud. Il est titulaire de plusieurs scientifiques.

Le 17 janvier 2011, il a été reçu à Agadir par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI à qui il a remis des fossiles vieux d'environ 400.000 ans découverts en 1955 dans la carrière Sidi Abderrahmane à côté de Casablanca. Il est aujourd'hui l'un des plus grands spécialistes au monde de l'évolution humaine. Il a consacré toute sa vie, depuis son enfance, à la paléontologie. Il a entrepris de nombreux chantiers de fouilles dont celui qui a permis la découverte en Ethiopie à Adar de la célèbre Lucie. Il est auteur de plusieurs articles scientifiques et de plusieurs ouvrages de référence tant dans le domaine de la paléontologie que dans celui de la vulgarisation scientifique.

Aujourd'hui, il s'intéresse particulièrement aux fossiles dans la carrière Toma à Casablanca. Cette carrière constitue un site unique attestant de la continuité de la présence il ya un million d'années des premiers habitants de la région et des objets qu'ils utilisaient.

Bienvenue Pr. Yves Coppens.

- Le Pr. Ahmadou Lamine NDIAYE

Lauréat de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, Docteur de la Faculté de Médecine de Lyon, Agrégé des Ecoles Nationales Vétérinaires Françaises, Recteur Honoraire de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis, Président de l'Académie des Sciences et Techniques du Sénégal, Président de l'Académie Africaine des Sciences, Vice-président du Réseau Africain des Académies des Sciences, Médaille d'argent de l'Académie Vétérinaire de France, le Pr. Lamine NDIAYE a joué et joue un rôle de premier plan dans le développement de la science au Sénégal bien sûr mais aussi en Afrique et même dans le monde.

Il fait partie de la génération qui a mis en place les premières institutions chargées de développer la science et son enseignement au lendemain de l'indépendance des pays africains. Il est expert et consultant auprès de plusieurs organismes nationaux et internationaux tels l'UNESCO, l'ONU, la Banque Africaine de Développement et d'autres.

Bienvenue Pr. Ahmadou Lamine NDIAYE

*** En qualité de membres résidents :**

- Le Pr. Ali BOUKHARI

Il a soutenu un doctorat d'Etat sur les matériaux. Actuellement Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université Ibn Tofail à Kénitra, Membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, il a fait preuve d'un grand dynamisme depuis sa nomination au sein du Collège scientifique Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique en contribuant à l'organisation notamment d'un séminaire national sur l'Ingénierie marocaine : enjeux et stratégies de développement, qui a vu la participation de plusieurs ministres. Il est particulièrement aussi actif dans les activités menées par notre Académie dans le cadre des actions de coopération avec les Académies Régionales de l'Education et de la Formation, en particulier à l'occasion des Journées : Les jeunes et la Science et le développement de clubs scientifiques dans les établissements scolaires publics marocains.

Depuis sa nomination en tant que membre de l'Académie, il a renforcé ses publications en publiant plusieurs articles dans des revues internationales indexées entre 2006 et maintenant.

Nous souhaitons à notre collègue Ali BOUKHARI la bienvenue comme membre résident.

- Le Pr. Mahfoud ZYAD

Lauréat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy, Ancien Vice-doyen de la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V-Agdal à Rabat. Depuis sa nomination en tant que membre correspondant lors de l'installation de l'Académie Hassan II, il a fait preuve d'un grand dynamisme au niveau des activités au sein du collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique tout en augmentant sa production scientifique. Il a publié pas moins de 21 articles dans des revues internationales indexées depuis 2006.

Bienvenue Pr. Mahfoud ZYAD.

*** En qualité de membres correspondants :****- Le Pr. Abdeljabbar EL MANIRA**

Docteur en nanosciences à l'Université Aix-Marseille, il a obtenu son habilitation à l'Institut Karolinska (Suède). Il est aujourd'hui professeur de nanosciences au Karolinska Institute, directeur de l'Ecole NHNAT, membre du Review Panel du conseil de la recherche près de l'Académie de Finlande, review member à l'Agence de la recherche en France.

Le 30 juillet 2010, il a été décoré par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI du Wissam de Mérite National dans l'ordre de Commandeur.

Titulaire de plusieurs prix internationaux, le Pr. Abdeljabbar EL MANIRA, qui a commencé sa formation au Maroc au niveau des études secondaires et post-baccalauréat, est aujourd'hui enseignant-chercheur dans l'un des plus prestigieux instituts, l'Institut Karolinska qui est l'instance chargée de décerner chaque année le Prix Nobel de Médecine.

Pr. EL MANIRA est membre de plusieurs sociétés savantes de Suède et d'autres pays, il est referee de plusieurs journaux scientifiques internationaux indexés et a à son actif plus de 40 publications dans des revues scientifiques et autant de communications dans des symposiums et conférences internationaux.

Nous souhaitons la bienvenue au Pr. Abdeljabbar EL MANIRA.

- Le Pr. El Maati OUHABAZ

Il a obtenu son diplôme de Licence à l'Université Kadi Ayyad à Marrakech au Maroc, son Doctorat en mathématiques de Besançon et son diplôme d'habilitation de Marne-la-Vallée. Aujourd'hui, il est professeur de mathématiques à l'Université de Bordeaux, directeur du groupe de recherche Analyse fonctionnelle et harmonique et applications, directeur-adjoint de l'Institut des mathématiques de Bordeaux. Il est particulièrement actif dans son domaine et il a réussi à se faire remarquer dans le domaine très pointu des équations d'évolution, théorie spectrale et analyse harmonique.

Il possède à son actif une production scientifique conséquente avec plus de 30 articles dans des revues scientifiques indexées en plus de sa participation en tant que conférencier invité. Il est referee dans plusieurs revues.

Nous lui souhaitons la bienvenue parmi nous.

- Mr. Abdallah MOKSSIT

Titulaire d'une Licence en mathématiques de la Faculté des Sciences de Rabat, Ingénieur de l'Ecole Supérieure d'Electricité de Paris, Ingénieur civil en météorologie de l'Ecole Nationale de Météorologie de France.

Aujourd'hui il est directeur de la Météorologie Nationale au Maroc. Il est membre à vie de la Société Indienne de Météorologie, Secrétaire Exécutif de la Société Météorologique Africaine et représentant permanent du Maroc à l'Organisation Météorologique Mondiale.

Décoré par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI en 2006 du Wissam du Mérite National de l'Ordre du Chevalier.

Membre du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), Mr. Abdallah MOKSSIT s'est distingué par sa compétence, par sa carrière scientifique et technique tant au Maroc que sur le plan international. Il est derrière la modernisation de la Météorologie Nationale, secteur vital pour le développement du pays sur les plans économique et social. Au niveau international, comme je l'ai dit, il est reconnu par ses pairs dans le cadre des travaux du GIEC. Il possède une expérience d'enseignant-chercheur à l'Ecole Hassania des Travaux Publics.

Bienvenue Pr. Abdallah MOKSSIT.

- Pr. Abdelkrim FILALI MALTOUF

Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université Mohamed V-Agdal. Il a soutenu sa thèse d'Etat à l'Université Paris-11 à Orsay après avoir obtenu une Licence de l'Université Mohamed V-Agdal de Rabat. Il est directeur du laboratoire de microbiologie et biologie moléculaire et coordonnateur du Pôle de compétences de microbiologie du sol et biotechnologie végétale. Il a été vice-président chargé de la recherche à l'Université Mohamed V-Agdal.

Il possède une solide expérience dans un domaine, encore insuffisamment développé au Maroc, qui concerne les études génétiques dans le domaine végétal. Il pilote des travaux importants concernant l'arganier et le chêne-liège, qui constituent une richesse nationale, en participant à des projets soutenus d'ailleurs par l'Académie.

Nous souhaitons la bienvenue à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

- Pr. Abdelghani BELLOUQUID

Mathématicien, il a obtenu un Doctorat à l'Université Paris-7 et un Doctorat d'Etat à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech. Professeur Habilité de mathématiques, il exerce actuellement à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées (ENSA) de Safi. Il fait partie de la jeune école des mathématiciens marocains particulièrement prometteurs. Il a à son actif plus de 30 articles et publications dans des revues internationales; il a en plus publié deux ouvrages et quatre chapitres de livres spécialisés.

Nous souhaitons la bienvenue comme membre correspondant à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

- Dr. Mohamed Smani

Ingénieur lauréat de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy (France), Docteur d'Etat en Sciences physiques (Université de Nancy, France), il est Directeur de l'association recherche & développement au Maroc (R&D Maroc) et un de ses fondateurs en 1997.

Membre du Comité scientifique et technique de l'Institut Mondial du Phosphate, membre du conseil d'administration du Centre National de la Recherche Scientifique et Technique (CNTST), membre de l'Académie Française des Technologies depuis novembre 2005, il possède une riche expérience tant au niveau scientifique puisqu'il a exercé comme ingénieur de recherche qu'au niveau de la gestion d'entreprises puisqu'il a exercé en tant que directeur de la production et du développement au sein du groupe OCP.

Il possède une connaissance excellente du tissu industriel marocain et incontestablement il pourra aider l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques à améliorer ses relations et sa coopération avec le secteur industriel marocain. A la tête de l'association R&D Maroc, il encourage la recherche-développement au sein de l'entreprise marocaine.

Bienvenue Dr. Mohamed SMANI.

Chers amis, chers collègues,

A vous tous je voudrai présenter mes chaleureuses félicitations, mes souhaits de bienvenue et mes meilleurs vœux de succès. Je suis sûr que nos nouveaux confrères contribueront à enrichir le rôle de notre Académie et renforcer encore plus ses activités, sachant que c'est dans la coopération de nous tous, anciens et nouveaux membres – résidents, associés et correspondants –, que nous arriverons à améliorer notre travail, à prendre de nouvelles initiatives, à être encore plus actifs, plus créatifs, plus inventifs, plus efficaces au service de la science dans notre pays et mettre en œuvre l'orientation royale qui a été donnée à notre Académie le jour de son installation par son Protecteur, Sa Majesté Le Roi, et dont elle a fait sa devise : «Servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale».

Merci.

Après cette présentation, les nouveaux membres ont pris successivement la parole pour présenter leurs remerciements et leur gratitude à Sa Majesté le Roi Mohammed VI – que Dieu L'assiste – pour Sa Haute Sollicitude et Ses encouragements dont Il entoure l'ensemble de la communauté scientifique du Maroc.

Session Parallèle 4 :
Physique, Physique-Chimie

Modérateur : Pr. Jean-Pierre Majoral
Rapporteur : Pr. Mostapha Bousmina

ETUDE DE L'EFFICACITE DES POLYMERES ELECTROSTRICTIFS POUR LA RECUPERATION D'ENERGIE MECANIQUE

*Pr. Yahia BOUGHALEB¹⁻⁵, Pr. Adil EDDIAI²,
Pr. Mounir MEDDAD³, Pr. Abdelwahed HAJJAJI⁴,
Pr. Daniel GUYOMAR²*

¹ Faculté des Sciences, Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc

² Laboratoire de Génie Electrique et de Ferroélectricité, INSA de Lyon, France

³ Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie

⁴ Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Université Chouaib Doukkali,
El Jadida, Maroc

⁵ Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Rabat, Maroc



Résumé

Après avoir proposé précédemment des nouvelles techniques pour améliorer la puissance récupérée par les polymères électrostrictifs, nous nous projetons dans ce travail d'étudier l'efficacité de la conversion électromécanique pour la récupération d'énergie vibratoire en utilisant l'analyse spectrale FFT. Un modèle analytique a été développé et les résultats théoriques ont été confrontés à ceux obtenus par l'expérience. Puis une amélioration de l'efficacité de la conversion électromécanique basée sur une structure hybride a aussi été réalisée. Le but de cette technique est de diminuer la polarisation injectée par l'utilisation des électrets de polypropylène cellulaire, afin d'obtenir un meilleur rendement énergétique des polymères électrostrictifs. Après avoir analysé le courant de court-circuit en comparant la structure proposée à celle classique (sans électrets), nous avons focalisé notre attention sur l'étude de la puissance récupérée ainsi que l'efficacité de conversion.

I. Introduction

La diminution croissante de la consommation et de la taille des systèmes électroniques permet aujourd'hui d'ajouter toujours plus de fonctionnalités pour un même budget énergétique. En parallèle, de nombreux travaux ont permis d'améliorer les sources de récupération d'énergie et en particulier leur densité de puissance. La convergence de ces deux domaines nous a permis d'envisager la création d'un système autonome alimenté à partir de la récupération de l'énergie de l'environnement. Avec le développement de systèmes micro-électromécaniques (MEMS) au cours de la dernière décennie, la demande pour les appareils électroniques portables et de détecteurs sans fil est devenue de plus en plus importante.

Avec les grandes avancées dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, certaines applications nécessitent des nœuds de capteurs pour avoir une longue durée de

vie. L'utilisation de piles conventionnelles n'est pas toujours avantageuse, car leur remplacement nécessite l'intervention humaine. Par conséquent, l'acquisition de la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner ces appareils est une préoccupation majeure et une source d'énergie alternative aux batteries conventionnelles doivent être prise en considération. L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de ces appareils peut être obtenue en piégeant les énergies lumineuses, thermiques ou mécaniques disponibles dans le milieu ambiant. Un tel processus permettrait de fournir de l'énergie illimitée pour la durée de vie du dispositif électronique. Ces sources peuvent être utilisées pour augmenter la durée de vie ainsi que la capacité de ces appareils [Ami1997] [Kan2004] [Men2001] [Rah2003].

Les dispositifs alimentés par des capteurs d'énergie peuvent, lorsqu'ils sont placés dans des endroits inaccessibles, être utilisés pour fournir des informations vitales sur les circonstances opérationnelles et structurelles [Lal2010] [Medd2012a]. Ainsi, les scientifiques ont été forcés de chercher de nouveaux moyens capables de récupérer l'énergie de l'environnement [Par2005] [Ren2007]. A titre d'exemple, les polymères électrostrictifs offrent des propriétés uniques pour la technologie de transducteur électromécanique par rapport aux techniques classiques telles que celles basées sur les piézoélectriques ou les systèmes électromagnétiques [Gui2003] [Edd2012a] [Liu1998]. Les piézoélectriques sont limités en termes de déformations qu'ils peuvent supporter, mais ils sont capables de fonctionner à des fréquences élevées. D'autre part, les polymères électrostrictifs sont généralement capables de maintenir des déformations beaucoup plus grandes et ont des facteurs de forme flexibles et sont plus appropriés pour des applications de basse fréquence. En outre, ces matériaux sont caractérisés par de très hautes densités d'énergie et présentent de bonnes efficacités de couplage [Edd2012b] [Medd2012b].

Afin d'atteindre l'objectif susmentionné, de nombreuses études ont été réalisées sur des polymères électrostrictifs pour prédire et améliorer leurs capacités de récupération d'énergie en augmentant la permittivité par l'incorporation des nanoparticules conductrices [Leb2009] [Medd2012c]. D'autres investigations, comme celles effectuées par Liu et al. [Liu2004] et Ren et al. [Ren2007], ont mis l'accent sur l'optimisation du processus de transfert d'énergie par l'utilisation d'interfaces appropriées. Guyomar et al [Guy2011a] ont proposé une méthode simple mais originale qui permet la mesure de la constante diélectrique, le module d'Young et le coefficient électrostrictif d'un film polymère. Cette méthode est basée sur l'analyse du courant circulant à travers l'échantillon par la transformation de Fourier rapide (FFT), lorsque celui-ci a été entraîné simultanément par un champ électrique et une excitation mécanique.

Ce travail s'articule autour de deux axes de recherche; le premier se focalise sur une étude des analyses spectrales FFT de l'efficacité des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie, afin d'augmenter leurs capacités de conversion électromécanique. Le deuxième axe concerne l'utilisation des électrets (Polypropylène) pour palier au problème lié au champ statique nécessaire à la polarisation du film polymère, afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique des polymères électrostrictifs [Edd2013].

II. Etude de l'efficacité des polymères électrostrictifs par la FFT

Dans cette partie, une évaluation de la récupération d'énergie par les analyses spectrales FFT sera effectuée dans le but d'augmenter les capacités de conversion de polymères électrostrictifs. L'effet des paramètres mécaniques (amplitude de déformation, fréquence

mécanique) sur l'efficacité de conversion sera étudié. Le modèle analytique sera confronté à la pratique et une bonne corrélation entre les deux approches sera démontrée. Afin d'obtenir un bon rendement de conversion, une optimisation des paramètres mécaniques sera entreprise.

II.1 Modélisation et analyse des capacités

Comme nous l'avons vu dans les travaux précédents [Edd2012c], le phénomène d'électrostriction est défini comme un couplage quadratique entre la contrainte mécanique et le champ électrique. Supposons qu'il y a une relation linéaire entre la polarisation et le champ électrique, la déformation S_{ij} et la densité de flux électrique D_m sont exprimées en fonction des variables indépendantes de l'intensité du champ électrique E_m , E_n et de la contrainte mécanique τ_{ij} par les relations constitutives d'électrostriction suivantes [Liu2005] :

$$\begin{cases} S_l = M_{ijkl} E_k E_l + S_{ijkl}^E \tau_{kl} \\ D_i = \epsilon_{ijkl}^T E_k + 2M_{ijkl} E_l \tau_{kl} \end{cases} \quad (1)$$

Le film électrostrictif isotrope se contracte le long de la direction d'épaisseur et se détend le long de la direction du film quand un champ électrique a été appliqué à travers l'épaisseur. En supposant que seule la contrainte non nulle soit appliquée le long de la longueur du film, les relations constitutives se simplifient comme suit:

$$\begin{cases} S_1 = M_{31} E_3^2 + S_{11}^E \tau_1 \\ D_3 = \epsilon_{33}^T E_3 + 2M_{31} E_3 \tau_1 \end{cases} \quad (2)$$

Le déplacement électrique D_3 traversant le film de polymère peut être calculé à partir de l'équation 3 :

$$D_3 = \epsilon_{33}^T E_3 + \frac{2M_{31}}{S_{11}^E} E_3 S_1 - 2 \frac{M_{31}^2 E_3^3}{S_{11}^E} \quad (3)$$

En passant au domaine fréquentiel, le déplacement électrique D_3 sur l'élément d'électrostriction peut être exprimé comme suit :

$$\tilde{D} = \epsilon_{33}^T \tilde{E}_3 + \frac{2M_{31}}{S_{11}^E} [E_3 * S_1] - 2 \frac{M_{31}^2 [E_3 * E_3 * E_3]}{S_{11}^E} \quad (4)$$

Ici, (*) correspond au produit de convolution et (-) correspond au domaine fréquentiel. D'autre part, les expressions de E_3 et S_1 dans le domaine fréquentiel sont données respectivement par les équations suivantes :

$$\tilde{E}_3 = E_{ds} \delta(\omega) + \frac{E_0}{2} \delta(\omega + \omega_e) + \delta(\omega - \omega_e) \quad (5)$$

et

$$\tilde{S} = \frac{S_0}{2} \delta(\omega + \omega_m) + \delta(\omega - \omega_m) \quad (6)$$

où δ représente la fonction de Dirac delta.

Puisque le courant I généré par le film polymère peut être calculé à partir de la dérivation de la formule de déplacement électrique D_3 (équation 4), l'expression du courant dans le domaine fréquentiel est donnée par l'équation 7 [Guy2011a] :

$$I = A \left[B_1 \delta(\omega + \omega_e) + B_2 \delta(\omega + 2\omega_e) + B_3 \delta(\omega + 3\omega_e) + \dots + B_4 \delta(\omega + \omega_m) + B_5 \delta(\omega + (\omega_m + \omega_e)) + \dots + B_6 \delta(\omega + (\omega_m - \omega_e)) \right] \quad (7)$$

Les expressions des coefficients B_i sont représentées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Synthèse des valeurs de calculées à partir de l'équation 7

B_i	Amplitude
B_1	$E_0 \omega_e \varepsilon_{33}^r \frac{3M_{31}^2}{S_{11}^E} \left(E_{dc}^2 + \frac{E_0^2}{4} \right)$
B_2	$\frac{3M_{31}^2}{S_{11}^E} E_{dc} E_0^2 \omega_e$
B_3	$\frac{1}{4} \frac{M_{31}^2}{S_{11}^E} E_0^3 \omega_e$
B_4	$\frac{2M_{31}}{S_{11}^E} E_{dc} S_0 \omega_m$
B_5	$\frac{M_{31}}{S_{11}^E} E_0 S_0 (\omega_m + \omega_e)$
B_6	$\frac{M_{31}}{S_{11}^E} E_0 S_0 (\omega_m - \omega_e)$

La contribution des pertes électriques au courant ne peut pas être négligée pour le polymère étudié [Fuj2007], contrairement à la contribution de perte mécanique. Les pertes électriques ont été ajoutées à l'expression du courant I par $E_{dc} / (R_{dc} t)$ pour la composante DC, où R_{dc} est la résistance du film polymère et elle est mesurée à l'aide d'un électromètre Keithley 6517A. Avec les nouvelles expressions de B_i , il devient alors possible de calculer les différents paramètres du polymère electrostrictif.

$$M_{31} = \frac{1}{3} \left[\frac{B_2 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}}}{B_6 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}}} \right] \left(\frac{S_0 (\omega_m - \omega_e)}{E_{dc} E_0 \omega_e} \right) \quad (8)$$

$$S_{11}^E = \left[\frac{B_2 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}}}{\left(B_5 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}} \right)^2} \right] \left(\frac{S_0^2 (\omega_m + \omega_e)^2}{3E_{dc} \omega_e} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{33}^t = \left[\frac{\left(B_1 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}} \right)}{E_0 \omega_e} - \frac{3M_{31}^2}{S_{11}^E} \left(E_{dc}^2 + \frac{E_0^2}{4} \right) \right] \quad (10)$$

Ces coefficients sont déterminés en mesurant B_1, B_2, B_5 et B_6 qui sont respectivement l'amplitude des composantes du courant aux fréquences, $\omega_m, \omega_e, 2\omega_e, \omega_e + \omega_m$ et $\omega_m - \omega_e$. S_0 est l'amplitude de la déformation imposée et E_{dc} est la composante du champ électrique.

Pour le système de récupération d'énergie actif étudié dans le cadre de cette étude, il faut tenir compte de l'énergie électrique consommée par la polarisation du polymère. Aucune mesure directe de la quantité d'énergie électrique consommée n'a été effectuée. La puissance $P_{récup}$ récupérée pourrait être calculée à partir du courant récupéré (Equation 11) :

$$P_{récup} = R_c I^2 \quad (11)$$

où R_c est la charge adaptée. Dans ce cas, R_c est égal à $\left(\frac{1}{\omega C_p} \right)$, où C_p représente la capacité du polymère composite et la pulsation de l'excitation mécanique. Cette capacité pourrait être calculée en fonction des dimensions du film polymère (l : longueur, L : largeur, et e : épaisseur) et sa permittivité selon la formule suivante: $(\varepsilon_0 \varepsilon_r l L / e)$ [Edd2012c] [Guy2009]. La puissance nécessaire pour induire une polarisation est donnée par l'équation suivante:

$$P_{polar} = R_c \left(\frac{V_{dc}}{R_p(\omega) + R_c} \right)^2 \quad (12)$$

avec $R_p(\omega) \gg R_c$, la puissance de polarisation devient comme suit:

$$P_{pola} = R_c \left(\frac{V_{dc}}{R_p(\omega)} \right)^2 \quad (13)$$

La puissance demandée pour polariser le film polymère est proportionnelle à l'inverse de $R_p(\omega)$, donc il serait intéressant d'utiliser un composite avec une grande valeur de $R_p(\omega)$ pour diminuer la polarisation injectée et améliorer ainsi l'efficacité du film pour la récupération d'énergie vibratoire. Dans le prochain paragraphe, nous présentons et comparons les résultats expérimentaux et théoriques. Une bonne corrélation entre ces différents résultats a été mise en évidence.

II.2 Résultats expérimentaux et discussion

Cette partie sera articulée sur l'étude de l'effet des paramètres mécaniques (fréquence et amplitude de déformation) dans le but d'augmenter le courant généré par le film polymère

ainsi que la puissance récupérée. L'optimisation de ces paramètres sera effectuée, afin d'assurer un bon rendement des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie. Les résultats expérimentaux seront présentés et comparés à ceux obtenus par la théorie, afin de vérifier la validité du modèle développé au paragraphe II.1.

Effet de la fréquence mécanique f_m

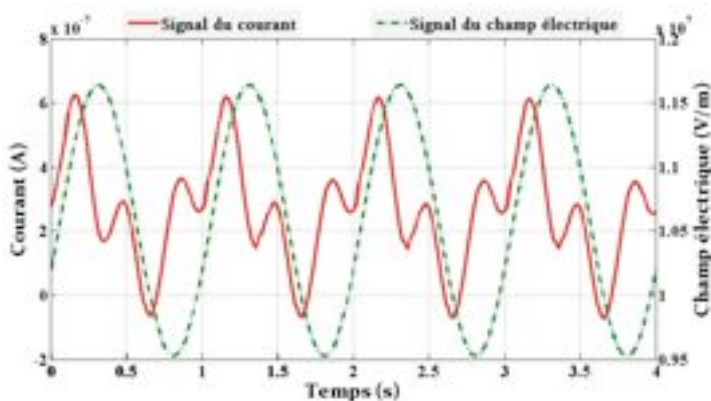
Le film polymère de type PU 0.5%C a été utilisé pour caractériser le courant et la puissance récupérée. Le film a été étiré avec une amplitude de déformation maximale de 5% avec une fréquence mécanique de 3Hz et 6 Hz. Un champ de polarisation DC de $10V/\mu m$ avec une faible composante alternative AC pour une fréquence 1 Hz, a été appliqué, afin d'assurer le fonctionnement en mode pseudo piézoélectrique du polymère électrostrictif. Les différents paramètres du film polymère sont disponibles au tableau 2.

Tableau 2 : Propriétés de PU composites à

Polymère	Permittivité relative	Module de Young	Epaisseur
	ϵ_r	$Y (MPa)$	$e (\mu m)$
PU0.5%C	34	8.5	56

La première partie de ces essais consiste à mesurer le courant de court-circuit. La figure 1 (a) représente le courant électrique mesurée et le champ de polarisation appliqué en fonction du temps, et la figure 1 (b) présente la FFT du courant récupéré pour $f_e = 1Hz$ et $f_m = 3Hz$. Selon les résultats de la figure 1 (b), on constate que l'amplitude du courant de polarisation ($B_2 = 6.07 \cdot 10^{-7}$) est supérieure à celle obtenue par le courant généré par la conversion électromécanique ($B_1 = 4.297 \cdot 10^{-7}$). Ceci montre clairement que sous ces conditions, la puissance consommée par la polarisation est plus grande que celle récupérée, ce qui conduit à un rendement négatif du film polymère.

Les figures 2 (a) et 2 (b), représentent respectivement le courant électrique mesuré et le champ de polarisation en fonction du temps ainsi que la FFT des courants récupéré. Le film de polymère a été étiré avec une même amplitude de déformation de 5% à $f_m = 6Hz$ pour les mêmes conditions électriques ($E_{dc} = 10V/\mu m, f_e = 1Hz$).



(a)

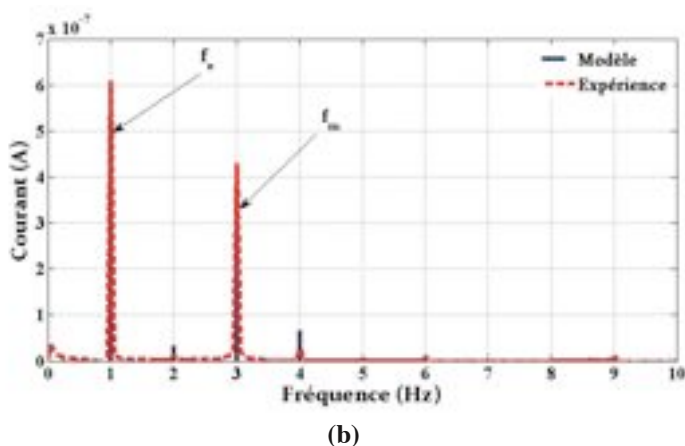
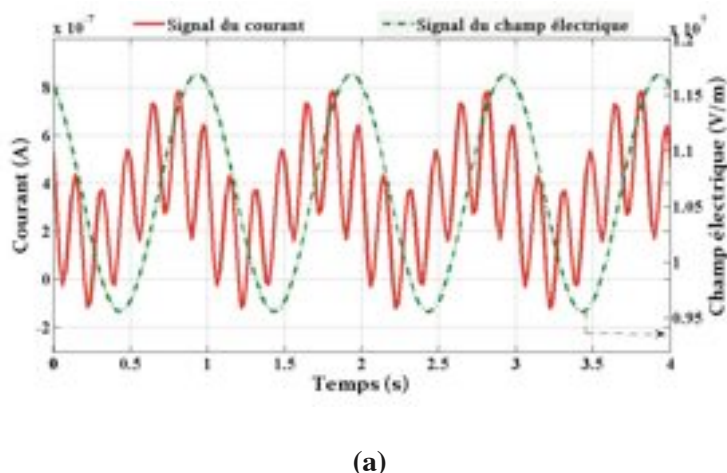
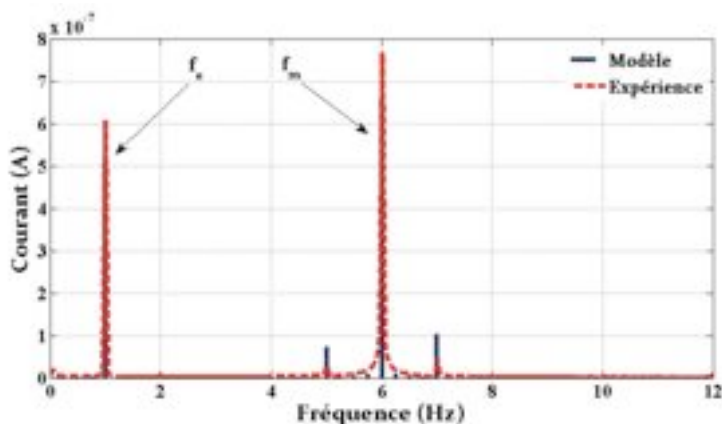


Figure 1 : (a) Courant et champ électrique en fonction du temps; (b) FFT du courant de court-circuit à f_m 3Hz.

Cependant, expérimentalement l'amplitude du coefficient B_2 est restée constante et devient beaucoup plus petite que celle de B_1 qui a atteint une valeur de $7.677 \cdot 10^{-7} \text{ A}$ comme indiqué dans la figure 2 (b). Une bonne corrélation entre la pratique et l'expérience a été observée.

Il a été montré dans des travaux antérieurs que la permittivité était un coefficient crucial dans la conversion électromécanique [Eur1999] [Gal2007] [Guy2011b]. Il est très important de trouver un mode de fonctionnement qui correspond à une permittivité diélectrique élevée avec des pertes électriques faibles. Dans ce cas, on peut constater d'après le tableau 1, pour une augmentation de la fréquence mécanique f_m et avec un rapport $\left(\frac{m_{31}}{S_{11}^E}\right)$ constant, que l'augmentation du coefficient B_1 est due à celle de la permittivité diélectrique.

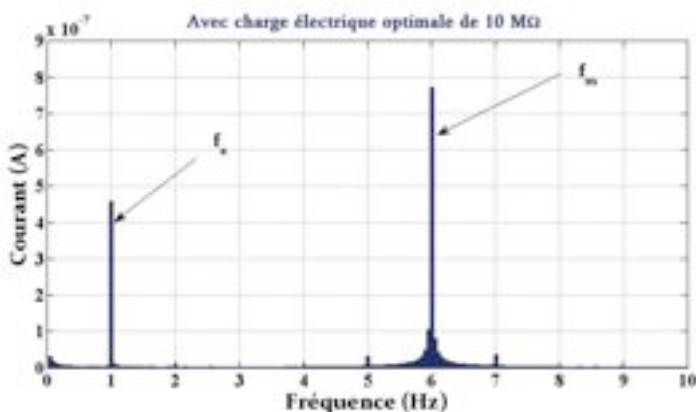




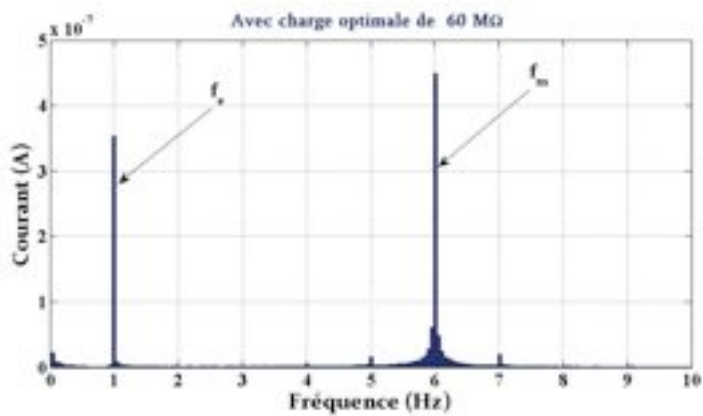
(b)

Figure 2 : (a) Courant et champ électrique en fonction du temps; (b) FFT du courant de court-circuit à f_m 6Hz

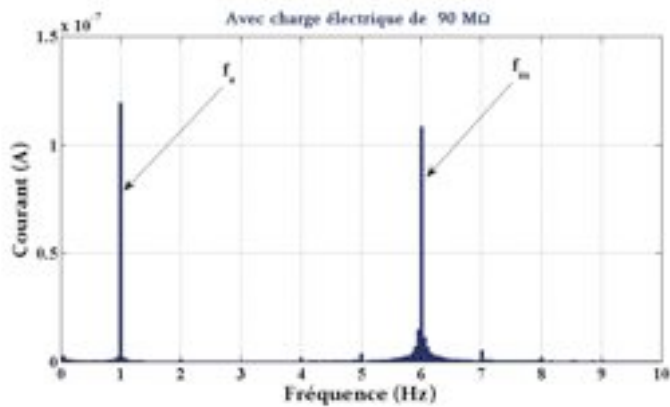
Les mesures réalisées au cours de ce paragraphe ont permis de démontrer la validité du modèle du courant de court-circuit. Pour la prochaine étude, des essais en charge seront effectués dans le but d'identifier les paramètres de la conversion à optimiser pour la récupération de l'énergie. Pour cela la FFT du courant délivré par le polymère pour différentes valeurs de la charge électrique est représentée dans la figure 3. On peut visualiser que l'amplitude des raies du courant mesuré décroît avec l'augmentation de la résistance électrique. Cependant, pour les résistances de $10\text{ M}\Omega$ et $60\text{ M}\Omega$ (figure 3(a) et 3(b)), l'amplitude correspondant à la fréquence f_m est supérieure à celle correspondant à la fréquence f_s , ce qui indique que la puissance mécanique délivrée par le polymère est plus élevée que celle de la polarisation injectée. Par contre, au dessus de $60\text{ M}\Omega$, un effet inverse de l'amplitude est observée, c.-à-d. que l'amplitude correspondant à f_m est devenue inférieure à celle correspondant à f_s . Ces résultats montrent clairement qu'il y avait une plage de fonctionnement optimale pour une meilleure récupération d'énergie.



(a)



(b)



(c)

Figure 3 : FFT du courant mesuré pour différentes charge électriques

(a) R_c 10MΩ

(b) R_c 60MΩ

(c) R_c 90MΩ

Le tableau 3 donne les valeurs de l'amplitude des raies du courant mesuré obtenues lors de cette expérience.

Tableau 3 : Evaluation de l'amplitude des raies du courant mesuré à différentes résistances pour f_m 6Hz et f_e 1Hz

Résistance $R_c (M\Omega)$	$f_m (6 \text{ Hz})$	$f_e (1 \text{ Hz})$	$f_m - f_e (5 \text{ Hz})$	$f_m + f_e (7 \text{ Hz})$
10	$7.71 \cdot 10^{-7} \text{ A}$	$4.75 \cdot 10^{-7} \text{ A}$	$3.14 \cdot 10^{-8} \text{ A}$	$3.16 \cdot 10^{-8}$
60	$4.49 \cdot 10^{-7} \text{ A}$	$3.53 \cdot 10^{-7} \text{ A}$	$1.58 \cdot 10^{-8} \text{ A}$	$1.97 \cdot 10^{-8} \text{ A}$
90	$1.08 \cdot 10^{-7} \text{ A}$	$1.19 \cdot 10^{-7} \text{ A}$	$3.87 \cdot 10^{-9} \text{ A}$	$5.31 \cdot 10^{-9}$

L'étude de la puissance récupérée par rapport à la charge électrique et pour différents régimes de fonctionnement, sera présentée et plusieurs mesures ont été effectuées afin de valider la modélisation de la puissance.

La figure 4 donne les résultats obtenus de la puissance en faisant varier la charge électrique pour deux valeurs de la fréquence mécanique (3 Hz, 6 Hz) une amplitude déformation de $S = 5\%$, tout en conservant la même excitation électrique ($E_{dc} = 10 \text{ V} / \mu\text{m}$, $E_0 = 2 \text{ V} / \mu\text{m}$ et $f_e = 1 \text{ Hz}$). Ces données ont montré qu'il existe un transfert optimal de la puissance récupérée pour une résistance électrique optimale de $R = 60 \text{ M}\Omega$ comme prévu à la figure 3 (b). De plus une bonne cohérence, entre les données expérimentales et la théorie, est notée. La puissance récupérée à l'aide d'une excitation mécanique à 3 Hz est plus faible que celle obtenue à 6 Hz. En outre, le modèle et l'analyse FFT confirme que la récupération d'énergie est proportionnelle à la fréquence de l'excitation mécanique.

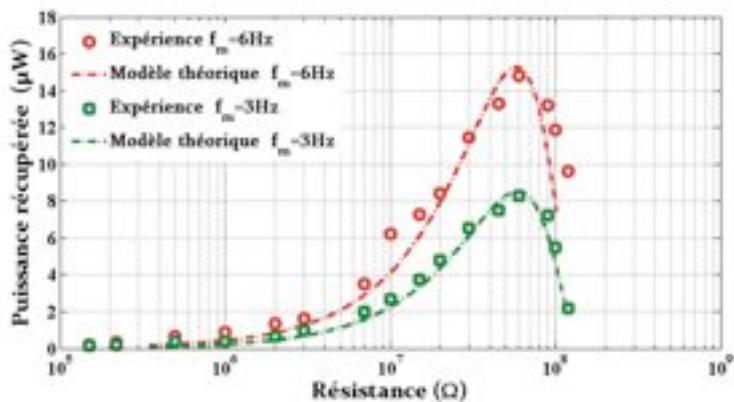


Figure 4 : Puissance récupérée en fonction de la résistance pour un champ électrique de $10 \text{ V}/\mu\text{m}$ à f_e 1Hz et une déformation de 5% à différentes valeurs de f_m

Selon les valeurs de la puissance récupérée obtenues par un système qui fonctionne avec ($f_m = 3 \text{ Hz}$ ($8.498 \mu\text{W}$)) et celui qui fonctionne à $f_m = 6 \text{ Hz}$ ($14.83 \mu\text{W}$), une différence importante a été observée et qui est due aux caractéristiques intrinsèques du matériau polymère. D'après le calcul des constantes B_1 , B_2 , B_3 et B_6 données par le tableau 1, nous avons constaté

que le rapport M_{31}/S_{11}^E est resté à peu près constant pour les deux fréquences de l'excitation mécanique $\left(\frac{M_{31}}{S_{11}^E} = 7.257 \cdot 10^{-8}$ pour $f_m = 3 \text{ Hz}$ et $\frac{M_{31}}{S_{11}^E} = 7.284 \cdot 10^{-8}$ pour $f_m = 6 \text{ Hz}$).

L'augmentation de l'amplitude de B_1 du à l'accroissement de la fréquence mécanique conduit à un changement notable de la permittivité diélectrique qui peut être considérée comme un paramètre essentiel pour améliorer la puissance récupérée.

Le point le plus important qu'on peut extraire de cette étude expérimentale est l'obtention d'une image sur l'efficacité de la conversion électromécanique des polymères électrostrictifs par une comparaison entre la puissance récupérée et celle de polarisation. Cependant, avec des charges électriques supérieures à $60 \text{ M}\Omega$, la puissance consommée est devenue plus grande que celle récupérée et qui conduit à un rendement négatif. Ceci confirme qu'il y a un régime de fonctionnement optimal dans le but d'avoir un rendement positif, qui relie les trois paramètres S_0 , f_m et f_e .

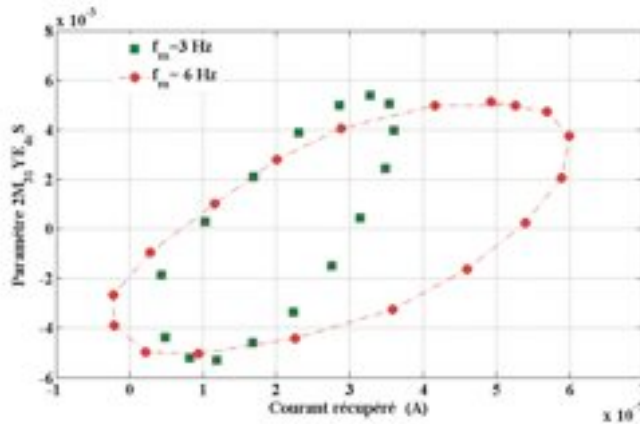


Figure 5 : Comparaison des cycles de la conversion électromécanique pour deux fréquences mécaniques : $f_m = 3 \text{ Hz}$ et $f_m = 6 \text{ Hz}$

Dans des études antérieures, il a été prouvé que la densité énergétique totale dW_{conv} convertie par un polymère electrostrictif est donnée par la relation suivante $dW_{conv} \approx M_{31} Y E_d E_0 dS$ [Guy2011b]. Par conséquent, les performances de la conversion électromécanique des polymères électrostrictifs peuvent être obtenues à partir de la surface Champ électrique/ Déformation. Une comparaison de la densité d'énergie convertie entre les deux régimes de fonctionnement ($f_m = 3 \text{ Hz}$ et $f_m = 6 \text{ Hz}$), est donnée par la figure 5. Cette figure montre que les deux surfaces diffèrent considérablement dans ces conditions. Cependant, grâce à l'augmentation du couplage électromécanique des polymères électrostrictifs, la surface correspondant à $f_m = 6 \text{ Hz}$ a dépassé celle du cas $f_m = 3 \text{ Hz}$. Dans le cas de 6 Hz , nous avons obtenu une densité de puissance de $43,7 \text{ mW/cm}^3$, ce qui est comparable aux valeurs obtenues par la plupart des matériaux piézoélectrique. Par exemple, Kim et al. [Kim2008] ont réalisé un dispositif qui est capable de générer une puissance de $301,3 \text{ mW/cm}^3$ à 870 Hz . La densité de puissance obtenue à partir de ce travail a démontré l'excellent potentiel des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie.

Dans le prochain paragraphe, une étude de courant par FFT ainsi que la puissance récupérée pour différentes amplitudes de déformations S_0 en fixant les autres paramètres

(f_m , f_e , E_{dc} , E_0), sera effectuée afin d'évaluer précisément les capacités des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie vibratoire.

Effet de l'amplitude de la déformation mécanique S_0

Le but de ce paragraphe est d'étudier l'effet de l'amplitude de déformation d'un film polymère entraîné simultanément par un champ électrique et par une excitation mécanique afin de déterminer la plage optimale de fonctionnement pour obtenir une bonne efficacité de conversion électromécanique des polymères électrostrictifs.

Les matières organiques, contrairement aux céramiques piézoélectriques, sont plus souples, par conséquent, l'énergie mécanique d'entrée est considérablement plus élevée sous une force mécanique identique. Malheureusement, les polymères piézo-électriques, tels que le PVDF, ont un coefficient de piézo-électrique beaucoup plus faible par rapport aux matériaux céramiques piézoélectriques. Une étude a montré que la récupération d'énergie est plus faible pour ces matériaux par rapport aux céramiques piézoélectriques [Liu2004]. Une étude récente a montré que le polyuréthane, qui est un polymère électrostrictif, est capable de générer des déformations de plus de 10%, sous un champ électrique modéré (20 V/ μ m). Ce matériau peut par conséquent être considéré comme un candidat potentiel pour les actionneurs. En outre, la densité d'énergie mécanique est comparable à celle des monocristaux piézoélectriques [Zha2004].

La figure 6 montre le résultat typique du comportement de chaque déformation S en fonction du temps avec différentes valeurs du champ électrique E . Chaque champ a commencé à partir de zéro et le maximum passe de 2, à 4, 7, 10 et 15 V/ μ m pour une fréquence de 1 Hz. On note que la déformation augmente avec le champ électrique. Une saturation de 10% est observée pour des champs élevés.

La figure 7 montre la déformation maximale en fonction de la valeur maximale du champ électrique appliqué à 1Hz pour un échantillon PU à différents pourcentages de nanoparticules de carbones (1 et 0,5 wt. % C et pur). On peut remarquer que le PU 1wt %C a une déformation électromécanique plus élevée par rapport aux autres, c'est donc pour cette raison, que nous l'utilisons dans l'étude qui va suivre.

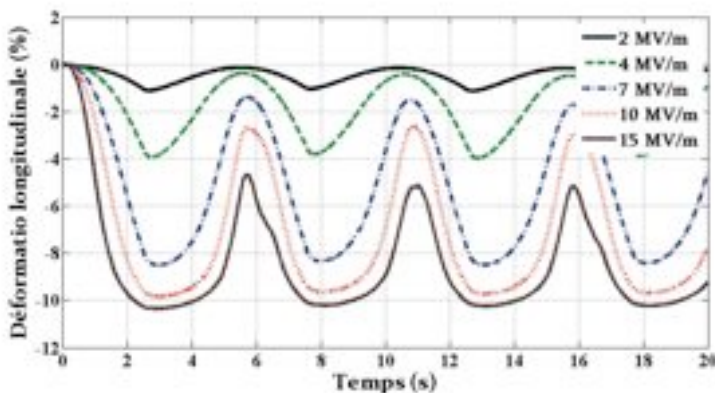


Figure 6 : Déformation en fonction du temps pour un film de PU 1%C pour différents niveaux de champ électrique à 1Hz

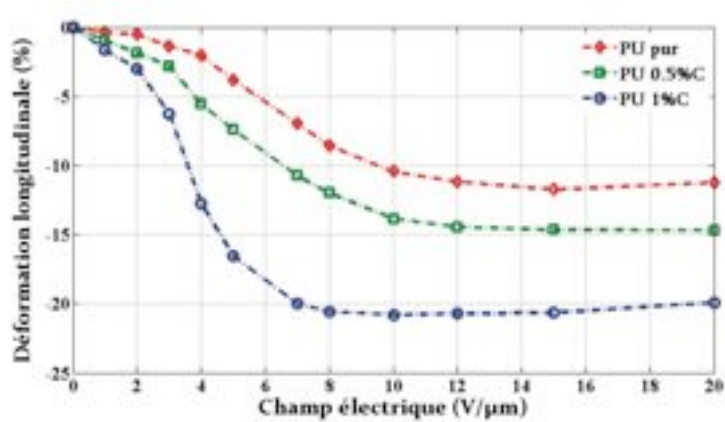


Figure 7 : Déformation maximale par rapport à la valeur maximale du champ électrique appliqué

Les paramètres représentatifs de polyuréthane chargé avec des nanoparticules de carbone à 1Hz, sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Paramètres du polymère électrostrictif à 1Hz

Polymère	ϵ_{33}	M_{31}	S_{11}	$\frac{\epsilon_0 (\epsilon_r - 1)^2}{\epsilon_r S_{11}}, 10^{-18}$
		$(V / m)^{-2}, 10^{-15}$	$(Pa)^{-1}, 10^{-8}$	
PU1%C	$17\epsilon_0$	4.081	1.35	2.03

Le film polymère a été étiré avec différentes amplitudes de déformations (2%, 4% et 6,5%) à $f_m = 6\text{ Hz}$ sous un champ électrique de polarisation continu de $13\text{ V}/\mu\text{m}$ à $f_e = 1\text{ Hz}$.

La mesure du courant en cas de court-circuit a été effectuée sous ces conditions et les résultats obtenus seront comparés aux résultats théoriques, afin de valider le modèle théorique à un niveau macroscopique. Des mesures préliminaires pour la détermination de la puissance théorique récupérée ont été effectuées pour évaluer la valeur de court-circuit.

La figure 8 montre l’analyse harmonique de ce courant et affiche toutes les fréquences prédites ($f_e, f_m, f_m + f_e$ et $f_m - f_e$). L’argument qui correspond à f_e est supérieur à celui correspond à f_m , ils ont comme valeur $0.35\mu\text{A}$ et $0.2\mu\text{A}$, respectivement. Ceci montre que le courant nécessaire pour induire une polarisation stable à l’aide du champ électrique est plus grand à celui produit par la conversion électromécanique et sous ces conditions la puissance consommée par la polarisation est plus importante que celle récupérée.

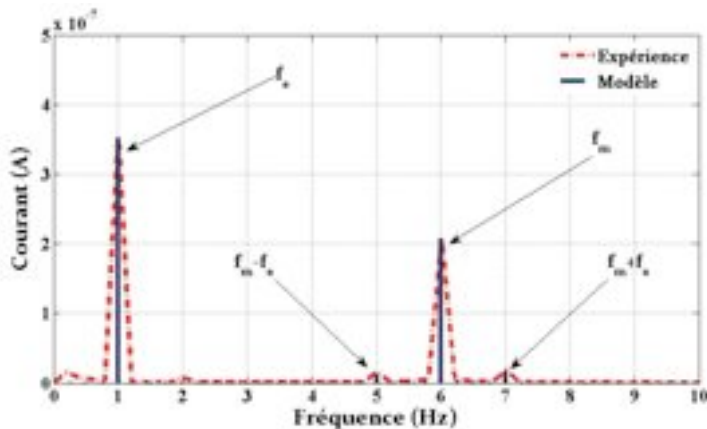


Figure 8 : FFT du courant de court-circuit pour une déformation de S_0 2%.

L'évolution du courant récupéré par l'analyse spectrale pour une déformation de $S_0 = 4\%$ est affichée dans la figure 9. Dans ce cas, on voit clairement qu'il y'a une augmentation importante de l'argument qui correspond à f_m , par contre, une légère variation de l'argument associé à f_e a été observée. Ce résultat montre que le courant récolté est proportionnel à l'amplitude de déformation et que cette relation se traduit par un doublement du courant récupéré en passant d'une valeur de 2% à 4%. Pour ce cas, la puissance électrique consommée par la polarisation peut être estimée égale à la puissance récupérée.

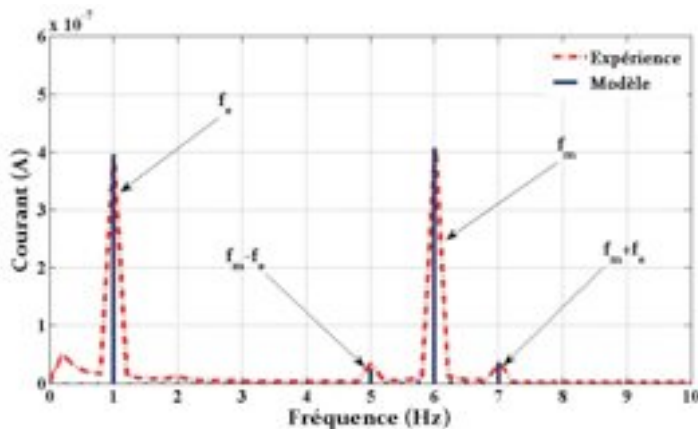


Figure 9 : FFT du courant de court-circuit pour une déformation de S_0 4%.

Le point le plus important dans cette étude expérimentale consistait à déterminer les conditions physiques avec lesquelles nous obtenons une efficacité de conversion électromécanique positive. Cependant, au-delà d'une charge optimale, la puissance de polarisation est devenue supérieure à celle récoltée. Cela montre qu'il y a un régime de fonctionnement optimal pour une meilleure performance, qui relie les trois paramètres, S_0 , f_m et f_e . La figure 10, donne les résultats pratiques et théoriques du courant de court-circuit par la FFT pour une déformation de $S_0 = 6.5\%$. Un bon accord entre la théorie

et la pratique est noté pour les trois cas de déformation. Une augmentation du courant correspond à l'argument mécanique ($6.89\mu A$) est observée, et que la valeur de l'argument électrique reste presque inchangée ($4.09\mu A$). Ces valeurs sont très intéressantes et significatives pour un meilleur rendement de la conversion électromécanique.

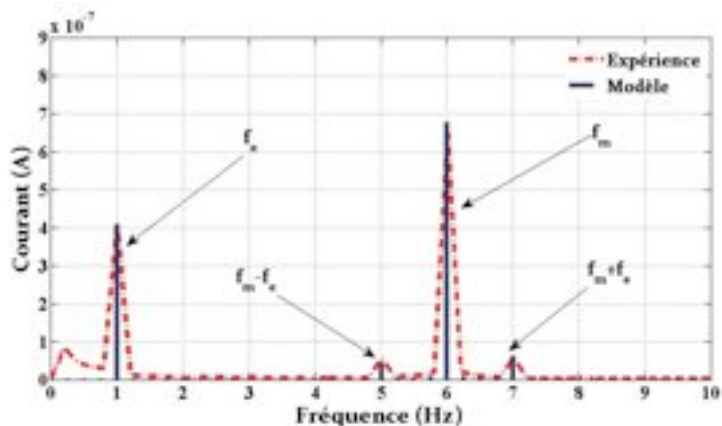


Figure 10 : FFT du courant de court-circuit pour une déformation de $S_0 = 6.5\%$.

Afin de valider complètement le modèle développé, une évolution de la puissance récupérée en fonction de la charge électrique pour un champ électrique de $13 \text{ V}/\mu\text{m}$ et différentes valeurs de déformations (2%, 4% et 6.5%) est réalisée et présentée dans la figure 11. Ces données expérimentales ont montré que le transfert de la puissance est optimale pour une résistance égale à $75 \text{ M}\Omega$ et qu'il existe une forte relation entre la puissance récupérée et l'amplitude de déformation en passant d'une valeur de $22.28 \mu\text{W}$ pour 2% à une autre de $33.94 \mu\text{W}$ pour 6.5%. Donc l'amplitude mécanique est un paramètre très important à optimiser pour améliorer la récupération d'énergie vibratoire à l'aide des polymères électrostrictifs

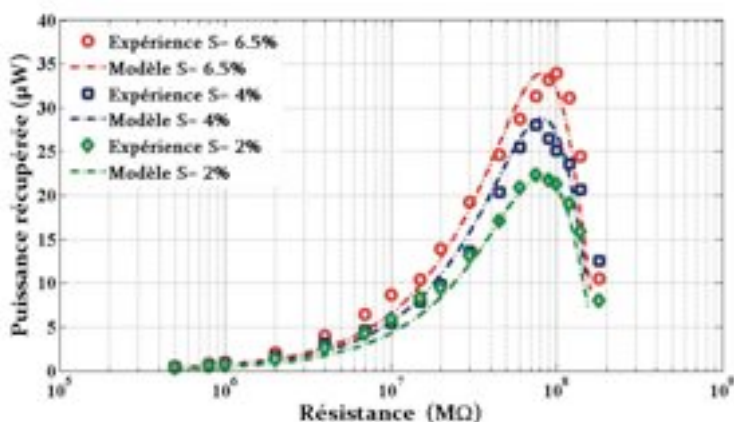


Figure 11 : Puissance récupérée en fonction de la résistance pour différentes déformations à $f_m = 6 \text{ Hz}$ et pour un champ électrique de $13 \text{ V}/\mu\text{m}$ à $f_c = 1 \text{ Hz}$.

Le tableau 5 donne les valeurs de la puissance nécessaire pour la polarisation donnée par l'équation 13, et la puissance récupérée décrite par l'équation 11. La dernière colonne du tableau montre les valeurs de l'efficacité de conversion d'énergie, afin d'avoir une image sur rendement énergétique des polymères électrostrictifs. Dans ces conditions, nous pouvons clairement déduire qu'au delà de la valeur d'une déformation de 4%, une bonne efficacité de conversion est obtenue.

Tableau 5 : Étude de l'efficacité du polymère pour différentes valeurs de déformation

Déformation (%)	$P_{polarisation}$ (μW)	$P_{récupérée}$ (μW)	Efficacité de la conversion (%)
$S = 2\%$	37.4	22.6	37.6
$S = 4\%$	28.3	28.5	50.1
$S = 6.5\%$	30.7	34.8	53.3

L'efficacité du générateur peut être estimée à partir du coefficient de couplage k_{31} donné par l'équation suivante :

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r s_{11}}} = \frac{2M_{31}E_{dc}}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r s_{11}}} \quad (14)$$

où $d_{31} = 2M_{31}E_{dc}$ est le coefficient piézoélectrique équivalent.

Le tableau 6 résume les valeurs du coefficient électrostrictif M_{31} , la souplesse mécanique s_{11} et le coefficient de couplage k_{31} pour un champ électrique constant de $13 \text{ V}/\mu\text{m}$ et pour différentes valeurs de déformation (2%, 4% et 6.5%). Par ailleurs, le coefficient de couplage montre que le rapport $\left(\frac{M_{31}}{s_{11}}\right)$ est un facteur important dans la conversion électromécanique.

Tableau 6 : Évolution des paramètres du film en fonction de la déformation à $f_m = 6\text{Hz}$ pour un champ électrique de $13\text{V}/\mu\text{m}$ à $f_e = 1\text{Hz}$

Déformation (%)	M_{31} ($\text{V/m})^{-2}$, 10^{-18}	s_{11} ($\text{Pa})^{-1}$, 10^{-8}	k_{11}
$S = 2\%$	1.508	1.508	0.0209
$S = 4\%$	3.001	3.001	0.0411
$S = 6.5\%$	4.882	4.882	0.0576

Dans notre cas, si l'on augmente la déformation de 2% à 6,5%, ce rapport croit de $1,0695 \text{ N}/\text{V}^2$ à $2,053 \text{ N}/\text{V}^2$. Donc, l'augmentation de ce rapport entraîne un accroissement du coefficient de couplage électromécanique et qui tend vers une amélioration des performances de conversion pour une meilleure récupération d'énergie. Il serait donc possible d'améliorer la récupération d'énergie en augmentant l'amplitude de déformation, ce qui ne peut se produire que jusqu'à une certaine limite, car la déformation dépend de la capacité du film en domaine d'élasticité.

Selon cette étude, on peut déduire que l'amélioration de l'efficacité des polymères électrostrictifs est réduite par la valeur élevée de la polarisation injectée à l'aide du champ électrique appliqué. Pour palier ce problème, une nouvelle structure hybride basée sur l'effet des électrets de polypropylène sera présentée dans la partie suivante et qui permet d'augmenter aussi l'efficacité de la conversion électromécanique des polymères électrostrictifs.

III. Amélioration de l'efficacité des polymères électrostrictifs par l'utilisation des électrets

Dans cette section, nous nous intéressons au système hybride qui relie les polymères électrostrictifs avec les électrets à base de polypropylène chargé par effet corona, afin de réduire l'énergie de la polarisation injectée au film et d'augmenter par conséquent l'efficacité des polymères pour la récupération d'énergie. Dans un premier temps, une généralité sur les électrets sera présentée, puis une description de la procédure expérimentale ainsi que l'effet corona seront détaillées. Pour finir cette partie, les résultats expérimentaux effectués seront discutés. Afin de démontrer le potentiel de cette structure, une comparaison du courant de court circuit avec et sans électrets sera réalisée.

III.1 Généralités sur les électrets

Un électret est un matériau diélectrique qui présente la propriété d'être dans un état de polarisation électrique quasi-permanent. Le terme d'"électret" a été choisi par Heaviside en 1892 à cause de la ressemblance de ces matériaux avec les aimants (*magnets*): l'électret peut en effet être considéré comme l'analogue de l'aimant mais dans le domaine électrostatique.

Bien que le terme d'électret soit apparu dès 1892, le premier électret ne fut fabriqué qu'en 1919 par Wentachi. En 1925, Eguchi développe une méthode permettant de fabriquer des électrets [Egu1925] à partir d'un mélange de 45% de cire de carnauba, 45% de résine de colophane et 10% de cire d'abeille. Le tout fut porté à la température de fusion (130°C) avant d'être refroidi en présence d'un fort champ électrique. Lorsque le mélange est liquide, les molécules sont libres de se déplacer et donc de s'orienter selon la direction du champ électrique. Le champ est retiré lorsque le mélange a refroidi et les molécules polaires gardent leur orientation permettant d'obtenir une polarisation rémanente de l'ordre de 0.01 à 0.1 mC/m² et ceci pendant plusieurs années.

Dès 1928, les électrets vont être utilisés dans les microphones. En 1937, Nadjakov remplace la source de chaleur par une source lumineuse et donne le nom de photoélectrets (par opposition aux thermoélectrets) aux nouveaux électrets obtenus. En 1962, et à la suite du développement des polymères, Sessler et West proposent de fabriquer des électrets à partir de polymères (Téflons, Polypropylène (PP),...). Aujourd'hui, la recherche sur les électrets est encore très active et de nombreux matériaux ont été testés comme électrets et les résultats se sont révélés encourageants.

Rappelons qu'il existe trois catégories d'électrets dont les caractéristiques dépendent de la technique d'implantation des charges [Mic1987]:

a) Electrets dipolaires neutres

Ces électrets sont électriquement neutres. Ils sont obtenus par application d'un champ électrique intense lorsque le matériau est à la température de fusion, de façon à orienter les dipôles.

b) Electrets neutres à charges d'espace

On peut distinguer deux types de charges d'espace:

Les homo-charges : elles proviennent de l'implantation ou de l'injection directe de charges dans le matériau à partir des électrodes lors de l'application d'un champ électrique, et ceux qui sont accumulées aux bords du matériau, ayant le même signe que les charges des électrodes.

Les hétéro-charges ou charges séparées qui résultent d'un phénomène interne de répulsion et de migration des charges vers les électrodes du diélectrique. Elles sont présentes dans le matériau mais avec une répartition aléatoire conduisant à une charge d'espace nulle. En apportant de l'énergie, par exemple thermique, les charges deviennent libres. En appliquant un champ électrique, elles se déplacent et viennent former des dipôles. Les charges accumulées sont de signes opposés aux charges des électrodes.

c) Electrets à excès de charge

La dernière possibilité pour polariser le matériau est de créer un excès de charge soit par décharge Corona, soit par implantation électronique ou ionique, d'autres techniques moins standards comme le contact humide [Ike 1981] existent également :

La décharge corona est la plus utilisée actuellement dans l'industrie du fait de sa simplicité de mise en œuvre. Elle sera utilisée dans notre étude et détaillée dans le prochain paragraphe. Quant à l'implantation électronique, l'utilisation d'un canon accélérateur (à ions ou à électrons) pour accélérer des particules chargées (ions ou électrons) vers la surface d'un échantillon de diélectrique permet également de fabriquer des électrets. Les électrons viennent se placer à une profondeur donnée de la surface en fonction de leur énergie cinétique.

III.2 Procédure expérimentale

III.2.1 Setup de préparation de la structure

La procédure de préparation de la structure hybride à base de polyuréthane chargé et des électrets de polypropylène est schématiquement illustrée dans la figure 12. La première étape consiste à métalliser le film polymère (PU 1%C) qui est sous forme d'un rectangle de surface ($55 \times 22 \text{ mm}^2$) par la méthode de pulvérisation décrite dans la référence [Ed2012], et la surface métallisée est de ($40 \times 16 \text{ mm}^2$). L'échantillon de polypropylène cellulaire, notée PQ50, dont l'épaisseur et la densité était de $50 \mu\text{m}$ et 600 kg/m^3 , respectivement, a été fournis par la société Sodinor (France). Puis dans la deuxième étape, les deux films ont été collés par une colle conductrice afin d'obtenir un bon raccordement électrique. La dernière étape de préparation consiste à mettre la structure obtenue (PU 1%C + PP) sous pression à température ambiante pendant 24h.

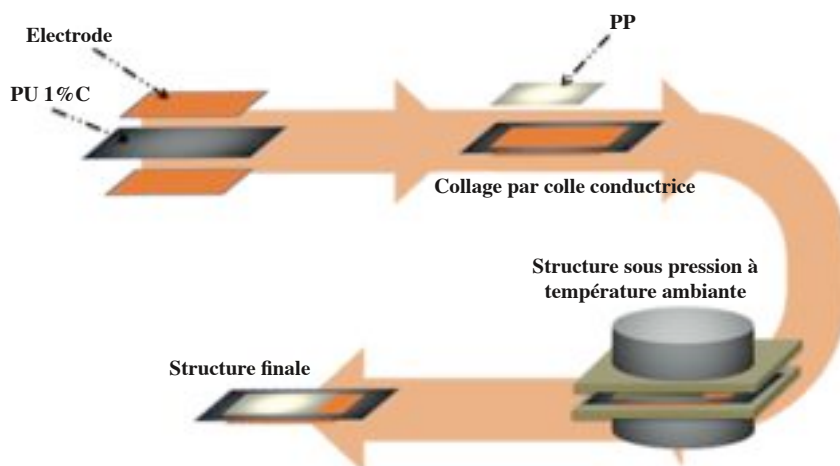


Figure 12 : Processus de fabrication de la nouvelle structure (PU 1% C+PP)

Le tableau 7 récapitule les résultats de mesure des paramètres intrinsèques des deux films pour une fréquence de 1Hz. La permittivité diélectrique a été mesurée à travers un Solartron 1255 et le module de Young des films a été évalué à l'aide d'une table de Newport.

Tableau 7 : Propriétés des polymères utilisés (PU 1% C ; PP)

Matériaux	Permittivité	Module de Young	Epaisseur	Surface
	ϵ_r	Y(MPa)	$e(\mu\text{m})$	$A(\text{cm}^2)$
Polyuréthane 1% C	15	40	52	6.4
Polypropylene (PP)	2.1	10^3	50	4.8

L'étape de polarisation de la structure obtenue est effectuée par la méthode de décharge par effet corona qui sera décrite dans le prochain paragraphe.

III.2.2 Description de la méthode de décharge par effet Corona

L'effet corona, appelé aussi effet Couronne, désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à haute tension. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation de l'air elle-même due aux charges électriques de l'air (paires ions positifs - électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par radioactivité naturelle). Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique, ils sont accélérés. Si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent (ionisation par choc). L'électron avec une masse, beaucoup plus faible que celle de l'ion, est fortement accéléré, et entre en collision avec des atomes neutres. Ce qui tend à créer de nouvelles paires électrons/ions positifs, qui suivront le même processus. On

parle d'effet d'avalanche. Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules et ainsi de suite. Le processus prend une allure d'avalanche. Pour qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ électrique ait une valeur suffisante. Dans les conditions normales de l'air cette valeur est voisine de 30 kV/cm et le phénomène évolue jusqu'au claquage de l'intervalle entre les électrodes. Selon la polarité de l'électrode, l'effet corona est dit positif si la polarité est positive, et est dit négatif si cette polarité est négative [Bel2009].

La figure 13 présente la schématisation de l'effet corona avec laquelle la structure est polarisée. Avec une triode corona, les charges électriques sont injectées pendant une durée de 10 min à travers la surface non métallisée de la structure qui a été mise sous une grille inoxydable (la taille du tamis à mailles est de $150 \mu\text{m}$) afin de maintenir un potentiel de surface uniforme. Dans le but d'enquêter sur les performances de stockage de charge et son influence sur les caractéristiques électrostrictifs de la structure, la tension corona a été maintenue à -30 kV et une tension de grille de -4 kV a été employée.

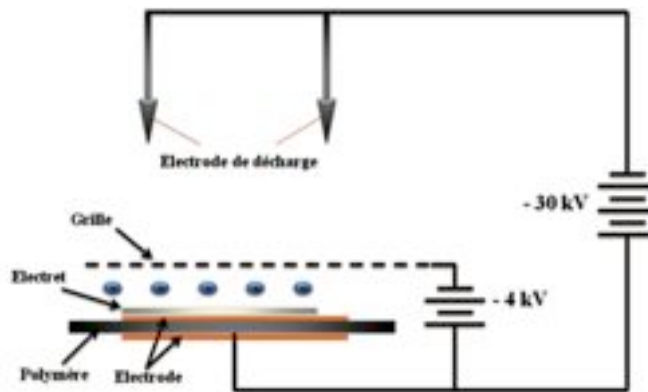


Figure 13 : Principe de polarisation avec effet corona

III.2.3 Evaluation des propriétés diélectriques des films polymères

Les figures 14 et 15 présentent la variation de la permittivité diélectrique et les pertes diélectriques pour les types polymères (*PU 1%C* et *PP*), respectivement. La constante diélectrique des films polymères a été calculée à partir de la capacité et mesurée à l'aide d'un LCR-mètre (HP 4284A). La capacité de ces films a été mesurée sur la gamme de fréquences de $0,1 \text{ Hz}$ à 1 MHz . Une forte diminution de la constante diélectrique a été observée autour de 10 Hz pour le *PU 1%C* lorsque la fréquence augmente. Cette décroissance est due aux pertes des charges d'espace induisant la polarisation interfaciale.

En outre, la contribution de la charge d'espace peut être négligée pour des fréquences supérieures à quelques dizaines de Hertz. Pour le polypropylène cellulaire, la permittivité diélectrique est restée constante dans la gamme de fréquences considérées.

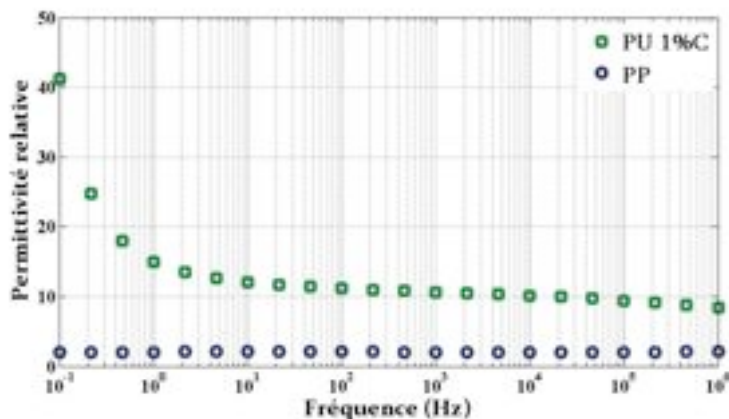


Figure 14 : Permittivité diélectrique en fonction de la fréquence pour un polyuréthane chargé (PU 1%C) et de polypropylène (PP)

La dépendance en fréquence des pertes diélectriques pour le polyuréthane chargé (PU 1%C) et de polypropylène cellulaire (PP) est représenté sur la figure 15. Pour le PU 1%C, le minimum de la perte effective a été observée lorsque la fréquence est augmentée, à partir des valeurs très élevées à la plus basse fréquence (0,1 Hz). Par contre pour le PP, la valeur des pertes diélectriques est relativement faible et constante. Pour la gamme de fréquences considérée (entre 10 Hz et 20 Hz), les pertes sont très faibles et inchangées pour les deux types de polymères (0.003).

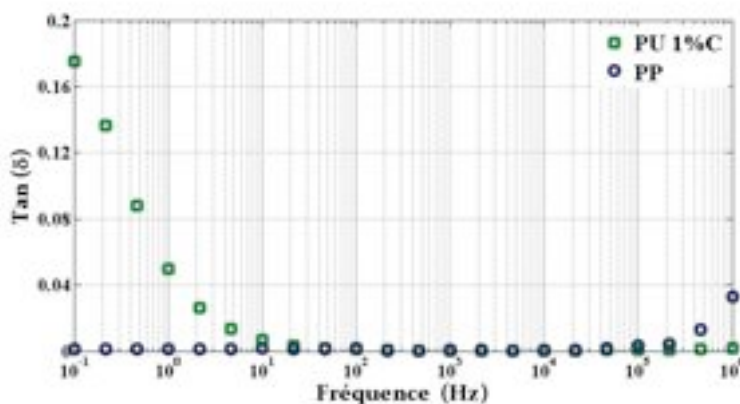
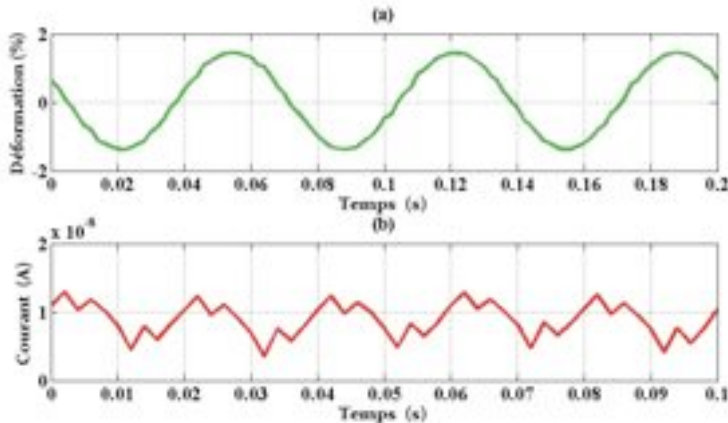


Figure 15 : Pertes diélectriques en fonction de la fréquence pour un polyuréthane chargé (PU 1%C) et de polypropylène (PP)

III.2.4 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus du courant de court circuit et de la puissance récupérée ainsi qu'une comparaison entre les deux structures avec et sans électrets de PP, afin de démontrer le potentiel de la nouvelle structure (PU 1%C + PP) pour l'amélioration de l'efficacité des polymères électrostrictifs dans le domaine de la récupération d'énergie vibratoire.

La figure 16 (a et b) montre la variation de la déformation et le courant récupéré en fonction du temps pour un système hybride constitué d'un film polyuréthane *PU 1%C* avec une épaisseur de $52\mu\text{m}$ et d'un film de polypropylène (*PP*) ayant $50\mu\text{m}$ comme épaisseur. Le champ électrique de polarisation E_{dc} , la déformation mécanique S_1 et la fréquence mécanique ont été fixés à $0.4\text{ V}/\mu\text{m}$, 3% et 15 Hz, respectivement.



**Figure 16 : (a) Déformation en fonction du temps;
(b) Courant de court-circuit en fonction du temps**

Le modèle théorique que nous avons développé précédemment [Guy 2012] permet de démontrer qu'il y avait une dépendance linéaire du courant récupéré I_{cc} par rapport au champ électrique statique E_{dc} et à la déformation S_1 . Pour valider cette théorie par la nouvelle structure, les mesures du courant de court-circuit en fonction du champ électrique statique et de la déformation ont été réalisées, et les résultats sont présentés dans les figures 17 et 18, respectivement. De plus, une comparaison entre la nouvelle structure (*PU1%C + PP*) et l'ancienne (*PU1%C*) a été effectuée afin de montrer l'efficacité de cette structure dans la récupération d'énergie.

En effet, nous pouvons constater bien que par la nouvelle structure, le courant récupéré est augmenté par un facteur sept par rapport à celui de la structure classique. Par exemple, pour obtenir une valeur du courant récupéré de 1.09 nA , il faut appliquer un champ statique de $1.4\text{ V}/\mu\text{m}$ dans le cas de la structure sans électrets, par contre, pour la nouvelle structure, il suffit d'appliquer seulement un champ statique de $0.2\text{ V}/\mu\text{m}$ (figure 17). De même, pour une déformation de $S = 3\%$, nous pouvons obtenir un courant de 10.8 nA par la nouvelle structure au lieu de 1.6 nA par la voie classique.

Ces résultats montrent clairement que l'utilisation des électrets représente une des meilleures solutions pour améliorer la conversion électromécanique des polymères d'électrostriction.

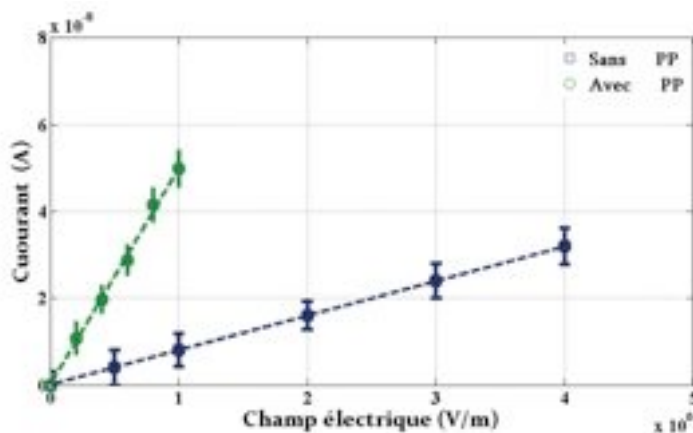


Figure 17 : Courant de court-circuit en fonction du champ à une déformation constante S_1 3% à 15Hz.

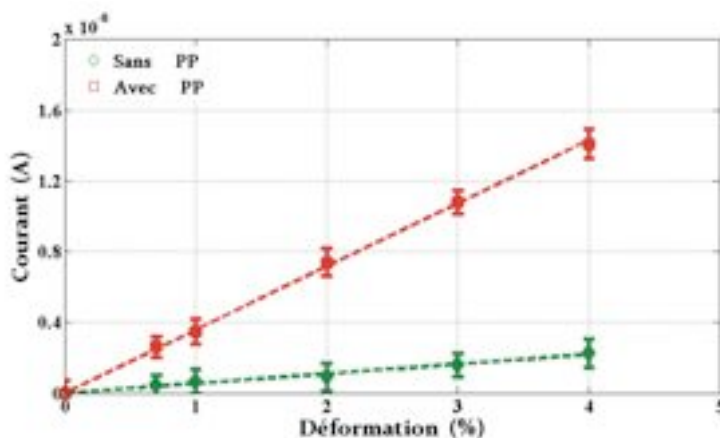


Figure 18 : Courant de court-circuit en fonction de la déformation à 15Hz pour un champ électrique de E_{dc} 0,4V/ μ m

Le prochain essai sera focalisé sur l'étude de la puissance récupérée en fonction de la charge électrique ainsi que la puissance de polarisation dans le but de prévoir le rendement énergétique du film polymère. La figure 19 donne la variation de la puissance récupérée en fonction de la charge électrique pour un champ électrique statique de 0.4 V/ μ m et une déformation de 3% à 15 Hz. La courbe de la puissance récupérée de la structure hybride montre que le transfert de la puissance est maximal pour une résistance adaptée de 60 M Ω avec une valeur de 13.8 nW. Ce résultat a permis de constater que la structure proposée (PU 1%C + PP) contribue à l'augmentation de la puissance de sortie, et donc une amélioration de la conversion électromécanique de polymères électrostrictifs.

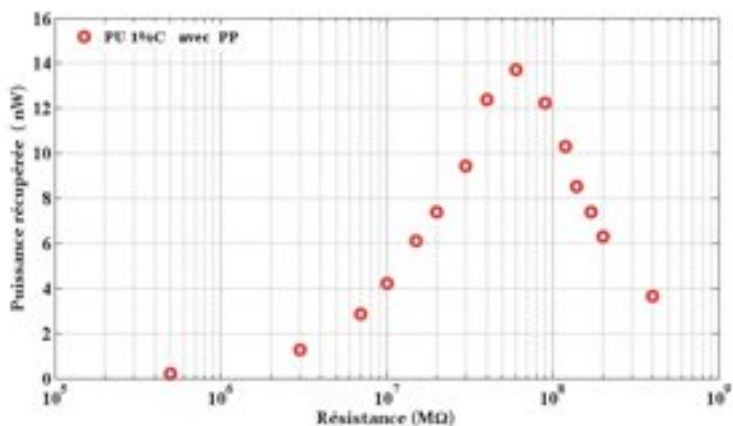


Figure 19 : Puissance récupérée en fonction de la résistance électrique pour un champ électrique statique $E_{dc} = 0.4V/\mu m$ et une déformation transversale $S_1 = 3\%$ à $15Hz$.

Dans ces conditions ($E_{dc} = 0.4 V/\mu m$, $S_1 = 3\%$ et $f = 15 Hz$), il est possible de connaître le rendement énergétique de la structure hybride étudiée afin de démontrer le potentiel de celle-ci dans la récupération d'énergie. Le tableau 8 récapitule les valeurs calculées de la puissance de polarisation, la puissance récupérée ainsi que l'efficacité de la conversion.

Tableau 8 : Bilan énergétique de la structure hybride

Matériau	$P_{Polarisation}$ (nW)	$P_{récupérée}$ (nW)	Efficacité de la conversion (%)
PU 1% C + PP	3.84	13.92	78.14

Les données du tableau montre que l'efficacité de la conversion est positive (78,14%) ce qui traduit que la puissance récoltée est supérieure à celle consommée en travaillant en mode pseudo-piézoélectrique. Cependant, avec la structure classique (PU 1%C) et pour les mêmes valeurs de champ électrique statique ($0,4V/\mu m$), de la déformation (3%) et de la fréquence mécanique (15 Hz), la puissance consommée serait supérieure à celle récupérée, ce qui rend l'efficacité de la conversion négative. Finalement, cette structure hybride permet de diminuer le cout de la polarisation (faible champ électrique injecté) conduisant ainsi à une amélioration du rendement des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie mécanique vibratoire.

IV. Conclusion

Dans ce travail, une étude de l'efficacité des polymères électrostrictifs par l'analyse spectrale FFT ainsi que l'amélioration du rendement de la conversion électromécanique par l'utilisation d'une structure hybride à base des électrets de polypropylène ont été réalisées. La première partie consiste à évaluer les capacités de conversion des polymères d'électrostriction par l'application de la méthode des analyses spectrales FFT. Cette étude a permis d'optimiser les paramètres mécaniques (fréquence mécanique et l'amplitude

de déformation) en gardant les paramètres électriques fixes afin d'avoir une meilleure conversion électromécanique des polymères électrostrictifs. Un modèle analytique a été présenté. Une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et les prédictions théoriques pour chaque essai a été trouvée. Cette étude a montré effectivement l'excellent potentiel de cette technique pour la récupération de l'énergie mécanique ambiante.

Concernant la deuxième partie, une structure hybride basée sur le polyuréthane chargé (*PU* 1%C) et le polypropylène cellulaire (*PP*) a été proposée afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie. Les résultats expérimentaux par la structure hybride ont montré qu'il est possible d'obtenir un courant dynamique plus élevé par un champ électrique statique plus faible par comparaison avec la structure classique. La valeur de l'efficacité de conversion obtenue (*de l'ordre de 80%*) a montré l'excellent potentiel de ces matériaux hybrides pour la récupération de l'énergie électrique à partir des vibrations ambiantes en vue d'alimenter des systèmes portables en autres.

Références :

- [Ami1997] Amirtharajah. R and Chandrakasan. AP, Self-powered low power signal processing. In: IEEE symposium VLSI circuits, digest of technical papers, Kyoto, Japan, 13-15 June, pp. 25-26(1997).
- [Kan2004] Kansal. A, Potter. D and Srivastava. MB, Performance aware tasking for environmentally powered sensor networks, In: Proceeding measurement and modeling of computer systems in joint international conference, vol. 32. pp. 223-234(2004).
- [Men2001] Meninger S, Mur-Miranda J, Lang J, et al., Vibration to electric energy conversion, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration VLSI Systems 9: 64-76(2001).
- [Rah2003] Rahimi M, Shah H, Sukhatme GS, et al., Studying the feasibility of energy harvesting in a mobile sensor network, In: Proceeding IEEE international conference robotics and automation, Taipei, Taiwan, 14-19 September, pp. 19-24(2003).
- [Lal2010] M. Lallart, T. Monnier, D. Guyomar, Structural Health Monitoring, 9 (1) 87-98(2010).
- [Medd2012a] M. Meddad, A. Eddiai, D. Guyomar, S. Belkhiat, A. Cherif, K.Yuse, A. Hajjaji. An Adaptive Prototype Design to Maximize Power Harvesting Using Electrostrictive Polymers. Journal of applied physics, 112, 054109 (2012).
- [Par2005] Paradiso. JA and Starner. T, Energy scavenging for mobile and wireless electronics, IEEE Computer Society 4: 18-27(2005).
- [Ren2007] Ren K, Liu Y, Hofmann HF, et al., An active energy harvesting scheme with an electroactive polymer, Applied Physics Letter 91: 132910(2007).
- [Gui2003] Guillot FM and Balizer E, Electrostrictive effect in Polyurethanes, Journal of Applied Polymer Science 89: 399-404(2003).
- [Edd2012a] A. Eddiai, M. Meddad, S. Touhtouh, A. Hajjaji, Y. Boughaleb, D. Guyomar, S. Belkhiat, B. Sahraoui. The Mechanical Characterization an Electrostrictive Polymer for Actuation and Energy Harvesting. Journal of applied physics, 111, 124115 (2012).

[Medd2012b] M. Meddad, A. Eddiai, D. Guyomar, S. Belkhiat, A. Hajjaji, A. Cherif, Y. Boughaleb. Study of the Behaviour of Electrostrictive Polymers for Energy Harvesting with FFT Analysis. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 14, pp. 55-60 (2012).

[Liu1998] Liu R, Zhang Q and Cross LE, Experimental investigation of electrostrictive polarization biased direct apparent piezoelectric properties in polyurethane elastomer under quasistatic conditions. *Journal of Applied Polymer Science* 73: 2603-2609(1998).

[Edd2012b] A. Eddiai, M. Meddad, A. Hajjaji, Y. Boughaleb, D. Guyomar, K.Yuse, B. Sahraoui. Enhancement of Electrostrictive Polymer Efficiency for Energy Harvesting with Cellular Polypropylene Electrets. *Synthetic Metal*, Vol. 162, pp. 1948-1953 (2012).

[Medd2012b] M. Meddad, A. Eddiai, D. Guyomar, S. Belkhiat, A. Hajjaji, A. Cherif, Y. Boughaleb. Study of the Behaviour of Electrostrictive Polymers for Energy Harvesting with FFT Analysis. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 14, pp. 55-60 (2012).

[Liu2004] Liu Y, Ren K, Hofmann H. F, et al., Electrostrictive polymer for mechanical energy harvesting, In: *Proceedings SPIE, International Society for Optics and Photonics*, vol. 5385. pp. 17-28(2004).

[Leb2009] Lebrun S, Guyomar D, Guiffard B, et al., The characterization of the harvesting capabilities of an electrostrictive polymer composite. *Sensors and Actuators A-Physical* 153: 251-257(2009).

[Medd2012c] M. Meddad, A. Eddiai, D. Guyomar, S. Belkhiat, A. Hajjaji, K.Yuse, Y. Boughaleb. 'Evaluation by Fast Fourier Transforms Analysis of Energy Harvesting in Electrostrictive Polymers Driven by an Electrical Field and a Mechanical Excitation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(4) 411-420 (2012).

[Guy2011a] Guyomar D, Cottinet P-J, Lebrun L, et al., Characterization of an electroactive polymer simultaneously driven by an electrical field and a mechanical excitation: an easy means of measuring the dielectric constant, the Young modulus and the electrostrictive coefficients, *Physics Letters A* 375: 1699-1702(2011).

[Edd2013] A. Eddiai, Caractérisation et modélisation des polymères électro-actifs : Application à la récupération d'énergie. Thèse en cotutelle : Faculté des sciences d'El Jadida et INSA de Lyon, 2013.

[Liu2005] Liu Y, Ren K, Hofmann HF, et al., Investigation of electrostrictive polymers for energy harvesting, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control* 52: 2411-2417(2005).

[Fuj2007] S.Fujisaki, H.Ishiwara and Y.Fujisaki. Low-voltage operation of ferroelectric polyvinylidene fluoridetrifluoroethylene copolymer capacitors and metal-ferroelectricinsulator- semiconductor diodes, *Appl. Phys. Lett.* 90, 162902 (2007).

[Eur1999] S. Eury, R. Yimnirun, V. Sundar , P-J. Moses , S-J. Jang, and R.E. Newnhan, Converse electrostriction in polymers and composites. *Mater. Chem. Phys*, vol.61, no.1, pp18-23, (sep.1999).

[Gal2007] G. Gallone, F. Carpi, D. De Rossi, G. Levita, and A. Marchetti, Dielectric constant enhancement in a silicon elastomer filled with lead magnesium niobate-lead titanate, *Mater. Sci. Eng. C*, vol.27 ,no.1, pp110-116, Jan.2007.

[Guy2011b] Daniel Guyomar, Mickael Lallart, Pierre-Jean Cottinet, Electrostrictive conversion enhancement of polymer composites using a nonlinear Approach. *Physics Letters A*, Volume 375, Issue 3, 17 January 2011.

[Kim2008] Kim H, Bedekar V, Adnan-Islam R, et al., Lasermachined piezoelectric cantilevers for mechanical energy harvesting. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control* 55: 1900-1905 (2008).

[Edd2012c] A. Eddiai, M. Meddad, A. Hajjaji, D. Guyomar, Y. Boughaleb, B. Sahraoui. Mechanical Effect on the Performance of Electrostrictive Polymers for Energy Harvesting. 10.1109/ICTON. 2012.6253823, Xplore. IEEE.org (2012).

[Guy2009] D. Guyomar, L. Lebrun, C. Putson, P.-J. Cottinet, B. Guiffard, S. Muensit, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 014910.

[Zha2004] Q. M. Zhang, J. Scheinbeim, In *Electroactive Polymer [EAP] Actuators as Artificial Muscles*, Bar-Cohen Y, Ed., SPIE press: Bellingham, (2004) 95-100.

[Zha1997] Q. M. Zhang, J. Su, C. H. Kim, R. Ting, R. Capps, An experimental investigation of electromechanical responses in a polyurethane elastomer, *J. Appl. Phys.* 81(1997) 2770.

[Mic1987] F. Micheron, *Electrets, Techniques de l'ingénieur*, 1987.

[Egu1925] M Eguchi, On the Permanent Electret, *Philosophical Magazine*, vol. 49, pp.178, 1925.

[Ike1981] K. Ikezaki, M. Miki et J.-I. Tamura, Thermally Stimulated Currents from Ion-Injected Teflon-FEP Film Electrets, *Japanese Journal of Applied Physics*, 20, pp.1741-1747, 1981.

[Bel2009] R. Belouadah, 'Automatisation du banc de polarisation des films PVDF et caractérisation du Matériau obtenu'. Thèse INSA de Lyon, Laboratoire LGEF, 2009.

CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT ET A LA REALISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES

Pr. Mohammed ADDOU

Université Ibn Tofail - Kénitra, Maroc



Résumé

Les matériaux organiques ont connu au début des années 70, une révolution technologique qui a bouleversé des applications dans le domaine d'électronique. Dans les années 2000, les propriétés conductrices des molécules ou des polymères ont révélé de nombreuses avancées technologiques. La technologie des cellules solaires organiques est certainement l'une des plus prometteuses. Si le silicium et les matériaux inorganiques restent les filières les plus utilisées pour la fabrication des cellules photovoltaïques, les cellules solaires organiques présentent un réel avantage : faible coût de fabrication, faible impact environnemental, possibilité de mise en forme...

Cependant, si aujourd'hui les rendements des cellules organiques obtenus aux laboratoires sont loin de concurrencer les cellules solaires inorganiques, de nombreuses recherches sur les cellules photovoltaïques dans les plus grands laboratoires dans le monde ont permis dans une dizaine d'années d'atteindre rapidement un rendement record de 11%, rendant cette filière parfaitement prometteuse. Les recherches actuelles sont focalisées sur le conducteur transparent, la couche active et l'interface organique/inorganique.

Notre contribution portera essentiellement sur l'optimisation des interfaces entre les électrodes et les matériaux actifs (donneurs et accepteurs des électrons), par le biais des couches tampons bloqueuse des excitons et des électrons d'une part et sur les conducteurs transparents (oxydes ou multicouches...), en substituant l'ITO d'autre part.

Les cellules photovoltaïques organiques ont connu le meilleur taux de croissance parmi les différentes filières photovoltaïque durant les 12 dernières années. Les dernières avancées dans le domaine: **12% (taille 1.1 cm²) Heliatek Janvier 2013**. Heliatek est un des leaders dans la technologie mondiale de développement et de production de films organiques solaires à base de petites molécules, par dépôt sous vide dans un processus de roll-to-roll à basse température. Des applications importantes dans l'industrie des matériaux de construction, l'industrie automobile et la gamme légère de systèmes d'ombrage et de mobilier urbain qui intégreront ces films solaires développer en tant que des producteurs d'énergie et des composants.

Les performances des cellules solaires organiques dépendent de nombreux paramètres liés aux matériaux organiques utilisés tels que l'absorption, le transport de charge, la longueur de diffusion excitonique, et aux interfaces matériaux organique/électrode tels que la nature des OTC, l'optimisation des épaisseurs, l'utilisation des couches tampons. Nous allons voir dans la suite les processus d'amélioration du rendement photovoltaïque organique en se basant sur le choix, l'élaboration et la caractérisation des OTC, des couches tampons et des couches actives :

1. Au niveau des couches tampons

a- Avec une couche active Oligothiophène/C60

Dans cette partie, plusieurs couches tampons ont été utilisées : MoO₃, CuI et la double couche MoO₃/CuI. La croissance, la densité optique et la rugosité de surface ainsi que la conductivité de la couche active dépendent fortement de la couche tampon utilisée. L'amélioration des performances des cellules en fonction de la nature de la couche tampon, et les meilleurs résultats sont obtenus avec la double couche MoO₃/CuI et ceci par l'augmentation de courant de court circuit J_{sc} et la tension de circuit ouvert. Cette amélioration est due grâce aux avantages des deux couches : le MoO₃ assure un ajustement des bandes d'énergie entre le donneur des électrons et l'anode, et le CuI qui augmente la mobilité des charges et la conductivité du donneur utilisé en agissant sur l'orientation de la croissance de la couche active (donneur). (Eur. Phys. J. Appl. Phys., 2012). La couche active est d'un Oligothiophène comme donneur et le C60 comme couche accepteuse.

b- Avec une couche active thienylenevinylene triphénylamine/C60

Le choix de la couche active et en particulier la couche donneuse d'électrons a un effet important sur le rendement des cellules solaires organiques. L'effet de CuI, comme couche tampon, sur l'efficacité des cellules solaires organiques réalisées à base d'un thienylenevinylene triphénylamine, utilisé comme donneur des électrons, est important. Cette amélioration est aussi importante quand il est associé à l'oxyde de molybdène. Le vieillissement des cellules est aussi testé, et a montré que le MoO₃ augmente la durée de vie des cellules, quand il est associé également à CuI. (Solar Energy Materials, 2012)

2. Au niveau des conducteurs transparents (Anodes)

Des couches type oxyde/métal/oxyde pour la substitution de l'ITO ont été élaborées et caractérisées. Les couches a structure MoO₃/Ag/MoO₃ avec des épaisseurs respectives de 20nm, 10nm et 35nm sont utilisées comme anode des cellules solaires organiques MoO₃/Ag/MoO₃/CuPc/C60/Alq₃/Al. Ces structure possèdent une transmission dans le domaine de visible allant jusqu'à 72%, avec des résistances carrées de 3.5w/sq.

L'introduction d'une couche tampon de CuI (3nm), entre l'anode et le CuPc, a amélioré les propriétés optiques de CuPc par le templating de ces molécules. (Appl. Phys. Lett. 101, 233-307, 2012)

3. Couches actives à base de polymères

Une nouvelle série de polymère a base de monomères d'anilines a été synthétisée. Leurs propriétés physicochimiques et électrochimiques ont été déterminées. Ces polymères sont caractérisés par les techniques RMN, IR, et voltamétrie cyclique. La croissance de ces polymères se fait suivant le groupement de l'aniline et pas suivant celui de thiophènes comme il est prédit. Les caractérisations optiques et électriques ont montré que les polymères possèdent des propriétés optique et électrique, qui leurs permettront des éventuelles utilisations comme des donneurs des électrons dans les cellules solaires organiques. (Int. J. Electrochem. Sci., 7 (2012) 9502-9517)

Couches Tandem

Les bandes interdites des donneurs et la couche interfaciale entre l'accepteur de la première cellule et le donneur de la seconde cellule ont un effet important sur l'efficacité des cellules tandem.

ECOLE DOCTORALE DE MARSEILLE

Pr. Mossadek TALBY

*Directeur de l'Ecole Doctorale, Université Aix-Marseille,
Marseille, France*



Résumé

La formation doctorale en France est organisée au sein des écoles doctorales dont le rôle, le fonctionnement et les prérogatives sont décrits dans un arrêté du ministère français de l'enseignement supérieur et de la recherche en date du 7 août 2006.

Dans l'Université d'Aix-Marseille (AMU), la formation doctorale est organisée au sein de 12 écoles doctorales (ED) qui couvrent un large spectre de grands domaines de formation par la recherche, et regroupent plus de 4000 doctorants en cours de thèse dans plus de 250 unités de recherche, représentant plus de 4000 chercheurs et enseignants-chercheurs et un flux annuel de près de 600 thèses. Ces 12 ED sont rassemblées dans un collège doctoral qui a comme objectifs principaux, la mutualisation et l'organisation des formations non disciplinaires des doctorants, leur insertion professionnelle par une sensibilisation accrue au monde de l'entreprise et la contribution à l'accroissement de l'attractivité des offres de formations des ED en développant une politique internationale propre qui favorise en particulier les thèses en cotutelle.

Parmi les 12 ED d'AMU, L'ED «Physique et Sciences de la Matière» (ED 352) regroupe près de 250 doctorants en cours de thèse, travaillant sur des thématiques de recherche en physique fondamentale et appliquée. La majorité de ces doctorants préparent leurs thèses au sein de laboratoires ou d'équipes rattachées à l'ED 352. Les domaines de recherche couverts par ces laboratoires sont l'astrophysique, la cosmologie, la physique des particules, la physique théorique, la physique mathématique, l'optique, la photonique, les plasmas chauds, les lasers et l'interaction rayonnement-matière, la science des matériaux, les nanosciences, l'énergie nucléaire de fission et de fusion, l'instrumentation et la biophysique. Ces laboratoires, qui ont une forte implémentation régionale et participent à

plusieurs pôles de compétitivité, possèdent, dans leurs domaines respectifs, des expertises reconnues au niveau national et international et offrent aux doctorants une formation par la recherche de très haut niveau.

L'exposé décrira la place des ED dans la formation doctorale dans les universités françaises et passera en revue l'organisation et l'offre de formation doctorale au sein de l'Université d'Aix-Marseille en développant en particulier celle de l'ED de physique et sciences de la matière. L'insertion professionnelle des doctorants et le suivi de leur devenir seront évoqués aussi.

Introduction

La formation doctorale en France a été profondément renouvelée dans les années 2000 pour être en phase avec les orientations européennes en rapport avec le processus de Bologne¹ et la mise en place du système LMD (Licence, Master, Doctorat). Les pays Européens engagés dans ce processus² ont confirmé en 2005 le caractère central de la formation doctorale pour l'avancement de la connaissance et ont recommandé la mise en place par les établissements de l'enseignement supérieur, de programmes doctoraux garantissant l'acquisition d'une formation interdisciplinaire et le développement de compétences transférables avec comme objectif de garantir aux doctorants une formation de très haut niveau et une meilleure reconnaissance de leur diplôme tant au plan académique que dans l'industrie ou les services.

Dans cette contribution, l'organisation, le fonctionnement ainsi que l'offre de formation doctorale, en France d'abord et à l'Université d'Aix-Marseille ensuite, sont passés en revue avec, en particulier, une mise en exergue de la place des écoles doctorales comme lieux de structuration de l'offre de formation doctorale. Dans le premier paragraphe, sont présentés le rôle, le fonctionnement et les prérogatives d'une école doctorale, ainsi qu'un état des lieux de la formation doctorale en France. L'Université d'Aix-Marseille ainsi que l'offre de formation doctorale de cette université sont présentées dans le deuxième paragraphe. Enfin, dans le troisième paragraphe, l'insertion professionnelle des doctorants est abordée.

I- Formation doctorale en France

Fondée sur les compétences scientifiques avérées des établissements, la formation doctorale en France est organisée au sein d'Ecoles Doctorales (ED) accréditées par le ministère en charge de l'enseignement supérieur et de la recherche. La place des ED et leur rôle dans la structuration et le fonctionnement de la formation doctorale en France est centrale. En effet une ED fédère, sur un site donné, des forces scientifiques de qualité dans un ensemble cohérent de thématiques. Elle organise la formation des docteurs et les prépare à leur insertion professionnelle. La formation des doctorants s'effectue au

1. Le processus de Bologne (www.europe-education-formation.fr/docs/Broch.Bologna_FR.pdf), lancé en 1999 par les ministres européens de l'enseignement supérieurs, a pour objectif la construction de l'espace européen de l'enseignement supérieur.

2. Albanie, Allemagne, Arménie, Autriche, Azerbaïdjan, Belgique, Bosnie-Herzégovine, Bulgarie, Croatie, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Géorgie, Grèce, Hongrie, Islande, Irlande, Italie, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Luxembourg, Malte, Moldavie, Monténégro, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Principauté d'Andorre, République Slovaque, République tchèque, ex-République yougoslave de Macédoine, Roumanie, Royaume-Uni, Russie, Saint Siège, Serbie, Slovénie, Suède, Suisse, Turquie, Ukraine.

sein de laboratoires ou d'équipes d'accueil rattachés à l'ED et reconnues pour la qualité de leurs recherches. Elle consiste en une formation par la recherche, à la recherche et à l'innovation, qui peut être accomplie en formation initiale ou continue. Elle est d'une durée de 3 ans après l'obtention du diplôme national de master. Elle constitue une expérience professionnelle de recherche, sanctionnée, après soutenance de thèse, par l'attribution du grade de docteur.

I-1- Ecoles Doctorales (mise en place du dispositif)

La mise en place de l'ED en France comme dispositif de formation doctorale avait dès le départ deux objectifs :

1. Promouvoir l'excellence de la formation doctorale au sein d'équipes d'accueil des doctorants, reconnues par la qualité de leurs recherches et confier la formation des doctorants à des chercheurs expérimentés, titulaire d'une habilitation à diriger des recherches.
2. Préparer l'insertion professionnelle des docteurs par des formations transversales sur l'entreprise, la communication, la valorisation, les langues étrangères, ... etc, ainsi que par l'organisation de séminaires spécialisés avec les entreprises, et la mise en place de dispositifs personnalisés de type Bilan des compétences professionnelles acquises pendant la thèse.

Ultérieurement, le dispositif s'est avéré aussi être un moyen de faire de la restructuration:

- Structuration des équipes de recherche sur un site,
- Structuration d'un domaine de recherche.

I-2- Finalisation du dispositif (*Arrêté du 7 août 2006 relatif à la formation doctorale*³)

Les premières ED en France ont été créées dès 1992. Mais la finalisation et la généralisation en France du dispositif de formation doctorale qu'est l'ED n'a été achevée que 14 ans plus tard avec la publication le 7 août 2006 par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche d'un arrêté relatif à la formation doctorale. Cet arrêté, composé de 25 articles, se caractérise par quatre orientations majeures:

- Confirmation des ED comme lieux de structuration de l'offre de formation doctorale, contribuant à sa visibilité et à son attractivité au plan national, européen et international.
- Accréditation par l'Etat des ED après évaluation par l'agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (A.E.R.E.S.). L'accréditation définit les champs scientifiques de compétence de l'ED et permet l'inscription des doctorants ainsi que la délivrance du doctorat.
- Reconnaissance de la formation doctorale comme une "expérience professionnelle de recherche". Le doctorant n'est plus considéré comme un étudiant mais comme un chercheur en formation.
- Possibilité donnée à l'ensemble des établissements d'enseignement supérieur de participer à la formation doctorale dès lors qu'a été démontrée, dans le cadre d'une évaluation nationale, leur capacité à apporter une contribution significative à l'animation scientifique et pédagogique d'une ED.

3. http://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?cidTexte=JORFTEXT000000267752

I-3- Dispositif d'accompagnement

A côté de l'arrêté du 7 août 2006 relatif à la formation doctorale, deux dispositifs permettent d'accompagner le doctorant au cours de sa formation : la charte des thèses et le contrat doctoral.

1. La charte des thèses⁴ est un dispositif qui a été mis en place bien avant la création des ED. Il permet aux doctorants de préparer et de soutenir leur thèse dans les meilleures conditions. C'est un contrat moral conclu entre le doctorant, son directeur de thèse, le directeur de l'ED et le directeur du laboratoire d'accueil. La charte des thèses définit et précise :
 - Les principes et les conditions du déroulement de la formation doctorale,
 - Les délais impartis, la nécessaire coordination entre le doctorant, son directeur de thèse, le directeur du laboratoire d'accueil et le directeur de l'ED,
 - Les objectifs à atteindre et les moyens à mettre en œuvre en termes de formation et de préparation à l'insertion professionnelle du futur docteur.
2. Le contrat doctoral⁵ confère à la formation doctorale un cadre juridique indépendamment du financement de thèse. C'est un contrat de travail à durée déterminée (3 ans). Il définit la formation comme étant à temps plein avec la possibilité de consacrer 1/6^{ème} du temps à des activités complémentaires (enseignement, missions en entreprise ou collectivités publiques, valorisation de la recherche, ... etc).

I-4- Ecole Doctorales (état des lieux⁶)

Aujourd'hui, il existe en France 286 ED pour 81 universités. Ces ED couvrent tous les champs disciplinaires en sciences exactes, en sciences du vivant et en sciences humaines et sociales. Les champs disciplinaires formant ces trois grands domaines de recherche académique sont :

- En sciences exactes :
 - Les mathématiques et leurs interactions
 - Les sciences et technologies de l'information et de la communication
 - Les sciences pour l'ingénieur
 - La physique
 - La chimie
 - Les sciences de la terre et de l'univers, espace.
- En sciences du vivant :
 - La biologie, médecine et santé
 - Les sciences agronomiques et écologiques.
- En sciences humaines et sociales :
 - Les sciences humaines et humanités
 - Les sciences de la société

4. Arrêté du 3 septembre 1998 relatif à la charte des thèses : http://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?cidTexte=JORFTEXT000000557891.

5. Décret du 23 avril 2009 : http://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?cidTexte=JORFTEXT000020552499.

6. Source : MESR - DGESIP/DGRI - SIES - Enquête «Écoles doctorales» - Données 2011-2012.

Le nombre total de doctorants inscrits en France dans les 286 ED au cours de l'année 2011-2012 est de près de 80.000 dont 46.5% sont des femmes. Chaque année, il y a plus de 18.000 nouveaux inscrits dont environ 20% possèdent un diplôme étranger de Master ou équivalent. Le nombre de thèses soutenues par an est de plus de 14.000. Le tableau 1 résume, par grand domaine de recherche académique, la répartition en pourcentage pour l'année 2011-2012 des doctorants inscrits en 1^{ère} année de thèse, des doctorants toutes années confondues et des thèses soutenues en France.

Comme on peut le constater, la moitié des doctorants en France préparent leur thèse dans le domaine des sciences humaines et sociales (SHS). Cependant, la part des thèses soutenues dans ce domaine par rapport au nombre total des thèses soutenues chaque année en France est de 36% seulement. Ceci s'explique par la durée plus longue des thèses dans le domaine SHS comparativement aux deux autres grands domaines de recherche académique. En effet, comme le montre le tableau 2, près des deux tiers des thèses en SHS durent plus de 52 mois, alors que dans les domaines des sciences exactes et des sciences du vivants 90% des thèses se font en moins de 52 mois.

	Nouveaux inscrits	Tous les doctorants	Flux de thèses
Sciences exactes	37.5%	34.4%	43.6%
Sciences du vivant	16.1%	15%	20.2%
Sciences humaines et sociales	46.4%	50.6%	36.2%

Tableau 1. Pourcentage des doctorants en 1^{ère} année de thèse, de doctorants toutes années confondues et des thèses soutenues dans les trois grands domaines de recherche académique en France (données 2011-2012).

	< 40 mois	[40, 52] mois	[52, 72] mois	> 6 ans
Sciences Exactes	55.7%	34.6%	8.7%	1%
Sciences du Vivant	41.2%	49.1%	8.5%	1.2%
Sciences Humaines et Sociales	13.%	20.1%	33.4%	33.6%

Tableau 2. Pourcentage des durées des thèses dans les trois grands domaines de recherche académique en France (données 2011-2012).

La part d'étudiants étrangers parmi les 80.000 doctorants inscrits en France est supérieure à 40% et la part des thèses en cotutelles⁷ est de l'ordre de 9%.

Le taux de financement des thèses en France est globalement de 65%. Les 35% restant sont pour environ 20% des doctorants salariés et pour 15% des doctorants sans aucun

7. La cotutelle internationale de thèse vise à conforter la dimension internationale des écoles doctorales. Les règles et principes régissant la cotutelle internationale de thèse sont décrits dans un arrêté en date du 6 janvier 2005, disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?c idTexte=JORFTEXT000000258089.

financement. L'écrasante majorité des doctorants de cette dernière catégorie prépare leur thèse dans le domaine SHS. Les principales sources de financement et la part de ces sources dans le financement globale des thèses en France sont :

- Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche: 32.5%
- Organismes de recherche (CNRS, INSERM, INRA, INRIA, CEA, ...etc): 10.9%
- Collectivités locales: 8.3%
- Contrats CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche): 9.9%
- Allocations entreprises + associations: 5.2%
- Contrats de recherche: 5%
- Allocations autres ministères et établissements d'enseignement sup.: 4.4%
- Contrats ANR + autres: 6.8%
- Financements pour doctorants étrangers: 16.9%

II- Aix-Marseille Université

Issue de la fusion, le 1^{er} janvier 2012, des Universités d'Aix-Marseille I (Université de Provence), Aix-Marseille II (Université de la Méditerranée) et Aix-Marseille III (Université Paul Cézanne), Aix-Marseille Université⁸ est une grande Université française et du monde francophone. Elle regroupe 5 grands secteurs disciplinaires structurés en 21 composantes :

- Secteur arts, lettres, langues et sciences humaines
- Secteur droit et sciences politiques
- Secteur économie et gestion
- Secteur santé
- Secteur sciences et technologies

Aix-Marseille Université compte près de 71.000 étudiants, dont 10.000 étudiants internationaux, 7.500 personnels, enseignants-chercheurs, enseignants, ingénieurs, techniciens et administratifs, 12 écoles doctorales et près de 4.000 doctorants. Aix-Marseille Université est composée de 132 structures de recherche - 118 unités de recherche et 14 structures fédératives - en lien avec les plus grands organismes de recherche (CNRS, INSERM, IRD, INRA, CEA).

L'offre de formation y est vaste, pluridisciplinaire et interdisciplinaire, avec 38 mentions de licence, 80 spécialités de licence professionnelle, 76 mentions de master, 4 diplômes d'Etat de santé, 2 diplômes d'ingénieurs, 23 DUT, 428 diplômes d'Université et 57 mentions de doctorats. A coté de cette offre de formation large et diversifiée, Aix-Marseille Université a une politique internationale valorisante et dynamique avec 429 partenaires ERASMUS, 25 diplômes en partenariat international dont 10 programmes ERASMUS Mundus et 319 accords de coopération internationale.

Aix-Marseille Université fait aussi partie des 8 sites Universitaires d'excellence français reconnus et sélectionnés par un jury international dans le cadre de l'Initiative d'Excellence (IDEX), projet national destiné à faire émerger en France des pôles d'excellence d'enseignement supérieur et de recherche scientifique.

8. <http://www.univ-amu.fr/>

II-1- Formation doctorale à Aix-Marseille Université

La formation doctorale à Aix-Marseille Université est organisée au sein de 12 ED couvrant tous les champs disciplinaires des trois grands domaines de recherche académique en France : sciences exactes, sciences du vivant et sciences humaines et sociales. Les 12 ED sont organisées en Collège Doctoral qui joue un rôle fédérateur entre les ED et qui a comme objectifs principaux, la mutualisation et l'organisation des formations non disciplinaires des doctorants, la promotion des thèses aux interfaces des domaines couverts par les ED, l'insertion professionnelle des doctorants par une sensibilisation au monde de l'entreprise et monde socioéconomique en général.

Le nombre total de doctorants inscrits en 2011-2012 dans les 12 ED d'Aix-Marseille Université est de plus de 3.800 dont près de 49% (46.5% au niveau national) sont des femmes. Ces doctorants préparent leur thèse dans plus de 120 unités de recherche sous la direction de plus de 2.400 chercheurs et enseignants-chercheurs habilités à diriger des recherches (HDR). Chaque année, il y a plus de 800 nouveaux doctorants inscrits dont environ 17% (20% au niveau national) possèdent un diplôme étranger de Master ou équivalent. Le flux annuel de thèses est de plus de 650.

La répartition par ED du nombre total de doctorants inscrits en 2011-2012 à Aix-Marseille Université est présentée dans le tableau 3.

	ED	Domaine de formation	Doctorants inscrits
Sciences Exactes	184	Mathématiques et informatique	178
	352	Physique et sciences de la matière	288
	353	Sciences pour l'ingénieur	204
	250	Sciences chimiques	134
Sciences du vivant	62	Sciences de la vie et de la santé	660
Sciences humaines et sociales	67	Sciences juridiques et politiques	723
	354	Langues, lettres et arts	145
	355	Espaces, cultures et sociétés	492
	356	Cognition, langage, éducation	371
	372	Sciences économiques et de gestion	294
Pluridisciplinaire	251	Sciences de l'environnement	234
	463	Sciences du Mouvement Humain	97

Tableau 3 : Répartition par ED du nombre total de doctorants inscrits à Aix-Marseille Université (données 2011-2012).

La répartition en pourcentage pour l'année 2011-2012 des doctorants inscrits en 1^{ère} année de thèse, des doctorants toutes années confondues et des thèses soutenues dans les trois grands domaines de recherche académique à Aix-Marseille Université est représentée dans le tableau 4.

	Nouveaux inscrits	Tous les doctorants	Flux de thèses
Sciences exactes	29.1%	25.3%	28.8%
Sciences du vivant	20.6%	21%	29.2%
Sciences humaines et sociales	50.3%	53.7%	42%

Tableau 4. Pourcentage des doctorants en 1^{ère} année de thèse, de doctorants toutes années confondues et de thèse soutenues dans les trois grands domaines de recherche académique à Aix-Marseille Université (données 2011-2012).

Comme on peut le constater, plus de la moitié des doctorants (50.6% au niveau national) préparent leur thèse dans le domaine des sciences humaines et sociales. On constate cependant, comme au niveau national, que la durée des thèses dans ce domaine est bien plus longue que dans les deux autres grands domaines de recherche. En effet, comme le montre le tableau 5, près des deux tiers des thèses en sciences humaines et sociales durent plus de 52 mois comme au niveau national, alors que près de 90% des thèses dans les domaines des sciences exactes et près de 85% des thèses en sciences du vivant se font en moins de 52 mois.

	< 40 mois	[40, 52] mois	[52, 72] mois	> 6 ans
Sciences exactes	55.1%	34.1%	9.6%	1.2%
Sciences du vivant	35.6%	48.8%	13.7%	1.9%
Sciences humaines et sociales	10.8%	21.7%	37.2%	30.3%

Tableau 5. Pourcentage des durées des thèses dans les trois grands domaines de recherche académique à Aix-Marseille Université (données 2011-2012).

La part d'étudiants étrangers parmi les doctorants inscrits à Aix-Marseille Université est supérieure à 33% (>40% au niveau national). La part des cotutelles et de l'ordre de 7% (9% au niveau national).

Le taux global de financement des thèses à Aix-Marseille Université est de 61% (65% au niveau national). 16% des doctorants (20% au niveau national) sont salariés et 23% (15% au niveau national) n'ont aucun financement. Comme au niveau national, l'écrasante majorité des doctorants de cette dernière catégorie se trouve dans le domaine des sciences humaines et sociales.

Les sources de financement des thèses sont les mêmes qu'au niveau national et la part de ces sources dans le financement globale est comparable.

A côté de la formation des doctorants par la recherche et à la recherche, deux types de formations sont proposées aux doctorants au cours de la thèse (contrat individuel de formation):

- Formations disciplinaires organisées par chaque ED.
- Formations transversales organisées par le Collège doctoral.

L'objectif de ces formations transversales est d'élargir le champ de compétences du doctorant vers l'interdisciplinarité et préparer son insertion professionnelle, y compris et surtout hors du champ de la recherche académique.

Parmi les outils mis en place par le Collège Doctoral au service de la professionnalisation des doctorants, il y a :

- Les doctoriales: Séminaires de sensibilisation et d'initiation au monde des entreprises. Lieu de rencontre entre acteurs économiques et doctorants pour favoriser la prise de conscience, par les doctorants, de l'importance de leur projet personnel et professionnel.
- Les formations spécifiques: communication, conduite de projet, ... etc, destinées à aider les doctorants à préparer leur avenir professionnel et à valoriser leur formation.
- La valorisation des compétences: prépare le doctorant à la démarche de recherche d'emploi. Identification des compétences multiples mises en œuvre au cours de la thèse et leur valorisation dans des situations professionnelles diversifiées.

Il existe aussi d'autres formations proposées aux doctorants dans le cadre du contrat doctoral. Ces formations sont:

- Service d'enseignement (futurs enseignants-chercheurs)
- Mission de conseil ou d'expertise pour les entreprises ou les collectivités publiques (doctorants-conseil)
- Mission de diffusion de l'information scientifique et technique ou de valorisation de la recherche.

II-2- Ecole Doctorale 352 (Physique et Sciences de la Matière)

Pour donner un aperçu sur l'organisation et le fonctionnement des ED d'Aix-Marseille Université, l'ED 352⁹ (Physique et Sciences de la Matière) est choisie comme exemple. Cette ED regroupe les doctorants de l'Université d'Aix-Marseille (AMU) et de l'Ecole Centrale de Marseille (ECM) travaillant sur des thématiques de recherche en physique fondamentale et appliquée. Elle rassemble 10 laboratoires¹⁰ (Unités mixtes de recherche), 4 équipes du CEA Cadarache et d'une équipe du Laboratoire d'Instrumentation et Sciences Analytiques (LISA), ce qui représente au total 68 équipes de recherche et 440

9. <http://ed352.sciences.univmed.fr/>

10. Centre Interdisciplinaire de Nanosciences de Marseille (CINaM) : <http://www.cinam.univ-mrs.fr/cinam/> Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM) : <http://marwww.in2p3.fr/>

Centre de Physique Théorique (CPT) : <http://www.cpt.univ-mrs.fr/>

Institut Fresnel : <http://www.fresnel.fr/>

Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence (IM2NP) : <http://www.im2np.fr/>

Laboratoire Adhésion cellulaire et Inflammation (LAI) : <http://lai.sciences.univmed.fr/>

Laboratoire d'Astronomie de Marseille (LAM) : <http://lam.oamp.fr/>

Lasers Plasmas et Procédés Photoniques (LP3) : <http://www.lp3.univ-mrs.fr/>

Matériaux Divisés, Interfaces, Réactivité, Electrochimie (MADIREL) : <http://www.lc-provence.fr/madirel/>

Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM) : <http://sites.univ-provence.fr/piim/>

chercheurs et enseignants-chercheurs dont 290 HDR. L'ED 352 couvre un large spectre de thématiques en physique fondamentale et appliquée: Astrophysique, Cosmologie, Physique des particules, Physique théorique, Physique mathématique, Optique, Photonique et traitement d'image, Plasmas chauds, Lasers et interaction rayonnement-matière, Science des matériaux, Nanosciences, Energie nucléaire de fission et de fusion, Instrumentation et Biophysique.

Le nombre de doctorants inscrits en 2011-2012 à l'ED 352 était de 288 dont 14% en cotutelle.

Le taux de financement des thèses y est de 100%, la durée moyenne des thèses est de 38 mois et le nombre annuel moyen des thèses soutenues au cours des 6 dernières années est supérieur à 60.

L'ED 352 est, comme toute ED, dirigée par un directeur assisté d'un conseil. L'ED 352 est dotée aussi d'un secrétariat et d'un bureau¹¹ émanant du conseil. Le conseil de l'ED pour le quinquennal 2012-2017 est composé de 26 membres plus un invité permanent :

- 2 représentants des établissements (AMU, ECM),
- 10 directeurs de laboratoires,
- 5 doctorants (élus par leurs pairs),
- 1 représentant IATOS,
- 4 personnalités compétentes (PC) dans les domaines scientifiques,
- 4 PC du secteur industriel et socio économique concernés,
- Invité permanent: directeur du collège doctoral,

Le conseil se réunit 4 fois par an pour :

- l'attribution du Prix de thèse de l'ED (5 Prix maximum par an) et faire le bilan du devenir et de l'insertion professionnelle des doctorants (mars),
- le recrutement des doctorants et l'attribution des contrats doctoraux d'Aix-Marseille Université (juillet),
- faire le bilan des inscriptions en thèse et le traitement des demandes de soutenance au-delà de la fin du contrat de thèse et des demandes dérogatoires d'inscription en 4^{ème} année (septembre),
- le rapport d'activité de l'ED et le bilan des inscriptions, des soutenances de thèse et de la formation doctorale (décembre).

L'ED 352 organise aussi deux réunions avec les doctorants :

- Réunion de rentrée (en automne) pour l'accueil et l'information des primo-entrants,
- Journées scientifiques de l'ED (2 jours au printemps) pour les échanges scientifiques et intellectuels entre doctorants sous forme de présentations orales ou de poster. Lors de ces journées, une cérémonie est organisée pour l'attribution des prix des thèses de l'ED. Deux conférenciers sont aussi invités pour parler des deux sujets de physique qui ont fait l'actualité au cours de l'année.

11. Cellule de 7 membres dont le rôle est de préparer les réunions du conseil (agenda + dossiers à traiter), discuter des affaires courantes de l'ED et auditionner les candidats aux Contrats Doctoraux d'Aix-Marseille Université.

L'ED organise aussi un suivi régulier des doctorants grâce à l'entretien individuel de chaque doctorant avec le directeur de l'ED au moins une fois par an, à l'occasion de l'inscription/réinscription en thèse, des journées scientifiques de l'ED et pour l'entretien de fin de thèse.

III- Insertion professionnelle des docteurs

Au niveau national¹², le taux de chômage des docteurs à 3 ans après l'obtention de leur diplôme en France est en moyenne de 10% avec des disparités sectorielles importantes comme le montre la figure 1 qui donne la variation du taux de chômage des docteurs issus de 6 champs disciplinaires en fonction des années d'enquête.

Comme on peut le remarquer, le taux de chômage en SHS, hormis les secteurs droit, économie et gestion (DEG), est presque 3 fois plus élevé qu'en mathématique et physique ou en sciences pour l'ingénieur (SPI) et informatique où le taux de chômage moyen est de l'ordre 5%. En chimie par contre, le taux de chômage est assez élevé. Il est en moyenne de l'ordre de 13.5%.

Le taux moyen d'insertion des docteurs en CDD¹³ à 3 ans est de l'ordre de 25%. Il varie suivant les champs disciplinaires entre 12% et 40 % comme le montre la figure 2 qui donne l'évolution du taux d'insertion des docteurs en CDD en fonction des années d'enquête. Les 65% des docteurs restants sont en CDI¹⁴ avec une forte proportion (près de 60% parmi les CDI) dans le secteur public en particulier dans la recherche académique ou publique.

A Aix-Marseille Université, l'enquête réalisée par le collège doctoral sur le taux d'insertion professionnelle à 3 et à 5 ans des docteurs ayant obtenu leur diplôme au sein de ses 12 ED, montre que le taux de chômage des docteurs est de 5% en moyenne, soit 2 fois plus faible qu'au niveau national.

Les emplois sont en moyenne, toutes ED confondues, pour 63% des CDI et pour 37% des CDD avec comme au niveau national de fortes disparités sectorielles. On note aussi peu d'évolution de ces chiffres entre 3 et 5 ans après la thèse.

12. Enquête CEREQ (Centre d'Etudes et de Recherches sur les Qualifications) en 1999 auprès de la génération 1996, en 2001 auprès de la génération 1998, en 2004 auprès de la génération 2001, en 2007 auprès de la génération 2004 et en 2010 auprès de la génération 2007. <http://www.cereq.fr/>

13. Contrat à Durée Déterminée.

14. Contrat à Durée Indéterminée.

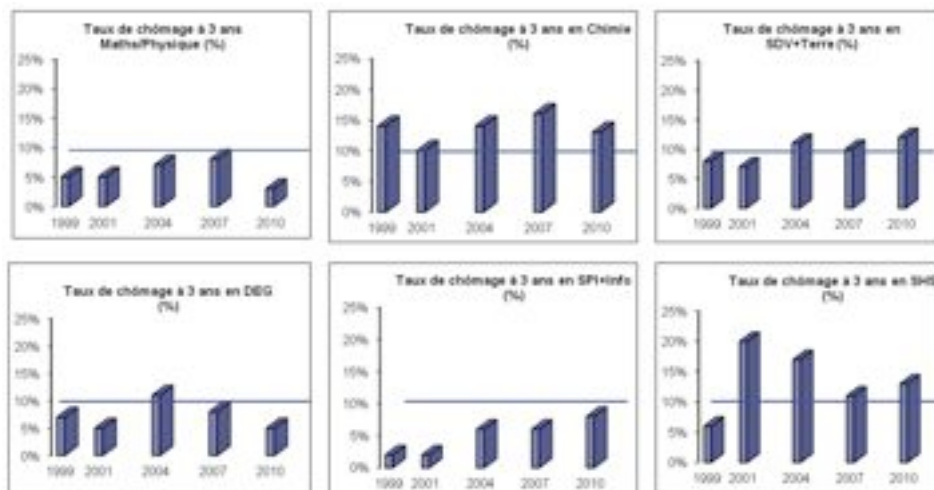


Figure 1 : Taux de chômage des docteurs en mathématique et physique, en chimie, en science de la vie (SVD) et de la Terre, en droit, économie et gestion (DEG), en sciences pour l'ingénieur (SPI) et informatique et en sciences humaines et sociale (SHS) hormis DEG. Données nationales, enquête CEREQ en 1999 auprès de la génération 1996, en 2001 auprès de la génération 1998, en 2004 auprès de la génération 2001, en 2007 auprès de la génération 2004 et en 2010 auprès de la génération 2007.

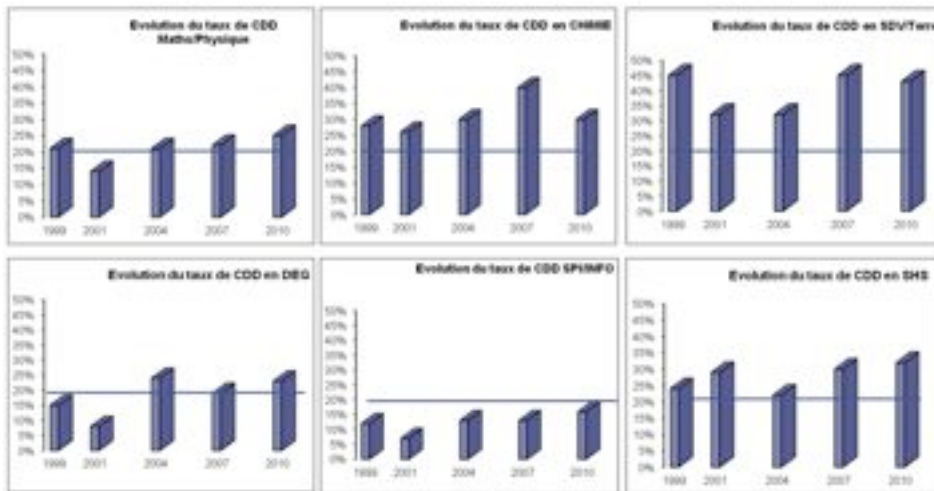


Figure 2 : Taux d'insertion des docteurs en CDD, en mathématique et physique, en chimie, en science de la vie (SVD) et de la Terre, en droit, économie et gestion (DEG), en sciences pour l'ingénieur (SPI) et informatique et en sciences humaines et sociale (SHS) hormis DEG. Données nationales, enquête CEREQ en 1999 auprès de la génération 1996, en 2001 auprès de la génération 1998, en 2004 auprès de la génération 2001, en 2007 auprès de la génération 2004 et en 2010 auprès de la génération 2007.

Conclusion

La formation doctorale en France a évolué notablement au cours des quinze dernières années avec la mise en place des écoles doctorales et leur confirmation, grâce à l'arrêté du 7 août 2006, comme lieux de structuration de l'offre de formation doctorale au sein des établissements d'enseignement supérieurs. Cette nouvelle organisation de la formation doctorale est en phase avec les orientations européennes en rapport avec le processus de Bologne. Elle est large, diversifiée et couvre tous les champs disciplinaires en sciences exactes, en sciences du vivant et en sciences humaines et sociales. Son objectif est de garantir aux doctorants une formation de très haut niveau avec une mise en place de programmes doctoraux garantissant l'acquisition d'une formation interdisciplinaire et le développement de compétences transférables permettant aux doctorants une meilleure insertion professionnelle dans les secteurs public ou privé que ce soit dans la recherche, l'industrie ou les services.

Les 286 écoles doctorales en fonction dans les établissements d'enseignement supérieurs en France regroupent près de 80.000 doctorants dont 46.5% de femmes et 53.5% d'hommes. Le nombre de nouveaux inscrits est de plus de 18.000 chaque année et le flux de thèses par an est de plus de 14.000.

L'enquête sur l'insertion professionnelle des docteurs à 3 ans au niveau national, montre que le taux de chômage est en moyenne de 10% avec de fortes disparités sectorielles. Le taux d'insertion en CDD est de 25% et le taux d'insertion en CDI est de 65% dont une majorité dans le secteur public avec en particulier un fort taux d'insertion dans le domaine de la recherche académique ou publique.

A Aix Marseille Université, la formation doctorale est organisée au sein de 12 écoles doctorales couvrant tous les champs disciplinaires existant au niveau national. Ces écoles doctorales organisées en collège doctoral, regroupent plus de 3.800 doctorants, dont 48.7% de femmes et 51.3% d'hommes et plus de 2.400 HDR travaillant dans plus de 120 unités de recherche. Le nombre de nouveaux inscrits est de plus de 800 chaque année et le flux de thèse par an est supérieur à 600. Le taux d'insertion professionnelle des docteurs d'Aix-Marseille Université est supérieur à 95% sur les 3 à 5 dernières années soit 5% de mieux que la moyenne nationale. En moyenne, 63% des docteurs sont en CDI et 37% en CDD, avec de fortes disparités sectorielles.

STRUCTURAL, MAGNETIC AND ELECTRONIC STUDIES OF $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ MAGNETOCALORIC COMPOUNDS

*Pr. H. LASSRI¹, Pr. A. BOUTAHAR¹,
Pr. L. BESSAIS² and Pr. E.K. HLIL³*

1- LPMMAT, Université Hassan II-Casablanca, Faculté des Sciences Ain Chock, BP 5366, Mâarif - Casablanca, Morocco.

2- ICMPE-CMTR, UMR CNRS 7182, 2-8, rue H. Dunant, 94320 Thiais, France.

3- Institut Néel, CNRS et Université Joseph Fourier, BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9, France.



Abstract

We have studied the magnetization of fine crystalline $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds with $1.2 \leq x \leq 2.2$ under magnetic fields up to 10T at different temperatures. The magnetocaloric effect (MCE) of $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds has been investigated. Magnetic entropy change ($-\Delta S_M$) allowing estimation of the MCE was determined based on the thermodynamic Maxwell's relation. The experimental results show that T_C increases with the Si content whereas the magnetic entropy variation decreases. The experimental magnetization measurements were interpreted in the framework of a random magnetic anisotropy (RMA) model. The results demonstrate that it is possible to extend the application of RMA to the fine crystalline state of the compounds. From the analysis of the approach to saturation magnetization some fundamental parameters have been extracted quantifying the anisotropy forces. In addition, first-principles spin-density functional calculations, using the Full Potential Linear Augmented Plane Waves (FLAPW) method were performed to investigate both the electronic and magnetic structures and computed magnetic moments are discussed and compared with available experimental data from magnetization measurements and neutron diffraction results.

Keywords: Magnetization; Magnetocaloric effect; Random magnetic anisotropy; DOS; FLAPW calculations.

1. Introduction

Extensive research on the magnetic refrigeration has been carried out over the last years. This is due to the presence of many advantages over gas refrigeration, such as: higher efficiency, low noise, softer vibration, longer using time and environment protection [1-2]. Therefore, increasing attention has been devoted to find magnetic refrigerants with a large MCE near room temperature. The MCE was first discovered by Warburg in 1881 [3]. It is an intrinsic property of magnetic materials. So, the application of this effect can be used in many magnetic energy conversion machines or magnetic refrigerators [4]. In the latter, the MCE is the tendency of certain materials, such as paramagnetic salts or ferromagnetic substances, to heat up when placed in a magnetic field and to cool down when removed from it. Due to the low cost and their giant MCE, much of interest has been reported on $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds with cubic NaZn_{13} type structure [5,6]. For a Si content in the range of $x=1.2$ to 2.2 , these compounds present important magnetocaloric properties with significant magnetic entropy change values and a high Relative Cooling Power (RCP) factor around 200K which is caused by an itinerant electron metamagnetic (IEM) transition [7,8]. In order to increase the Curie temperature of these materials, many studies have been carried out by substituting another rare-earth or transition metal such as Co for La and Fe [9] respectively or by the insertion of interstitial atoms like hydrogen or carbon [8]. Recently, the transition metal-based compounds have attracted much attention after the discovery of giant MCE in $\text{MnFeP}_{1-x}\text{As}_x$ [10] and $\text{MnAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ [11] compounds. In this paper, we report on the analysis of the magnetic, magnetocaloric and electronic properties of $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds. We also discuss the magnetic anisotropy level of fine crystalline $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds calculated versus the Si content enabling to derive an estimate of their fundamental characteristics. In addition, first-principles spin-density functional calculations are performed using the FLAPW method in order to investigate the electronic and magnetic structures.

2. Experimental

$\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds with $1.2 \leq x \leq 2.2$ were synthesized by high energy ball-milling and subsequent annealing by using LaSi as a precursor to prevent the oxidation of lanthanum. The precursor was prepared by arc-melting in a water-cooling copper hearth with an unconsumable tungsten electrode in a purified argon atmosphere. The sample was turned over and remelted five times to ensure a good homogeneity. The weight losses did not exceed 1%. The starting materials were pure elements ($\geq 99.9\%$). To prevent any loss of lanthanum caused by the large amount of powder stuck on the vial wall and its possible oxidation, an excess of 20 % of La was systematically added. The samples were annealed 30 minutes at 1373K. The composition and homogeneity of the alloys were investigated by X-ray diffraction (XRD). The magnetic and magnetocaloric properties were determined using a physical property measurement system (PPMS) magnetometer from Quantum Design operating up to 10 T and from 2 to 350 K.

3. Electronic structure calculations

We used the Full Augmented Plane Wave (FLAPW) method [12] which performs DFT calculations on the basis of the Local Spin Density Approximation (LSDA) by von Barth and Hedin [12]. The Kohn-Sham equation and energy functional were evaluated consistently. For this doing, the space was divided into the interstitial and the non overlapping muffin-tin spheres centred on the atomic sites. The basis function inside each atomic sphere consisted in linear expansion of the radial solution of a spherically potential multiplied by spherical harmonics. In the interstitial region, the wave function was taken as an expansion of plane waves and no shape approximation for the potential was introduced in this region consistently with the full potential method. The core electrons were described by atomic wave functions which can be solved relativistically using the current spherical part. The FLAPW calculations were performed using the crystal structure parameters deduced from the neutrons measurements, accounting for the spin polarized potential without spin-orbit coupling and assuming a ferromagnetic state. The atomic muffin-tin (MT) spheres, supposed not to overlap with each other, are taken as 2.5, 2.28, and 2.28 a.u for La, Fe and Si, respectively. The gap energy, which defines the separation of the valence and core state, was chosen equal to -6.0 Ry. The largest reciprocal vector G_{\max} in the charge Fourier expansion, was equal to 12 and the cut-off energy corresponding to the product of the muffin-tin radius and the maximum reciprocal space vector, $R_{\text{MT}} \times k_{\max}$, was equal to 7. Inside the atomics spheres, the potential and charge density are expanded in crystal harmonics up to $l_{\max} = 10$. Calculations are performed with 18 in equivalent k-points in the irreducible Brillouin zone. Such a value is large enough to ensure the magnetic moment. The convergence criterion was chosen to be the total energy and set at 10^{-4} eV.

4. Results and discussion

4.1. Structural characterization

$\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds crystallized with a cubic NaZn_{13} type structure. This structure, presents three non-equivalent crystallographic sites: 8a, 8b and 96i. La atoms occupy the 8a sites while Fe atoms occupy the 8b and 96i sites. In as-milled alloys, the resulting phases are α -(Fe,Si), LaFeSi and a small amount of the NaZn_{13} phase due to non-equilibrium solidification behavior. A very short annealing treatment of 30 min at high temperature is sufficient to reduce α -(Fe,Si) and (LaFeSi) contents. The distribution of Fe and Si atoms in $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ series was pointed out by XRD.

The structure refinement for the X-ray pattern was carried out using a FULLPROF computer code based on Rietveld analysis which gives the unit cell parameter and the auto coherent domain size in the assumption of a Thompson-Cox-Hastings line profile. Experimental and Rietveld refined X-ray diffraction patterns (using CuK radiation) for $\text{LaFe}_{10.8}\text{Si}_{2.2}$, as an example, are presented in Fig. 1. In the range $1.2 \leq x \leq 2.2$, $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ show single-phase, cubic NaZn_{13} type structures, space group Fm-3c .

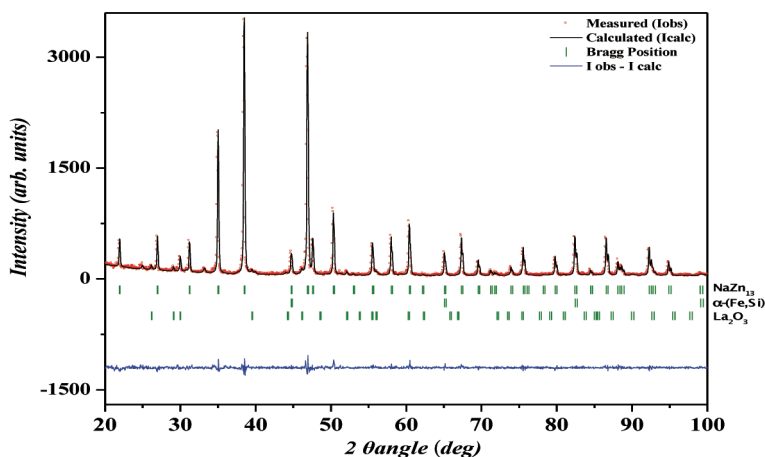


Fig. 1. Example of fitting of the XRD patterns of $\text{LaFe}_{10.8}\text{Si}_{2.2}$ compound by using Rietveld method.

For all samples the mean diffraction crystallite sizes are found to be less than 120 nm. The results of the structure refinement performed for the $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ series, for $x=1.2, 1.3, 1.5$ and 2.2 , are listed in Table 1. The XRD results show that the cell parameter exhibits a standard deviation with the Si content. In addition, for the sample annealed at 1273K, a small amount of LaFeSi is observed. In the case of samples annealed at temperature $\geq 1373\text{K}$, small amounts of $\alpha\text{-(Fe,Si)}$ (≤ 1.9 wt %) and La_2O_3 (≤ 2.0 wt %) phases are observed in addition to the main NaZn_{13} phase.

Compositions	a (Å)	y96i	z96i	R_B
$\text{LaFe}_{11.8}\text{Si}_{1.2}$	11.4695	0.1171	0.1791	2.0
$\text{LaFe}_{11.7}\text{Si}_{1.3}$	11.4676	0.1171	0.1792	3.2
$\text{LaFe}_{11.5}\text{Si}_{1.5}$	11.4643	0.1172	0.1792	3.5
$\text{LaFe}_{10.8}\text{Si}_{2.2}$	11.4635	0.1173	0.1791	2.5

Table 1. A unit cell parameter, the atomic position and the Bragg reliability factor deduced from the Rietveld refinement.

4.2. Magnetic measurements

To study the effect of Si content on the magnetic properties, the magnetization versus applied magnetic field at 2K is measured, for $x=1.6, 1.8, 2.0$ and 2.2 , and presented in Fig. 2. It is found that the magnetization decreases with the addition of Si. This is due to the charge transfer from sp band of the metalloid to the 3d band of the transition metal and the 3d-5d hybridization effects between Fe and La atoms which increase when inserting Si atoms.

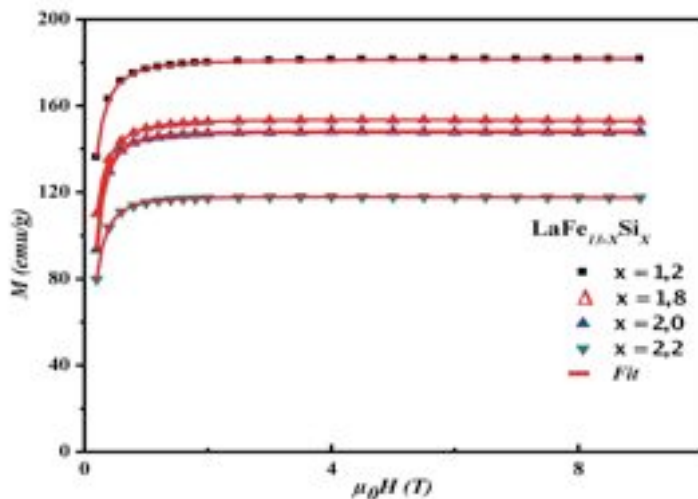


Fig. 2. The magnetization versus magnetic field at 2K for the $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds.

The magnetization versus temperature under an applied magnetic field of 0.2T is measured and reported in Fig. 3 for $x=2.2$. As shown in the figure, the transition temperature was determined as the maximum of the dM/dT curve. The $M(T)$ curve reveals a ferromagnetic-paramagnetic transition occurring at the Curie temperature (T_C) for all samples when increasing temperature. On the other hand, the magnetic phase transition of $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ drastically changes from first to second order, which is attributed to the disappearance of the IEM transition after Si insertion [13-17].

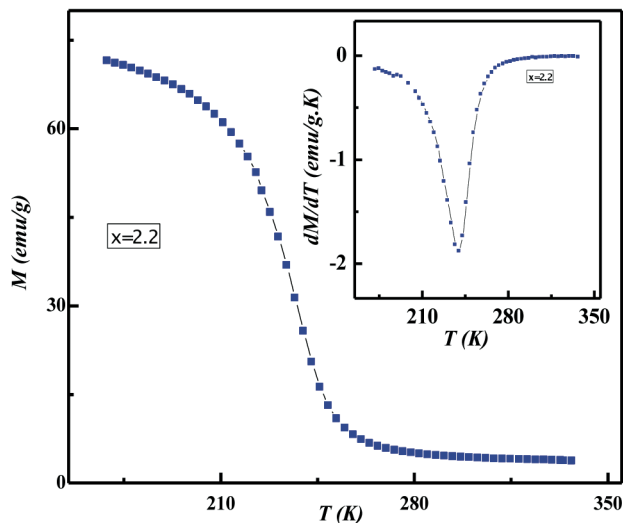


Fig. 3. Temperature dependence of magnetization of $\text{LaFe}_{10.8}\text{Si}_{2.2}$ measured in a field of 0.2 T.

Table 2 shows the variation of the Curie temperature as function of Si content. The transition temperature of the annealed ball-milled compounds increases from 192.5 K to 240 K when x increases from 1.2 to 2.2.

Compositions	T_C (K)	ΔT^{FWHM} (K)	$-\Delta S_M^{max}$ (J/kg K)	RCP (J/kg)
$LaFe_{11.8}Si_{1.2}$	192.5	9.86	11	106.4
$LaFe_{11.6}Si_{1.4}$	200.2	5.08	24.4	124
$LaFe_{11.5}Si_{1.5}$	201.0	7.4	17.3	128
$LaFe_{11.4}Si_{1.6}$	202.5	9.4	16.5	155
$LaFe_{11.2}Si_{1.8}$	216.5	21.84	6.5	142
$LaFe_{11.0}Si_{2.0}$	228.5	32.9	3.8	125
$LaFe_{10.8}Si_{2.2}$	240.0	59.9	2.3	137.7

Table 2. Results of the magnetic characterization of the $LaFe_{13-x}Si_x$ compounds. The Curie temperature; the full-width at half maximum in the temperature dependence of the magnetic entropy change ($-\Delta S_M^{max}$), the magnetic entropy change and the relative cooling power are given for a field of 0-2T.

The increase of the Curie temperature in the $La(Fe,Si)_{13}$ compound should not be explained only on the basis of a geometrical effect involving unit-cell volume evolution, but also on the concept of preferential occupancy of non-magnetic Si atoms at Fe sites. The increase of the Curie temperature in $La(Fe,Si)_{13}$ compound might be attributed to the reduction in the number of Fe-Fe antiferromagnetic pairs ($d_{Fe-Fe} < 2.45 \text{ \AA}$) due to a magnetic dilution effect [18-19]. Givord et al. show that the distance at which the Fe-Fe exchange interaction switches between ferromagnetic and antiferromagnetic is 2.45 \AA : antiferromagnetic for shorter distances and ferromagnetic for longer contacts [20]. Either an increase in Fe-Fe interatomic distances or a decrease in the fraction of short Fe-Fe bonds is expected to enhance the overall Fe-Fe exchange couplings and, consequently, the Curie temperature.

The isothermal magnetization curves of different temperatures near the vicinity of the Curie temperature are shown in Fig. 4 for different concentrations. The M-H curves below T_C exhibit a ferromagnetic behavior; by increasing the temperature above T_C , there is a field-induced metamagnetic transition from the paramagnetic to the ferromagnetic state characterized by a sharp change in the magnetization within a narrow temperature range.

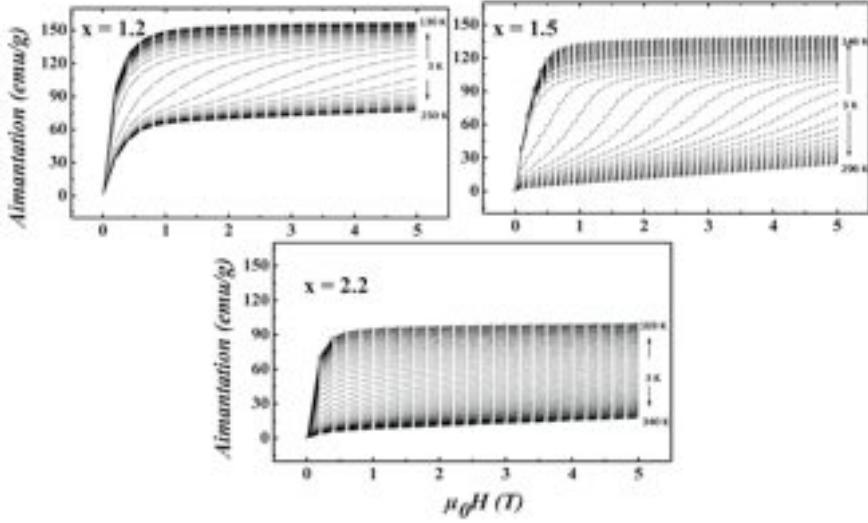


Fig. 4. Magnetization versus applied magnetic field isotherms measured for $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds.

Based on the thermodynamically theory, the isothermal magnetic entropy change ΔS_M associated with a magnetic field variation is given by :

$$\Delta S_M(T, \Delta H)_{\text{is}} = \int_{H_i}^{H_f} \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH . \quad (1)$$

In practice, an alternative formula is usually used for numerical calculation :

$$\Delta S_M(T, \Delta H)_{\text{is}} = \mu_0 \sum_i \frac{M_{i+1} - M_i}{T_{i+1} - T_i} \Delta H_i , \quad (2)$$

where μ_0 is the vacuum permeability, M_i and M_{i+1} are the magnetization values measured at temperatures T_i and T_{i+1} in a field change ΔH_i [21]. The accuracy of the calculated ΔS_M depends on the accuracy of the measurements of the magnetic moment, temperature, and magnetic field. According to the literature, the estimated accuracy of ΔS_M using this technique is about 20–30% above the TC [22]. Nevertheless, the Maxwell relation (1) must be used carefully since the adjacent isotherms reflect the temperature dependence of the iso-field magnetization [23]. Fig. 5 shows the temperature dependence of the magnetic entropy measured at an applied magnetic field of 0–2 T and 0–5 T for $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ ($x=1.2, 1.5$ and 2.2) compounds. The maximum peak value of $(-\Delta S_M)$ for the $\text{LaFe}_{11.8}\text{Si}_{2.2}$ compound is 4.3 J/kg K under a magnetic field range of 0–5 T. The maximum value of $(-\Delta S_M)$ decreases with the Si content by increasing the Si content from 1.4 to 2.2 [10]. This decrease of $(-\Delta S_M)$ is due to the change from the first-order transition toward the second-order when increasing Si content. This decrease of $(-\Delta S_M)$ versus the Curie

temperature has also been observed in compounds prepared by arc-melting [24].

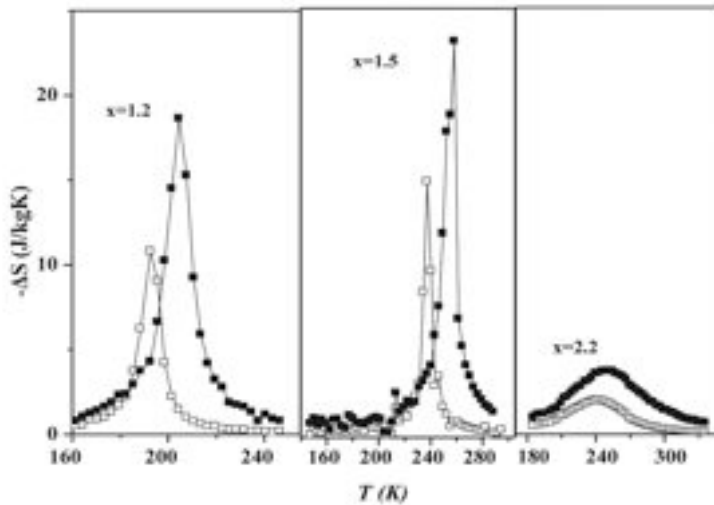


Fig. 5. Temperature dependence of the magnetic entropy change under a magnetic field change of 0-2 T (open symbols) and 0-5 T (closed symbols) for $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds.

On the other hand, we have calculated the RCP values for all samples using the following equation [25-27]:

$$\text{RCP} = -\Delta S_M^{\text{max}} \times \delta T^{\text{FWHM}}, \quad (3)$$

where $(-\Delta S_M^{\text{max}})$ and δT^{FWHM} are the maximum of the entropy variation and the full-width at half maximum of the temperature dependence of the magnetic entropy change $(-\Delta S_M)$.

The value of the saturation magnetization has been improved by decreasing the Si content (Fig. 2). This leads to an increase in the magnetic entropy variation when the amount of Si is changed from 2.2 to 1.2. For the intermetallic compound $\text{LaFe}_{10.8}\text{Si}_{2.2}$, the RCP values are 137.7 J/kg and 339.4 J/kg in magnetic field change of 0-2 T and 0-5 T, respectively. The RCP increases when the magnetic field increases.

4.3. Random magnetic anisotropy constant

Based on their Hamiltonian, Chudnovsky et al. [28-31] have proposed a model to analyse the approach to saturation. This model was applied successfully to explain the results by us [32-33]. We have used this model to analyse our results on several rare earth based amorphous alloys and obtained various fundamental parameters such as the local anisotropy, the correlation lengths etc... We propose to apply similar ideas to the fine crystalline compounds.

The application of this random anisotropy model to nanomaterials could be justified as follows. Due to their low dimension, the nanomaterials have a lower symmetry particularly in the regions close the surface, resulting in a kind of uniaxial anisotropy. As the grains are oriented randomly there is no alignment of this axis which leads to a spread in their direction. This is analogous to amorphous materials where the topological disorder leads to a spread in the axis of symmetry. The essential difference is that in the amorphous character for with the structural correlation length is of the order of 1 or 2 nm whereas in nanomaterials the grains size is an order of magnitude bigger. This would result in some differences in details and could affect the magnitude of the anisotropy. We briefly describe below the model that we have used. We can describe the approach to magnetic saturation by using the following formula :

$$M(H) = M_0 \left(1 - \frac{a_2}{(H + H_{ex})^2} \right) \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{H_r^2}{15} = \frac{1}{15} \left(\frac{2K_L}{M_0} \right)^2 \quad (5)$$

where, H is the applied magnetic field in (T), M_0 is the saturation magnetization in emu/g, H_{ex} is the exchange field, H_r is the random anisotropy field and a_2 is a constant which is a function of the local anisotropy K_L and M_0 . The magnetization curves for all samples are found to fit equation (4) well as shown in Fig.2. The values of M_0 , and a_2 obtained from the fitting at 2K were used to determine K_L using Eq. (5). Values of the parameters obtained by this way are presented on Table 3. In the fine crystalline compounds, the anisotropy constant calculated from the approach to saturation law (Table 3) is much higher than that obtained for a bulk crystal Fe. This fact implies that the orbital moment of Fe is incompletely quenched in the alloys. It is likely that a small but appreciable orbital moment of the relatively large Fe moment is mainly responsible for the Fe sublattice anisotropy [34]. We find that the local anisotropy decreases from 4.6×10^6 erg/cm³ for $x=1.6$ to 2.7×10^6 erg/cm³ for $x=2.2$ at 2K.

X (Si)	M_0 (emu/g)	A (10^{-8} erg/cm)	H_{ex} (Oe)	H_r (Oe)	K_L (10^6 erg/cm ³)
1.6	181.6	24.5	292	7100	4.6
1.8	153.6	26.5	259	7380	4.0
2.0	148.1	27.6	215	6820	3.5
2.2	117.9	29.0	184	6640	2.7

Table 3. Some magnetic parameters of $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ at 2K obtained from the fit (Eq. 4) as a function of Si content.

To study the effect of the local anisotropy K_L on the magnetocaloric effect of $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ ($x = 1.6, 1.8, 2.0$ and 2.2) compounds, the maximum of the entropy variation

$(-\Delta S_M^{\max})$ versus the local anisotropy K_L is reported in Fig. 6. It is found that the maximum of the entropy variation $(-\Delta S_M^{\max})$ increases with the local anisotropy K_L when x is decrease from 2.2 to 1.6.

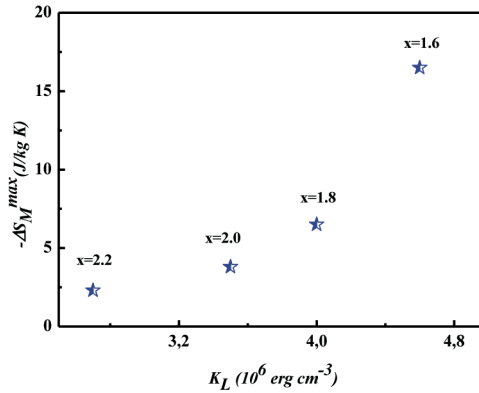


Fig. 6. The maximum of the entropy variation $(-\Delta S_M^{\max})$ versus the local anisotropy K_L .

The exchange field H_{ex} can also be expressed as [28-31] :

$$H_{\text{ex}} = \frac{2A}{M_0 R_a^2}, \quad (6)$$

where R_a is the length for which the local axes show a correlation. The exchange constant is given by the following formula : $A = \frac{k_B T_C}{a}$ [35], where T_C is the Curie temperature, k_B is the Boltzmann constant and a (\AA) is the Lattice parameter of $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$. Knowing all the parameters, we can calculate A (Table 3). Using the value of H_{ex} , we have determined the R_a value, which is about 120\AA . The anisotropy directions are assumed to be randomly distributed beyond the characteristic length scale R_a .

Finally, from H_{ex} and H_f and by using the relation :

$$\lambda = \left(\frac{2}{15} \right)^{1/2} \frac{H_f}{H_{\text{ex}}}, \quad (7)$$

the dimensionless parameter (λ) has been calculated. λ plays an important role to distinguish between the cases of strong anisotropy ($\lambda > 1$) and weak anisotropy ($\lambda < 1$). It is found that in our alloy $\lambda > 1$, which corresponds to a ferromagnetic system with strong random anisotropy and the ferromagnetic correlation length value R_f coincides with R_a ($R_f \approx R_a$).

4.4 Electronic structure calculations

We aim to carry out electronic structure calculations for the $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$ compound using the FLAPW method. For such a compound, the crystalline structure was taken from the neutrons measurements published in reference [36]. The space group of the crystal structure is Fm-3c where the 8a ($\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$) as well as the 8b (0, 0, 0) sites are considered fully ordered and occupied by La and Fe, respectively. The remaining 96i (0, y, z) sites is taken randomly disordered and shared by Fe and Si atoms with 11.31 and 1.69 concentrations, respectively. Here, we have not considered the system as fully on the 96i (0, y, z) sites since the FLAPW method is not convenient. To overcome this question, we have considered a quasi-disordered system where the 8a ($\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$) and 8b (0, 0, 0) sites are kept fully ordered and occupied by La and Fe, respectively.

The remaining 96i (0, y, z) sites are assumed quasi-disordered chemically and shared by 91 fixed Fe atoms and 15 fixed Si atoms in the cell leading to the $\text{LaFe}_{11.27}\text{Si}_{1.73}$ formula which is very close to $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$ as experimentally investigated. Such atom distribution does not require building a super cell, however a change of the symmetry from the Fm-3c space group to the P42/mmc one has to be considered for.

The total density of states (DOS) deduced from band structure calculations for $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$, is presented in Fig. 7. The main evidence is the absence of the gap close to the Fermi level E_F (taken as the energy reference) which confirms the conductor character of this type of compounds. Analysing details of the total DOS points out that the La atoms contribute to both occupied states and to unoccupied states at -16 eV and at +3 eV, respectively. Close to the Fermi level, the occupied states are mainly originating from the Fe and Si atoms.

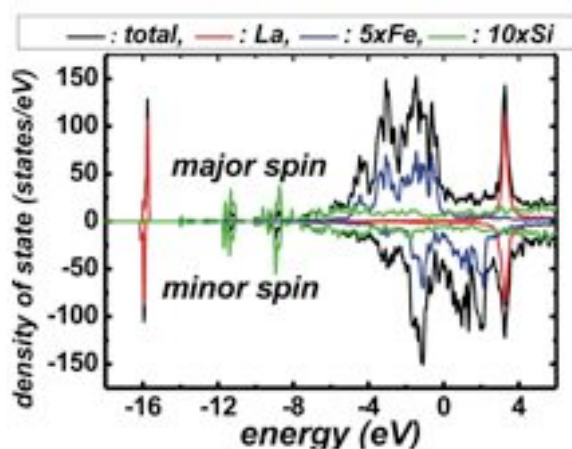
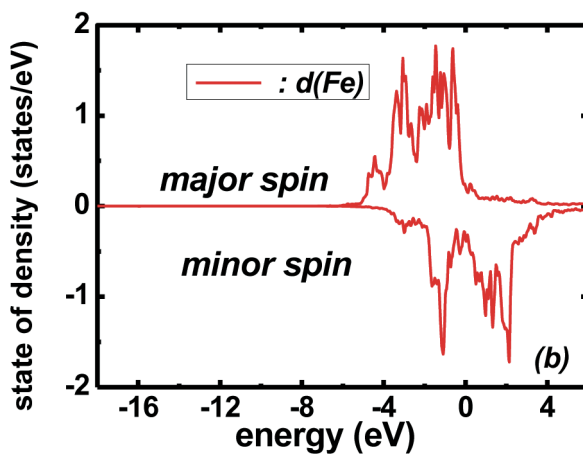
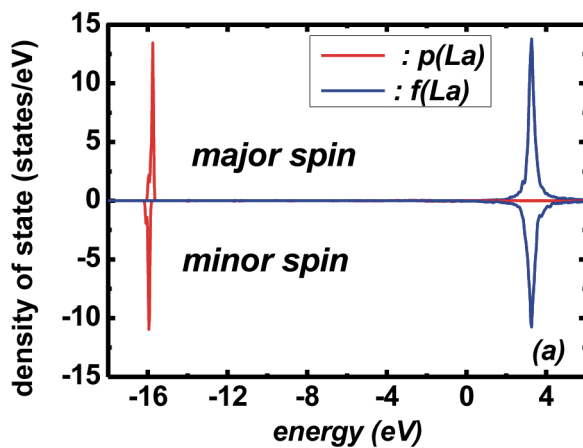


Fig. 7. Total DOS and projected DOS on La, Fe and Si in $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$.

In addition, the difference in the DOS shape for spin up and spin down confirms the marked magnetic character for $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$. Here, it is worth to note that this asymmetry in DOS concerns only contributions from the Fe atoms. For further DOS analysis, the

l-decomposed DOS of s, p, d or f like-states are calculated and reported in Figs 8(a, b, c).



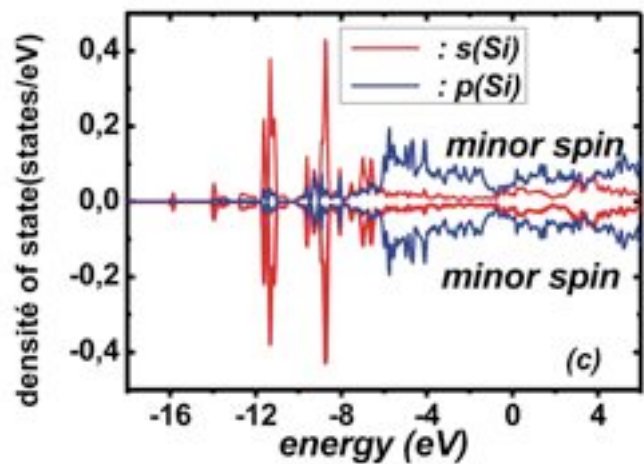


Fig. 8. The *l*-decomposed DOS of s, p, d or f like-states of La (a), Fe (b) and Si (c) in $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$.

As shown in Fig. 8a, feature at -16 eV is originating from the fully 5*d*(La) states whereas the feature at +3 eV is issuing from the empty 5*f*(La) states. Between both features we found mainly contributions from 3*d*(Fe) as shown in Fig. 8b. The *s*(Si) and *p*(Si) bands take place also between the both La contributions but the their contributions are weaker than the La ones. The main aim of these electronic structure calculations is to investigate the magnetic structure, and to compare calculated magnetic moments with the experimental data determined by both neutron diffraction and magnetization measurements. From FLAPW calculations, the magnetic moment values are computed and gathered in Table 4. As seen in this table, the computed magnetic carried by Fe at 8b site as well as Fe at 96i site are equal to 2.07 and 2.14 μ_{B} , respectively. Here, it should be underlined that a magnetic moment of 0.15 μ_{B} is found on the La atoms. Also, magnetism in the interstitial region between atoms is far from being negligible since an integrated magnetic moment of 6.9 μ_{B} is found in such space. Also, it should be noticed that the magnetic polarization found both at the La atoms and in the interstitial space are antiferromagnetically coupled with the Fe magnetic moments.

	Fe (8b)	Fe (96i)	Si (96i)	La (8a)	Interstitial magnetism	Magnetic. moment/cell	$\mu_{\text{B}}/\text{f.u.}$
FLAPW calculations	2.07	2.42	-0.04	-0.15	-6.91	169.18	21.15
Neutron diffraction	1.425	2.21	0.00	0.00			24.05
Magnetization measurements							23.00

Table 4 : Magnetic moment μ_{B} units in $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$ deduced from FLAPW calculations, neutron diffraction and magnetization measurements.

As another interesting result, is that the total magnetic polarization within the cell equals to 157.8 emu/g which corresponds to $\sim 22.8 \mu_B/\text{f.u.}$ being slightly lower than $24.05 \mu_B/\text{f.u.}$ value obtained from neutron diffraction. This discrepancy should be explained by the fact that, for neutron diffraction, the opposite magnetic polarization found in the interstitial regions is not accounted for since it forms a flat density distribution which does not contribute to Fourier Transform in the accessible Q-space. However, a bulk magnetic analysis of $\text{LaFe}_{11.31}\text{Si}_{1.69}$ performed under fields up to 10 T points out to a total magnetization of $M=23 \mu_B/\text{f.u.}$ This value is interestingly between estimated values from both calculations and neutron diffraction. These results definitively demonstrate the itinerant electron metamagnetic character of the $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ type compounds, in which are particularly concerned the Fe(8b) sites. As reported in [36-38], the interatomic Fe-Fe distances are almost short at low temperature and more particularly the 8b Fe atom which is CN16 coordinated by 96i atoms at 2.462 Å and it share correspondingly a reduced moment of $1.6 \mu_B$. Conversely the first neighbor distances from the 96i Fe site range from 2.45 up to 2.554 Å, most of them being close to 2.475 Å, and as for α -Fe the magnetic moment are found of $2.2 \mu_B$. Such short Fe-Fe distance can support the relative reduction of the Fe(8b) magnetic moment and accordingly a RKKY type magnetic polarization with negative spin density standing in between the Fe atoms. Moreover at the first order ferro-paramagnetic transition the Fe-Fe distance drop down to smaller values (except those Fe(96i)-Fe(96i)) remaining almost constant at 2.49 Å. In particular the Fe(8b)-Fe(8b) distance drop to 2.448 Å at 240 K just above the magnetic transition.

5. Conclusion

We have studied the MCE of $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ compounds with $1.2 \leq x \leq 2.2$. The magnetic entropy changes were obtained from isothermal magnetization curves. This indirect technique is fast and gives crucial information for determining the quality of a magnetic refrigerator material. The results show that this series exhibits interesting levels of the MCE. Under a magnetic field change of 0-2T, the maximum of the entropy variation is about 2.3J/kg K at $T=243\text{K}$ and the relative cooling power is estimated to be more than 137.7 J/kg for $\text{LaFe}_{10.8}\text{Si}_{2.2}$. The Curie temperature can be tuned easily by changing the Si concentration.

We have shown that it is possible to extend the application of random magnetic anisotropy model originally developed for amorphous alloys to the fine crystalline materials. The model gives a good fit of the experimental $M(H)$. Besides, we have also determined some fundamental parameters such as random anisotropy and exchange fields, random anisotropy constant and the local correlation length of anisotropy axes.

Electronic structure calculations are performed as well. These calculations allowed shedding light on magnetism structure and giving a clear picture. Particularly, they underlined that magnetic moments of La and those generated by the interstitial space are antiferromagnetically coupled with Fe magnetic moments. As pertinent result, the calculated $\mu_B/\text{f.u.}$ reasonably agrees with experimental data.

References

- [1] A.F. Lacaze, R. Beranger, G.B. Mardion, G. Claudet, A.A. Lacaze, *Cryogenics*. 23 (1983) 427.
- [2] J.S. Amaral, M.S. Reis, V.S. Amaral, T.M. Mendonça, J.P. Araujo, M.A. Sa, P.B. Tavares J.M. Vieira, *J. Magn. Magn. Mater.* 290 (2005) 686.
- [3] E. Warburg, *Ann. Phys.* 13 (1881) 141.
- [4] A. Kitanovski, P.W. Egolf, *Int. J. Refrig.* 33 (2010) 449.
- [5] E. Bruck, O. Tegus, D. Thanh, K. Buschow, *J. Magn. Magn. Mater.* 310 (2007) 2793.
- [6] S. Fujieda, A. Fujita, K. Fukamichi, *J. Alloys Comp.* 566 (2013) 196.
- [7] K. Mandal, D. Pal, O. Gutfleisch, P. Kersch, K.H. Müller, *J. Appl. Phys.* 102 (2007) 1.
- [8] S. Fujieda, A. Fujita, K. Fukamichi, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 4 (2003) 339
- [9] M. Balli, D. Fruchart and D. Gignoux, *Journal of physics*, 19 (2007) 236230.
- [10] O. Tegus, E. Brück, K.H.J. Buschow, F.R. de Boer, *Nature*. 415 (2002) 150.
- [11] H. Wada, Y. Tanabe, *Appl. Phys. Lett.* 79 (2001) 3302.
- [12] U. von Barth and L. Hedin, *J. Phys. C* 5 (1972) 1629.
- [13] M. Phejar, V. Paul-Boncour, L. Bessais, *Intermetallics*. 18 (2010) 2301.
- [14] A. Fujita, S. Fujieda, K. Fukamichi, *Phys. Rev. B*. 65 (2001) 014410.
- [15] J. Lyubina, O. Gutfleisch, M.D. Kuz'min, M. Richter, *J. Magn. Magn. Mater.* 321 (2009) 3571.
- [16] F.X. Hu, J. Gao, X.L. Qian, M. Llyn, A.M. Tishin, J.R. Sun and B. G. Shen, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 1.
- [17] C. Xu, G. Li, X. Li, L. Wang, *Chin Sci Bull.* 51 (2006) 2046.
- [18] D. Givord and R. Lemaire, *IEEE Trans. Magn.* 10 (1974) 109.
- [19] Z.W. Li, A.H. Morrish, *Phys. Rev. B*. 55 (1997) 3670.
- [20] G.K. Marasinghe, C. Exekwenna, W.J. James, Z. Hu, W.B. Yelon, *J Appl. Phys.* 81 (1997) 5103.
- [21] F.X. Hu, B.G. Shen, J.R. Sun, Z.H. Cheng, X.X. Zhang, *J. Phys. Condens. Matter*. 12 (2000) 691.
- [22] V. Pecharsky, Jr. K. Gschneidner, *J. Alloys Comp.* 86 (1999) 565.
- [23] L. Caron, Z. Ou, T. Nguyen, D. CamThanh, O. Tegus, E. Brück, *J. Magn. Magn. Mater.* 321 (2009) 3559.
- [24] Jr. K. Gschneidner, V. Pecharsky, A. Tsokol, *Rep. Prog. Phys.* 68 (2005) 1479.

- [25] D.T. Kim Anh, N.P. Thuy, N.H. Duc, T.T. Nhien, N.V. Nong, J. Magn. Magn. Mater. 262 (2003) 427.
- [26] A. Fujita, S. Fujieda, K. Fukamichi, J. Magn. Magn. Mater. 310 (2007) 1006.
- [27] M. Balli, M. Rosca, D. Fruchart, D. Gignoux, J. Magn. Magn. Mater. 321 (2009) 123.
- [28] E.M. Chudnovsky and R.A. Serota, J. Phys. C. 16 (1983) 4181.
- [29] E.M. Chudnovsky, W.M. Saslow and R. A. Serota, Phys. Rev. B. 33 (1986) 251.
- [30] E.M. Chudnovsky, J. Appl. Phys. 64 (1988) 5770.
- [31] E.M. Chudnovsky, J. Magn. Magn. Mater. 79 (1989) 127.
- [32] H. Lassri, E.K. Hlil, S. Prasad, R. Krishnan, Journal of Solid State Chemistry. 184 (2011) 3216.
- [33] H. Lassri and R. Krishnan, J. Magn. Magn. Mater. 157 (1992) 104.
- [34] M.M. Abd-ElAal, J. Magn. Magn. Mater. 131 (1995) 148.
- [35] M. Guyot, A. Globus, Journal de Physique C1. 4 (1977) 157.
- [36] M. Rosca, PhD Thesis, Univ. J. Fourier, Grenoble, France (2006).
- [37] P. Blaha, K. Schwartz, P. Sorantin, S.B. Trikey, Comput. Phys. Commun. 59 (1990) 399.
- [38] M. Rosca, M. Balli, D. Fruchart, D. Gignoux, E.K. Hlil, S. Miraglia, B. Ouladdiaf, P. Wolfers, J. Alloys. Compds. 490 (2010) 50.

PHOTOGENERATING WORK FROM POLYMERS: LIGHT INDUCED MOLECULAR MOVEMENT AND NANOPATTERNING *

Pr. Zouheir SEKKAT

*University Mohamed V-Agdal, Faculty of Sciences,
Rabat, Morocco
Optics & Photonics Centre, Moroccan Foundation for
Science & Innovation & Research, MAScIR,
Rabat, Morocco
Hassan II Academy of Science & Technology,
Rabat, Morocco*



Abstract

Recent developments in photoresponsive polymers, such as azopolymers, and nanocomposites are at the heart of future devices that have the ability to control the creation of mechanical work remotely, with high speed and spatial precision, over long distances, thereby offering many intriguing possibilities. Identifying materials and material combinations that convert an input stimulus to mechanical work (or conversely enable harvesting of the mechanical energy) have been of long standing interest. These so-called smart, autonomous, and intelligent materials and material systems form the basis of modern devices ranging from actuators and microelectromechanical switches to quartz watches and thermostats. Recently, laser sources have catalyzed a growing interest in the use of light (photons) as the energy input (Figure 1). In contrast to thermal, electrical, or chemical approaches, a coherent and wavelength-specific photon flux enables facile 'remote' control of the process, as well as precise spatial localization with a resolution limited by the diffraction limit of the radiation wavelength (nanometer). I will discuss how work can be photogenerated from polymers. Photoisomerization in azo-polymers as well as light induced molecular movement, and recent advances and achievements in polymer photomechanics will be discussed as well.

Keywords: Polymer photomechanics; azopolymers; photoisomerization and photoorientation; light activated molecular movement; nanofabrication.

*This report is part of the work published in Z. Sekkat & S. Kawata, Laser Photonics Rev. 8, No. 1, 1-26 (2014).

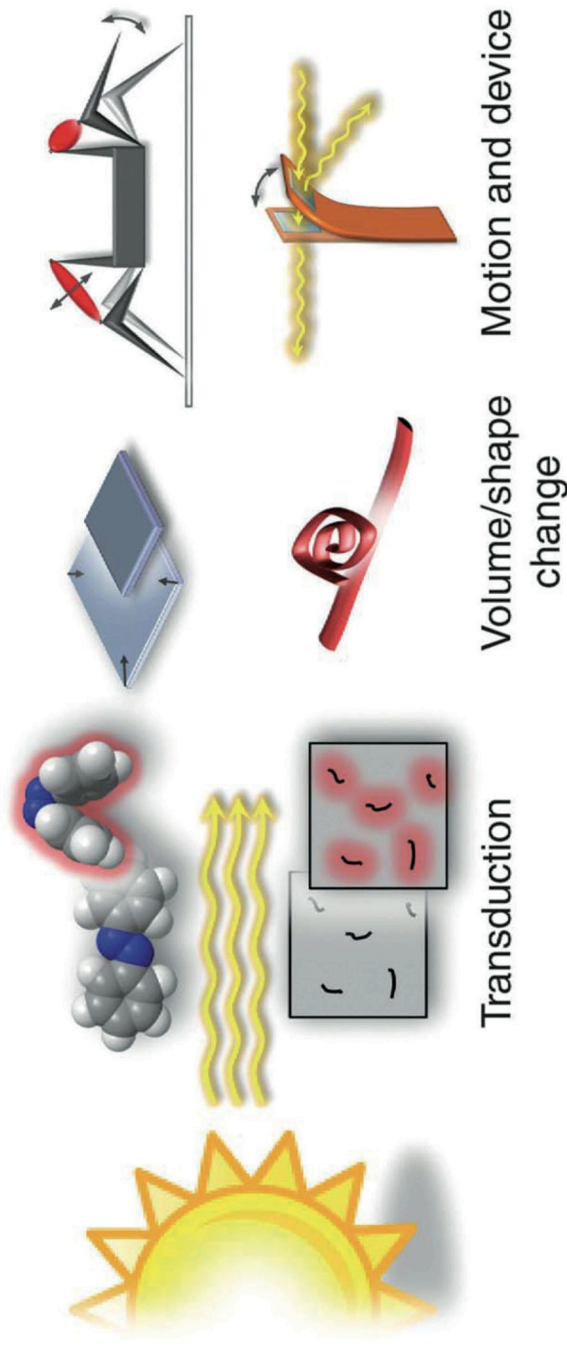


Figure 1: Schematics of conversion of light to mechanical work. Photons emitted by a photoactive material may produce mechanical motion either by : (a) a reversible conformational change, or (b) a local temperature increase via non-radiative decay. When these molecular processes are amplified to macroscopic shape or volume changes, mechanical work or motion can be integrated into a range of remotely controlled devices, such as beam stirring mirrors or robots. Reproduced from H. Koerner et al. Materialstoday Volume 11, Issues 7-8, July-August 2008, pp. 34-42.

1. Light Induced molecular Movement and Nanopatterning in Azopolymers.

Photoisomerizable polymers, namely azo-polymers, have attracted much attention because of their tremendous importance in a large spectrum of adjacent research fields, including photochemistry, polymer science and engineering, chemical engineering, optics and nonlinear optics, and so on. The basic phenomena discovered in the field, including photoinduced mass movement of polymers, are summarized in a book that we edited in 2002 [1]. Photoinduced patterns of surface deformations in azobenzene containing polymer films have attracted much attention because of possible applications in optical data storage and in micro/nano fabrication, and it is well known that such patterns reflect the state of the incident light polarization and the light intensity distribution [1-25]. The photoinduced patterns are due to light induced mass movement of the polymer chains which in turn is triggered by the photoisomerization of the azo chromophores. An example of azo-polymer is shown in Figure 2.

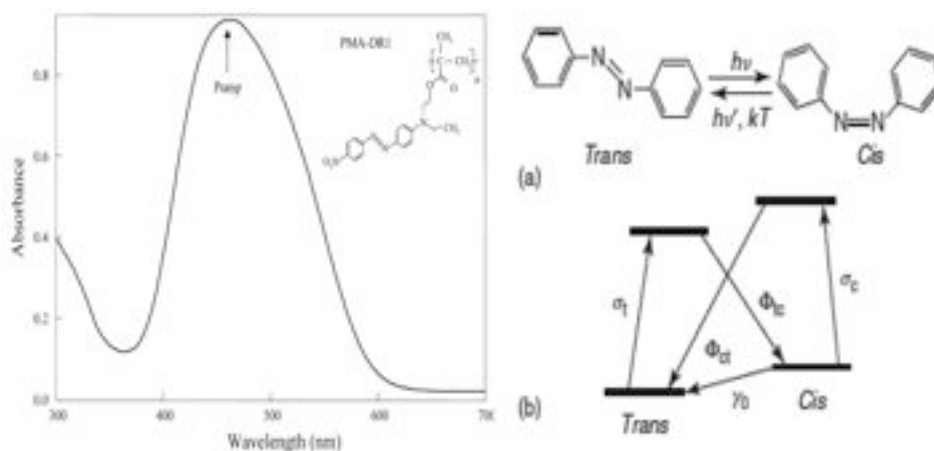


Figure 2: (Left) Chemical structure (inset) and absorption spectrum of the trans-DR1-PMA thin film. PMA-DR1: Poly (Disperse Red 1 methacrylate); (Product No. 579009, Aldrich; $T_g = 82^\circ\text{C}$). The arrow labelled pump indicates an irradiation wavelength for photoisomerization. (Right) (a) Trans–cis isomerization of azobenzenes. (b) Simplified model of the molecular states. Reproduced from [7].

The molecular machine, e.g. the azobenzene derivative that fuels the polymer motion has two geometric isomers, the trans and the cis forms (see Figure 2a for the trans and cis azobenzenes), and the isomerization reaction is a light- or heat-induced interconversion of the two isomers. The trans isomer is thermodynamically more stable than the cis isomer – the energy barrier at room temperature is about 50 kJ/mol for the azobenzene – and generally, the thermal isomerization is in the cis→trans direction. Light induces isomerization in both directions. Photoisomerization begins by elevating the isomers to electronically excited states, after which nonradiative decay brings them to the ground state either in the ‘cis’ form or in the ‘trans’ form, the ratio depending upon the quantum yields (QYs) of the isomerization reaction. From the cis form, molecules come back to the trans form by two mechanisms : the spontaneous thermal reaction and the reverse cis→trans photoisomerization [7]. Figure 2b shows a simplified model of the excited

states. Only two excited states are represented, but each may represent a set of actual levels. The lifetimes of all these levels are assumed to be very short in comparison to those of these two excited states. σ_t and σ_c are the cross section of absorption for the absorption of one photon by the *trans* and the *cis* isomers, respectively. The cross sections are proportional to the isomers molar absorptivities. γ_0 is the thermal relaxation rate, and it is equal to the reciprocal of the lifetime of the *cis* isomer (τ_c). Φ_{tc} and Φ_{ct} are the QYs of photoisomerization, and they represent the efficiency of the *trans* \rightarrow *cis* and *cis* \rightarrow *trans* photochemical conversion per absorbed photon, respectively. When the irradiation light is polarized, the azo molecules are redistributed perpendicular to the irradiation light polarization after light absorption [7]. Briefly, photoorientation results from photoselective isomerization; e.g. molecules that are oriented along the irradiation light polarization have the highest probability of isomerization and those that are oriented perpendicular to the excitation light polarization have the lowest probability of isomerization. Photoselection burns a hole into the molecular orientational distribution, and the long molecular axis of the azo-chromophore fades from the exciting light polarization due to rotation during photoisomerization, thereby inducing molecular photoorientation.

A surface relief is fabricated by an interference pattern of light (Figure 3). The polymer moves from high to low intensity regions in the direction of light polarization, and the *trans* \leftrightarrow *cis* photoselective isomerization and molecular reorientation play important roles in the deformation process. Although there are many attempts to theoretically describe photoisomerization induced mass movement in polymers [11-14], till now there is no theoretical model that fully describes the phenomenon taking into account the combined aspects of photochemistry, and photo-orientation and polymer science and polymers mechanics. This is an area of research that still needs investigations. From an experimental point of view, Photoisomerization was shown to enhance molecular mobility far below the glass transition temperature (T_g) of azo-polymers in the beginning of the past decade [26-29], and considerable exploration of sub-T_g photo-induced molecular movement was performed especially targeting polymer structural effects, including T_g, the free volume and free volume distribution, the mode of the attachment of the chromophore to a rigid or flexible chain, the molecular weight, and so on [7,8]. Light induced mass movement in azo polymers, i.e. surface relief gratings (SRGs) [28,29] triggered many studies to understand the mechanism of polymer migration, and most of the studies have focused on SRGs which are fabricated by the interference pattern of two coherent laser beams [28-30]. Both Photoorientation and surface reliefs can be induced by two-photon isomerisation as well [31-46].

Recently, azopolymer-based patterns have been used as templates for fabricating periodic arrays of, e.g., titanium dioxide [47-49], indium tin oxide [50], and metallic [51,52] nanostructures; a technology named as directional photofluidization lithography (DLP) developed by Lee et al [53,54]. This technology is based on irradiating, with an interference pattern, stripes (line array) of an azopolymer, prefabricated with a polymer mold – PDMS mold for example –, rather than a film. The irradiation conditions are arranged in a way that the photoinduced movement of the azopolymer extends to areas which are not covered with it thereby controlling the space, between the azopolymer features, available for evaporating a metal for example. Such technology is pretty much parenting to colloidal nanosphere lithography, with the exception that the space between the colloidal particles can be controlled by light in the case of DLP using azopolymers.

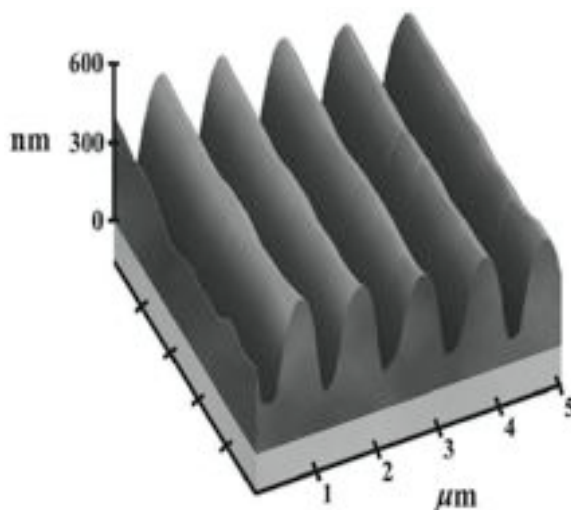


Figure 3: AFM image of a typical surface relief grating inscribed on an azo-polymer film displaying a grating amplitude of 300 nm. The original film thickness was 300 nm. Reproduced from [18]. Kravschenko et al [55], extended the concept of azopolymer-based nanofabrication to patterning of silicon by using photoinduced SRGs as lithographic masks. They fabricated large-area of silicon nanostructures with feature sizes on the order of 100 nm. The proposed fabrication technique is fast and straightforward, providing an attractive alternative to optical interference lithography based on conventional photoresists. Lithographic masks are made from azo-polymers rather than conventional photoresists. The phenomenon of induced photofluidization in azopolymers can be best understood by single beam induced surface deformations in the polymer; a feature which is discussed next together with the related nanopatterning capabilities.

2. Photomechanics and Photofluidization in azopolymers

2. 1. Far-field Patterning

Most of the SRGs on azopolymers are fabricated by the interference pattern of two coherent laser beams [28-30]. Yet, there are few reports on surface deformations that are induced by a single focused laser beam [56-58]. To fabricate deformation structures with high spatial resolution, a small irradiation spot is required; a feature which can be achieved by focusing the laser beam by using a high numerical aperture (N.A.) objective lens. Single beam induced surface deformations give a clear insight into the mechanism of photoinduced mass movement of the polymer. Figure 3 shows AFM images of the surface deformation induced by (a, b) linear and (c) circular polarizations on an azopolymer film PMA-DR1 (Fig. 4). The laser beam was focused on the film surface. Irradiation with linearly polarized light induced the deformation pattern shown in Fig. 4 (a) and (b). It is clearly shown in this figure that the polymer moved along the polarization direction from the centre to the outside of the focused spot, thus producing two side lobes along the polarization direction and a pit at the centre. Indeed this polarization-dependent deformation was confirmed by an experiment in which the polarization direction of the irradiation light was rotated through an angle of 90 degrees and the induced pattern followed the polarization of the light (see Fig. 4 (a) versus (b)). In contrast to irradiation with linear polarization, irradiation with circularly polarized light induced a deformation pattern in which the polymer moved from the centre to the outside of the focused laser spot, thus forming a doughnut shape pattern (Fig. 4 (c)).

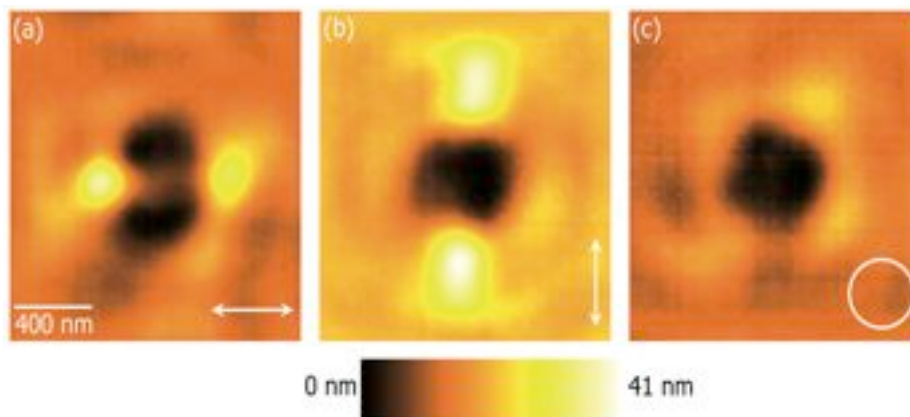


Figure 4: AFM images of the deformation induced by a tightly focused laser beam polarized (a) horizontally, (b) vertically, and (c) circularly, respectively. The irradiation intensity and the exposure time were 12.5 mW/cm^2 and 30 s, respectively, and the laser beam was focused on the film surface. The film was prepared by spin-casting from a chloroform solution. The remaining solvent was removed by heating the film for an hour at 100°C . Reproduced from [6].

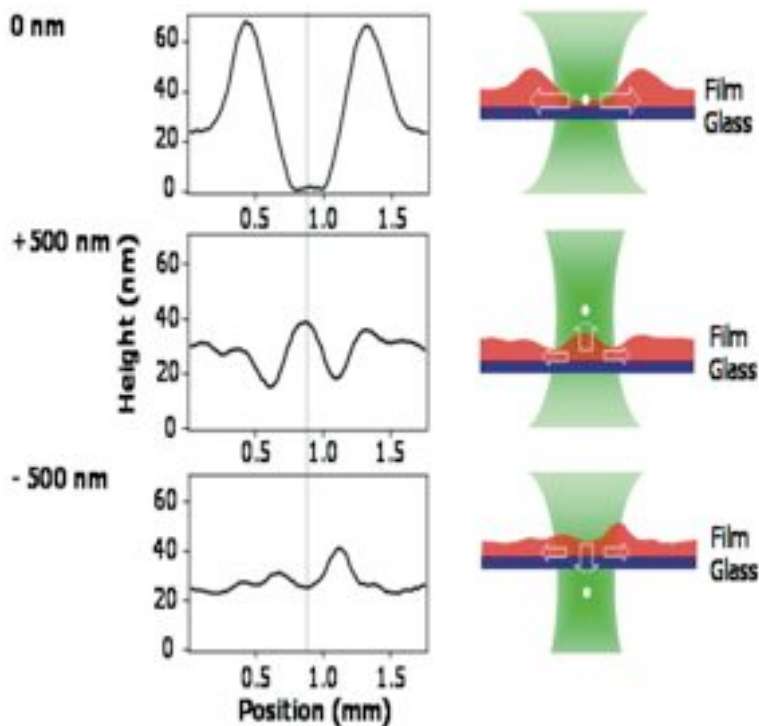


Figure 5: (Left column) Line plots of the surface deformation at (a) $Z = +500 \text{ nm}$, (b) $Z = 0 \text{ nm}$, and (c) $Z = -500 \text{ nm}$. The positions of the each plot correspond to the line scan of the surface structure. (Right column) Schematics describing the relationship between the z -position of the focus and the film surface. The azopolymer film is red and the cover glass is blue. The centre of the light beam, in green, is indicated by a white spot. The arrows oriented laterally and longitudinally in these schematics indicate the direction of the anisotropic photo-fluidity and the optical gradient force, respectively. Reproduced from [6].

The observed polarization dependence is consistent with the one obtained after irradiation with a low N.A. lens [56]. For both linear and circular polarizations, the polymer migrates in the direction of the light gradient from high to low light intensity regions, and the polarization dependence demonstrates that the light-induced polymer movement is anisotropically photo-fluidic [6]. When a laser beam is tightly focused by a high N.A. (~ 1.4) objective lens, the electric field component of the light along the polarization direction is predominant; e.g. 200 times larger than the in-plane component perpendicular to the polarization direction and 7 times larger than the component in the optical axis; e.g. the z component.

Besides the anisotropic photofluidity, experiments performed by us [6] proof the existence of an optical gradient force in polymer mass migration. In these experiments, the z -position of the focus was varied with respect to the film surface. When the z -position was just on the film surface ($z = 0$ nm), the deformation pattern was the same as the one shown in Fig 4 (a) or (b). It is interesting to note that at distances larger than 200 nm above the film surface in air, the polymer formed a protrusion coming out towards the center of the laser focus and suggesting the existence of a gradient force that pulls the polymer towards the region of maximum intensity (see Fig. 5). This is optical trapping of a viscoelastic polymer showing nanoelasticity over 20 nm; i.e. the maximum height of the protrusion obtained at $z = + 500$ nm. For z distances between 200 and 0 nm, the overlap of the laser intensity and the film are large enough to produce dips at the center as explained above. When the laser is focused into the glass substrate, there is no protrusion formed, because the polymer movement is blocked by the substrate.

The extent to which the polymer moves upon photoinduced mass movement is discussed next. For example, we found that the size of the photo-induced deformation depends on the intensity of the irradiation light and the exposure time [6]. The deformation patterns obtained at all intensities at all times of irradiation were the same for the same lens, but the size of the deformation was different. The height and the full width at half maximum (FWHM) of deformation pattern along the direction parallel to the light polarization depend on the irradiation intensity and the exposure time. The rate of the deformation of the height and FWHM decreased with the increasing irradiation dose and the higher the irradiation intensity, the faster the increase of both the height and FWHM. The height increases more rapidly than FWHM which needs more time to reach saturation. The height increases rapidly at small irradiation doses, and saturates at larger irradiation doses near 90 nm, a value which corresponds to the film thickness. The azopolymer kept moving with larger irradiation doses exceeding the mm range for a diffraction limited laser spot of 200 nm, a size which corresponds to the minimum FWHM of the fabricated pattern.

2. 2. Near-Field Patterning

The contribution of an optical gradient force to the photoinduced mass movement of the polymer can also be seen at nanopatterning by a nanosource of light generated at the apex of a silver coated AFM tip (Figure 6). Nanopatterning using near-field optical probes can be found in recent reviews [59,60]. Briefly, SPL provides a versatile set of tools for both manipulating and imaging the topography of a surface with atomic-scale resolution [61-64]. At present, these tools seem well suited for applications in research but will require substantial development before they can be used for patterning large areas in manufacturing. The most important SPL techniques include scanning tunneling microscopy (STM), AFM, and near-field scanning optical microscopy (NSOM).

A striking example of the potential of these techniques for nanoscale fabrication is the precise positioning of individual Fe atoms with an STM tip [65,66]. This atomic-scale manipulation is interesting scientifically but is not yet a practical technology. SPL can precisely position atoms on a surface and selectively deposit or remove regions of etch resist to pattern surfaces. These techniques may find applications in mask or device repair and information storage. Parallel approaches in SPL are being developed to overcome the serial limitations of standard SPL technologies. Nanofabrication by SPL is extensively reviewed elsewhere [62,64,67-70]; and in this report we only emphasize the use of SPL in nanopatterning azopolymers.

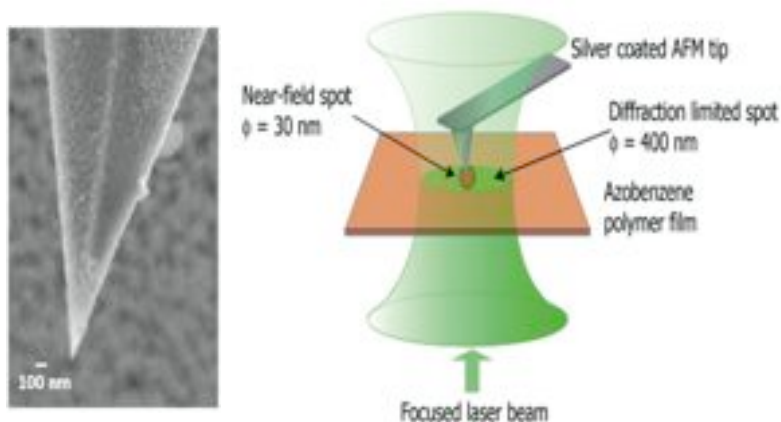


Figure 6: (Left) SEM image of the silver coated AFM tip. (Right) Schematic of the near-field surface deformation configuration. Reproduced from [74].

Nanopatterning of azopolymers by SPL has been studied by several authors [68-74]. Figure 6 shows AFM image of a surface deformation photoinduced on azopolymer film (PMA-DR1) with a silver coated AFM tip in a near field configuration as schematically depicted in Figure 6. The irradiation (3 mW/cm^2) was on the sample for 10 s; an irradiation dose which permitted fabrication by only the near field component of the light. Larger irradiation doses lead to lateral polymer migration due to the far field component of the light as discussed previously. With such a low irradiation dose; e.g. that corresponding to 3 mW/cm^2 and 10s of irradiation, the protrusion was induced only with the tip present inside the focused spot, and no deformation was induced when the tip was away from it. The height of the protrusion was found to be 7 nm, and the lateral size was less than the diffraction limited spot size, indicating that the surface deformation was induced by only the near-field component of the light. It is well known that the component of the electric field parallel to the tip axis (E_z) is effectively enhanced near the tip end due to the local surface plasmons [75].

The polymer under the tip is pulled by the optical gradient force which is generated by E_z [76, 77] and formed a nano protrusion. The nano light spot was placed just onto the film surface, and it was kept on it while the protrusion was being formed during irradiation. Here too, the film was pulled by the optical gradient force towards the nanosource of light; e.g. the tip end, much like the case of a tightly focused beam on top of the film (vide infra). The field enhancement effect due to the plasmonic metal tip allowed for the fabrication of near-field surface features with a light intensity which is as low as 3 mW/cm^2 .

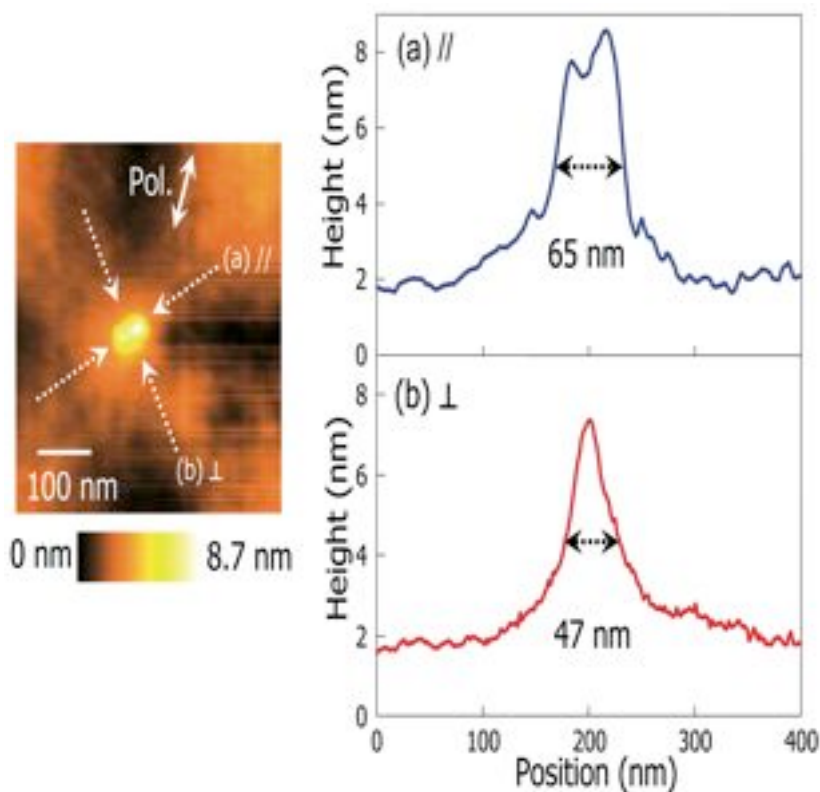


Figure 7: AFM image of the near-field surface deformation. The polarization direction and the scale bar are indicated. (a) and (b) show the line profiles in the directions near parallel and near perpendicular to the incident light polarization, respectively. The FWHMs of the surface deformation in the parallel and perpendicular directions are also indicated. Reproduced from [74].

Figure 7 shows that the long axis of the deformation pattern was along a direction which is, not quite, but near the parallel to the incident light polarization. This uniaxial anisotropic polymer movement suggests that the polymer moved along the polarization direction. The full width of half maximum of the protrusion was found to be 65 and 47 nm in the direction nearly parallel ($//$) and perpendicular (\perp) to the incident light polarization, respectively. Here too, the anisotropic photo-fluidity of the polymer tends to induce a polymer mass movement in the direction parallel to the incident light polarization [2]. This anisotropic polymer movement implies the presence under the tip end of a component of the electric field which is near the parallel to the polarization direction [74]. The azo-polymer helps map the electric field just at the tip apex. In fact, the fabricated feature which is due to E_x is much smaller than the one due to E_z and it confirms the well known phenomenon that only the longitudinal component E_z drives efficient oscillations of the surface plasmons polaritons at the metal tip and leads to a strong field enhancement, i.e., enhancement of E_z , at the tip apex [76].

3. Photogenerating work from polymers

The previous section shows that azopolymers can be moved by light irradiation over large distances; a mechanical work that is fuelled by the trans \leftrightarrow cis isomerisation cycling of azobenzene derivatives. Such molecules are in fact machines doing work by reversibly changing shape and size between an elongated trans form and a more globular cis form [78]. This shows that properties of a host material, such as mechanical properties, can be controlled by the change in shape of a guest photoactive unit. Such a chromophore for reversible shape change is the rhodopsin-retinal protein photo-switch system that enables vision can be found in nature. Perhaps the best artificial mimic of this strong photo-switching effect is that of azobenzene derivatives. Besides light induced mass movement, photoinduced contraction and bending can also generate work from azopolymers. Such light-sensitive systems may be referred to as light-energy transducers, and a nice review perspective about light to work transduction in photosensitive systems was recently published by White [79].

Light to work transduction, observed as uniaxial contraction/expansion cycles upon irradiation, was first observed by Angolini and Gay in the synthesis and photomechanical characterization of azobenzene functionalized aromatic polyimides; subsequently, a variety of novel synthetic efforts reported a number of materials capable of transducing light into mechanical work mostly based on azobenzene; although spiropyran and other photochromic moieties have been studied, either covalently attached or included as a guest in both glassy and elastomeric amorphous, semicrystalline, and liquid crystalline polymeric materials [80-87]. It is beyond the scope of this report to exhaustively review these materials and their subsequent photomechanical responses. Rather we will focus on contraction and bending effects leading to work in some liquid crystalline elastomers.

In azobenzene-functionalized liquid crystal polymer networks (azo-LCNs), photoinduced order-disorder transitions have been widely used to trigger uniaxial contraction of thin films or bending of cantilevers [88-108]. For example, White group [109] reported photomechanical response of cantilevers composed of acrylate-based glassy, polydomain azo-LCNs, observed in the bending of cantilevers, to irradiation from both UV and blue-green laser exposure as a function of linear polarization. Figure 8 shows the comparative photomechanical response of a representative azo-LCN material to irradiation with 375 nm and 442 nm light. Fig. 8 (a) shows the response to 442 nm irradiation (100 mW/cm²), and Fig. 8 (b) the response to 375 nm irradiation (50 mW/cm²).

The azo-NLC cantilever was identical for both experiments (5 mm x 1 mm x 15 mm : length, width, and thickness), and it was entirely covered by the irradiation light. In such a way that there is no gradient of light at the film sample, and consequently no surface relief created. The cantilever is originally vertical (Fig. 8 (a)-i). Upon irradiation with 442 nm light polarized parallel to the long axis ($E \parallel x$) of the cantilever, the cantilever bends approximately 21° into the direction of the incident exposure (Fig. 8 (a)-ii). When the polarization direction of the incident 442 nm irradiation is rotated such that it is orthogonal to the long axis of the cantilever ($E \perp x$), the direction of the cantilever reverses to approximately -22° (Fig. 8(a)-iv). Irradiation of glassy azo-LCN materials with 442 nm fixes the material in temporary shapes. This Optical fixing is evident in Fig. 8 (a)-iii and 8 (a)-v upon removal of the 442 nm irradiation and can retain this temporary state for many months.

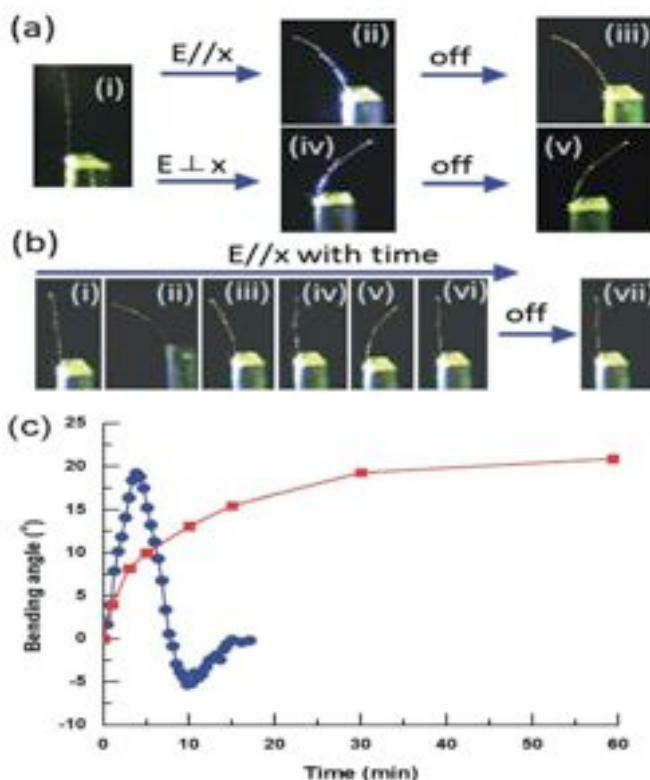


Figure 8: (a) Polarization-controlled forward and reverse bending in a PD20CL-80CL cantilever. i) Before exposure, ii) after exposure to 100 mWcm² 442 nm light polarized parallel to the long axis of the cantilever ($E//x$), iii) shape fixing observed one hour after removal of irradiation, iv) after exposure of i) or ii) to 100 mWcm² 442 nm light polarized orthogonal to the long axis of the cantilever ($E \perp x$), and v) shape fixing observed one hour after removal of irradiation. (b) Bending observed in PD20CL-80CL cantilever upon exposure to 50 mWcm² 375 nm light polarized parallel to the long axis of the cantilever. i) Before exposure, ii–vi) during UV exposure, vii) 16 h after exposure. (c) The temporal response for bending of the cantilevers observed upon exposure to 375 nm (blue disk) and 442 nm (red square) with $E//x$ is summarized. Reproduced from [101].

Fig. 8 (b) shows the response to 375 nm light polarized parallel to the long axis of the cantilever ($E//x$). As apparent in Fig. 6 (b)-ii, the cantilever initially bends to a large angle. The directionality and magnitude of the bending is initially similar to that of 442 nm irradiation evident in Fig. 8(a)-ii. However, upon continued irradiation to 375 nm the magnitude of the bending angle of the cantilever lessens and eventually reverses before eventually returning to the original vertical position (images in Fig. 8(b)-ii–vi). In contrast to the optical fixing observed to 442 nm irradiation, if the UV light is shuttered after the cantilever is bent to Fig. 8 (b)-ii the magnitude of the bending gradually lessens over approximately 16 h eventually restoring the film to the original vertical position (Fig. 8(b)-vii). Fig. 8(c) directly compares the temporal response of the cantilever to 375 nm and 442 nm irradiation. Clearly, the responses observed at both irradiation wavelength mirror the photochemical reaction; e.g. while 375 nm irradiation depletes the trans isomer leaving the surface of cantilever facing the irradiation light with cis content mostly, and 442 nm reaction in both directions occur [110,114]. The bending and contraction occur in such a films because the actinic light is absorbed only in the top fraction of the film cantilever (15 nm thick), thereby creating a gradient of mechanical properties of the film in the direction perpendicular to the film thickness; e.g. the mechanical properties of one side of the film become different from those of the other side under light irradiation.

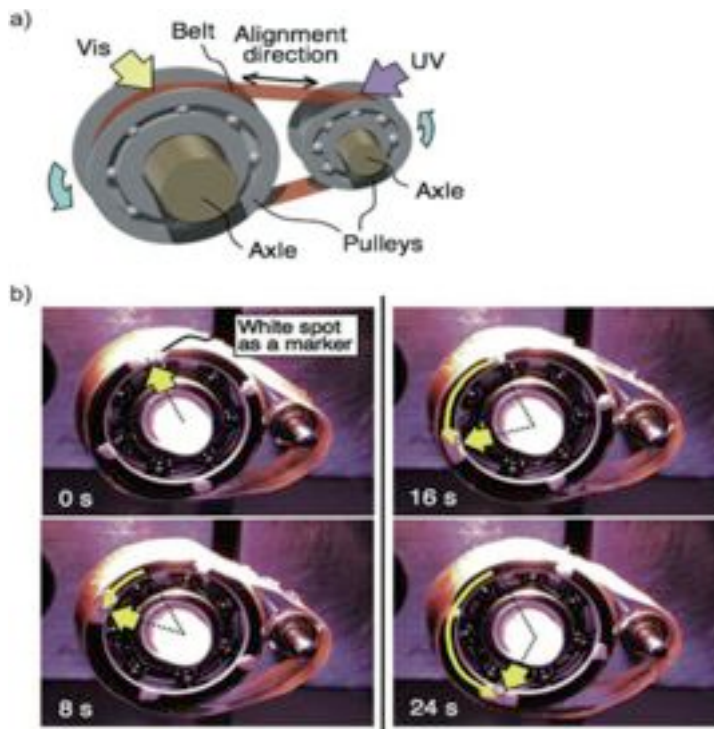


Figure 9: A light-driven plastic motor with the LCE laminated film. a) Schematic illustration of a light-driven plastic motor system used in this study, showing the relationship between light irradiation positions and a rotation direction. b) Series of photographs showing time profiles of the rotation of the light-driven plastic motor with the LCE laminated film induced by simultaneous irradiation with UV (366 nm, 240 mW/cm²) and visible light (>500 nm, 120 mW/cm²) at room temperature. Diameter of pulleys: 10 mm (left), 3 mm (right). Size of the belt: Length: 36 mm; width: 5.5 mm. Thickness of the layers of the belt: PE, 50 mm; LCE, 18 mm. Reproduced from [111].

Taking advantage of photoinduced changes of the mechanical properties of azopolymers, Ikeda group [111] have developed a motor, based on a plastic liquid crystalline elastomer (LCE) containing an azobenzene derivative, that can convert light energy into mechanical work (Figure 9). A motor device converts input energy directly into a continuous rotation. A plastic belt of the LCE laminated film was prepared by connecting both ends of the film, and then placed the belt on a custom made pulley system as illustrated in Figure 9a. By irradiating the belt with UV light from top right and visible light from top left simultaneously, the belt rotated to drive the two pulleys in a counterclockwise direction at room temperature (Figure 9b). The machine, e.g. motor was driven by contraction and expansion forces due to UV and visible light irradiation, respectively. Upon exposure to UV light, a local contraction force is generated at the irradiated part of the belt near the right pulley along the alignment direction of the azobenzene mesogens, which is parallel to the long axis of the belt. This contraction force acts on the right pulley, leading it to rotate in the counterclockwise direction. At the same time, the irradiation with visible light produces a local expansion force at the irradiated part of the belt near the left pulley, causing a counterclockwise rotation of the left pulley. These contraction and expansion

forces produced simultaneously at the different parts along the long axis of the belt give rise to the rotation of the pulleys and the belt with the same direction. The rotation then brings new parts of the belt to be exposed to UV and to visible light, which enables the motor system to rotate continuously. Reverse rotation of this belt could also be induced just by changing the irradiation positions of the UV and visible light.

4. Outlook and Conclusions

Azopolymers have the ability to be structured by light, and photo-induced mass movement in azo-polymers and photo-induced change in their mechanical properties, discussed in this report, bring about quite exciting applications such as generating work from soft materials, a property that could be exploited in possible future generation of smart materials. The azo-polymer option as a photosensitive material for nanopatterning is starting to emerge and there are lots of intriguing, albeit, highly important issues to be studied related to creating work by light from such polymers. It is worth noting that the impressive resolution, beyond the diffraction limit of light, obtained by laser writing in photoresists could open new avenues in diffraction unlimited photo-structuring in azopolymers.

5. References

- [1] Z. Sekkat, W. Knoll, *Photoreactive Organic Thin Films* (Academic Press, USA, 2002).
- [2] Z. Sekkat, S. Kawata, *Laser Photonics Rev.* 8, No. 1, 1-26 (2014).
- [3] C. Hubert, A. Rumyantseva, G. Lerondel, J. Grand, S. Kostcheev, L. Billot, A. Vial, R. Bachelot, P. Royer, S-H Chang, S. K. Gray, G. P. Wiederrecht, and G. C. Schatz, *Nano Lett.* 5, 615-619 (2005).
- [4] Y. Gilbert, R. Bachelot, A. Vial, G. Lerondel, P. Royer, A. Bouhelier, and G. P. Wiederrecht, *Opt. Express* 13, 3619-3624 (2005).
- [5] P. Karageorgiev, D. Neher, B. Schulz, B. Stiller, U. Pietsch, M. Giersig, and L. Brehmer, *Nature Materials* 4, 699-703 (2005).
- [6] H. Ishitobi, M. Tanabe, Z. Sekkat and S. Kawata, *Opt. Express* 15, 652-659 (2007).
- [7] Z. Sekkat, Chapter 3 in ref. [1], and references therein
- [8] Z. Sekkat, D. Yasumatsu, and S. Kawata, *J. Phys. Chem. B* 106, 12407-12417 (2002).
- [9] Z. Sekkat, J. Wood, W. Knoll, W. Volksen, R. D. Miller and A. Knoesen, *J. Opt. Soc. Am. B* 14(4), 829-833 (1997).
- [10] Z. Sekkat, J. Wood, E. F. Aust, W. Knoll, W. Volksen and R. D. Miller, *J. Opt. Soc. Am. B*, 13(8), 1713-1724 (1996).
- [11] P. Lefin, C. Fiorini, J. M. Nunzi, *Opt. Mater.* 9, 323-328 (1998).
- [12] Lefin, P.; Fiorini, C.; Nunzi, J. M. *Pure Appl. Opt.* 7, 71 (1998).
- [13] Pedersen, T. G.; Johansen, P. M. *Phys. Rev. Lett.* 79, 2470 (1997).
- [14] Pedersen, T. G.; Johansen, P. M.; Holme, N. C. R.; Ramanujam, P. S.; Hvilsted, S. *Phys. Rev. Lett.* 80, 89 (1998).
- [15] F. L. Labarthe, J. L. Bruneel, T. Buffeteau, and C. Sourisseau, *J. Phys. Chem. B* 108, 6949 (2004).
- [16] A. Natansohn and P. Rochon, Chapter 13 in ref. [1], 400-423, and references therein.

- [17] O. N. Oliveira, L. Li, J. Kumar, and S. Tripathy, Chapter 14 in ref. [210], 430-480, and references therein.
- [18] Yager, K. G.; Barrett, C. J. *J. Chem. Phys.* 120, 1089 (2004).
- [19] Kumar, J.; Li, L.; Jiang, X. L.; Kim, D. Y.; Lee, T. S.; Tripathy, S. *Appl. Phys. Lett.* 72, 2096 (1998).
- [20] M. Saphiannikova, T.M. Geue, O. Henneberg, K. Morawetz, U. Pietsch, *J. Chem. Phys.* 120, 4039 (2004).
- [21] C.J. Barrett, A.L. Natansohn, P. L.; Rochon, J. *Phys. Chem* 100, 8836 (1996).
- [22] C.J. Barrett, P.L. Rochon, A.L. Natansohn, *J. Chem. Phys.* 109, 1505 (1998).
- [23] N. C. R. Holme, L. Nikolova, S. Hvilsted, P.H. Rasmussen, R. H.; Berg, P.S. Ramanujam, *Appl. Phys. Lett.* 74, 519 (1999).
- [24] K. G. Yager, C. J. Barrett, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 5, 487 (2001).
- [25] K. G. Yager, C. J. Barrett, *Macromolecules* 39, 9320-9326 (2006).
- [26] Z. Sekkat and M. Dumont, *Appl. Phys. B* 54, 486-489 (1992).
- [27] F. Charra, F. Kajzar, J. M. Nunzi, P. Raimond, and E. Idiart, *Opt. Lett.* 18, 941-943 (1993).
- [28] P. Rochon, E. Batalla, and A. Natansohn, *Appl. Phys. Lett.* 66, 136-138 (1995).
- [29] D. Y. Kim, S. K. Tripathy, L. Li, and J. Kumar, *Appl. Phys. Lett.* 66, 1166-1168 (1995).
- [30] A. Natansohn, P. Rochon, *Chem. Rev.* 102, 4139 (2002).
- [31] Z. Sekkat, H. Ishitobi, and S. Kawata, *Opt. Commun.* 222, 269-276 (2003).
- [32] Z. Sekkat, *Opt. Commun.* 229, 291-303 (2004).
- [33] Z. Sekkat, *J. Opt. Soc. Am B* 27(1), 132-140 (2010).
- [34] H. Ishitobi, Z. Sekkat, and S. Kawata, *J. Chem. Phys.* 125, 164718 (2006).
- [35] H. Ishitobi, Z. Sekkat, and S. Kawata, *J. Opt. Soc. Am B* 23, 868-873 (2006).
- [36] X. Li, J.W.M. Chon, R.A. Evans, and M. Gu, *Appl. Phys. Lett.* 92, 063309 (2008).
- [37] D. Gindre, I. Ka, A. Boeglin, A. Fort, and K.D. Dorkenoo, *Appl. Phys. Lett.* 90, 094103 (2007).
- [38] D. Gindre, A. Boeglin, A. Fort, L. Mager, and K.D. Dorkenoo, *Opt. Express* 14, 9896-9901 (2006).
- [39] D. Gindre, A. Boeglin, G. Taupier, O. Crégut, J.-P. Vola, A. Barsella, L. Mager, A. Fort, and K.D. Dorkenoo, *J. Opt. Soc. Am. B* 24, 532-537 (2007).
- [40] C.R. Mendonça, U.M. Neves, L. De Boni, A.A. Andrade, D.S. dos Santos Jr., F.J. Pavinatto, S.C. Zilio, L. Misoguti, O.N. Oliveira Jr, *Opt. Commun.* 273, 435-440 (2007).
- [41] S. Liu, K.S. Lin, V.M. Churikov, Y.Z. Su, J.T. Lin, T.-H. Huang, and C.C. Hsu, *Chem. Phys. Lett.* 390, 433-439 (2004).
- [42] N.D. Lai, W.L. Wang, J.H. Lin, and C.C. Hsu, *Appl. Phys. B* 80, 569-572 (2005).
- [43] S.W. Magennis, F.S. Mackay, A.C. Jones, K.M. Tait, and P.J. Sadler, *Chem. Mater. B* 17, 2059-2062 (2005).
- [44] C.C. Corredor, K.D. Belfield, M.V. Bondar, O.V. Przhonska, F.E. Hernandez, and O.D. Kachkovsky, *J. Photochem. Photobio. A* 184, 177-183 (2006).

- [45] Y. Jung, V.M. Kozenkov, S.A. Magnitskii, and N.M. Nagorskii, *Quantum Electronics* 36, 1056-1057 (2006).
- [46] K.D. Belfield, M.V. Bonder, C.C. Corredor, F.E. Hernandez, O.V. Przhonska, and S. Yao, *ChemPhysChem* 7, 2514-2519 (2006).
- [47] A.M. Dubrovkin, Y. Jung, V.M. Kozenkov, S.A. Magnitskii, and N.M. Nagorskiy, *Laser Phys. Lett.* 4, 275-278 (2007).
- [48] M. Kim, B. Kang, S. Yang, C. Drew, L. A. Samuelson, J. Kumar, *Adv. Mater.* 18, 1622 (2006).
- [49] S. S. Kim, C. Chun, J.-C. Hong, D.-Y. Kim, *J. Mater. Chem.* 16, 370 (2006).
- [50] K. Nishizawa, S. Nagano, T. Seki, *J. Mater. Chem.* 19, 7191 (2009).
- [51] S. Yang, K. Yang, L. Niu, R. Nagarajan, S. Bian, A. K. Jain, J. Kumar, *Adv. Mater.* 16, 693 (2004).
- [52] S. Lee, J. Shin, Y.-H. Lee, S. Fan, J.-K. Park, *Nano Lett.* 10, 296 (2010).
- [53] S. Lee, J. Shin, Y.-H. Lee, J.-K. Park, *ACS Nano* 4, 7175 (2010).
- [54] H-S Kang, S. Lee, J-K Park, *Adv. Funct. Mater.* 21, 4412 (2011).
- [55] A. Kravchenko, A. Shevchenko, V. Ovchinnikov, A. Priimagi, M. Kaivola, *Adv. Mater.* 23, 4174-4177 (2011).
- [56] S. Bian, J. M. Williams, D. Y. Kim, L. Lin, S. Balasubramanian, J. Kumar and S. Tripathy, *J. Appl. Phys.* 86, 4498-4508 (1999).
- [57] Y. Gilbert, R. Bachelot, P. Royer, A. Bouhelier, G. P. Wiederrecht, and L. Novotny, *Opt. Lett.* 31, 613-615 (2006).
- [58] T. Grosjean and D Courjon, *Opt. Express* 14, 2203-2210 (2006).
- [59] A. A. Tseng, *Optics & Laser Technology* 39, 514-526 (2007).
- [60] E. McLeod, A. Ozcan, *Journal of Laboratory Automation* 17 (4), 248-254 (2012).
- [61] D.S. Ginger, H. Zhang, C.A. Mirkin, *Angew. Chem., Int. Ed.* 43, 30 (2004).
- [62] S. Kraemer, R.R. Furerer, C.B. Gorman, C. B. *Chem. Rev.* 103, 4367 (2003).
- [63] R.M. Nyffenegger, R. M. Penner, *Chem. Rev.* 97, 1195 (1997).
- [64] D. Wouters, U.S. Schubert, *Angew. Chem., Int. Ed.* 43, 2480 (2004).
- [65] D.M. Eigler, E.K. Schweizer, *Nature* 344, 524 (1990).
- [66] M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler, *Science* 262, 218 (1993).
- [67] K. Wilder, H.T. Soh, A. Atalar, C.F. Quate, *Rev. Sci. Instrum.* 70, 2822 (1990).
- [68] S. Davy and M. Spajer, *Appl. Phys. Lett.* 69, 3306-3308 (1996).
- [69] T. Fukuda, K. Sumaru, T. Kimura, H. Matsuda, Y. Narita, T. Inoue, and F. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, L900-L902 (2001).
- [70] S. Patanè, A. Arena, M. Allegrini, L. Andreozzi, M. Faetti, and M. Giordano, *Opt. Commun.* 210, 37-41 (2002).
- [71] F. Iwata, K. Kobayashi, A. Sasaki, Y. Kawata, C. Egami, O. Sugihara, M. Tuchimori and O. Watanabe, *Nanotechnology* 13, 138-142 (2002).
- [72] R. Bachelot, F. H'Dhili, D. Barchiesi, G. Lerondel, R. Fikri, P. Royer, N. Landraud, J. Peretti, F. Chaput G. Lampel, J-P. Boilot, and K. Lahlil, *J. Appl. Phys.* 94, 2060-2072 (2003).
- [73] Y. Gillbert, R. Fikri, A. Ruymantseva, G. Lerondel, R. Bachelot, D. Barchiesi, and P. Royer, *Macromolecules* 37, 3780-3791 (2004).
- [74] H. Ishitobi, M. Tanabe, Z. Sekkat and S. Kawata, *Appl. Phys. Lett.* 91, 091911 (2007).

- [75] Y. Inouye, and S. Kawata, *Opt. Lett.* 19, 159-161 (1994).
- [76] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, *Opt. Lett.* 11, 288-290 (1986).
- [77] L. Novotny, R. X. Bian, and X. S. Xie, *Phys. Rev. Lett.* 79, 645-648 (1997).
- [78] H. Rau, Chapter 1 in ref. [1], and references therein.
- [79] T. J. White, *J Pol Sci B: Pol Phys* 50, 877-880 (2012).
- [80] R. Lovrien, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 57, 236-242 (1967).
- [81] F. Agolini, F. P. Gay, *Macromolecules* 3, 349-351 (1970).
- [82] G. Van der Veen, W. Prins, *Nature (London)* 230, 70-72 (1971).
- [83] L. Matejka, K. Dusek, M. Ilavsky, *Polym. Bull.* 1, 659-664 (1979).
- [84] E. K. Zimmerman, J. K. Stille, *Macromolecules* 18, 321-327 (1985).
- [85] C. D. Eisenbach, *Polymer* 21, 1175-1179 (1980).
- [86] H. Finkelmann, E. Nishikawa, G. G. Pereira and M. Warner, *Phys. Rev. Lett.* 87(1), 015501 (2001).
- [87] Yu, Y.; Nakano, M.; Ikeda, T. *Nature* 425, 145 (2003).
- [88] E. M. Terentjev, M. Warner, *Liquid Crystal Elastomers*; Oxford University Press: Oxford, UK, 2003.
- [89] M. Warner and L. Mahadevan, *Phys. Rev. Lett.* 92(13), 134302 (2004).
- [90] D. Corbett and M. Warner, *Phys. Rev. Lett.* 96(23), 237802 (2006).
- [91] D. Corbett and M. Warner, *Phys. Rev. Lett.* 99, 174302 (2007).
- [92] D. Corbett, C. L. van Oosten and M. Warner, *Phys. Rev. A: At., Mol., Opt. Phys. B*, 78(1), 013823 (2008).
- [93] D. Corbett and M. Warner, *Phys. Rev. E* 77(5-1), 051710 (2008).
- [94] Y. Yu, M. Nakano, A. Shishido, T. Shiono, T. Ikeda, *Chem. Mater.* 16, 1637-1643 (2004).
- [95] M. Yamada, M. Kondo, R. Miyasato, Y. Naka, J-I Mamiya, M. Kinoshita, A. Shishido, Y. Yu, C. J. Barrett, T. Ikeda, *J. Mater. Chem.* 19, 60-62 (2009).
- [96] R. Yin, W. Xu, M. Kondo, C.-C. Yen, J. J. Mamiya, T. Ikeda, Y. Yu, *J. Mater. Chem.* 19, 3141-3143 (2009);
- [97] K. D. Harris, R. Cuypers, P. Scheibe, C.L. van Oosten, C.W.M. Bastiaansen, J. Lub, D. J. Broer, *J. Mater. Chem.* 15, 5043-5048 (2005).
- [98] C.L. van Oosten, K.D. Harris, C.W.M. Bastiaansen, D.J. Broer, *Eur. Phys. J.* 23, 329-336 (2007).
- [99] C.L. van Oosten, D. Corbett, D. Davies, M. Warner, C.W.M. Bastiaansen, D.J. Broer, *Macromolecules* 41, 8592-8596 (2008);
- [100] C.L. van Oosten, C.W.M. Bastiaansen, D.J. Broer, *Nat. Mater.* 8, 677-682 (2009).
- [101] K.M. Lee, N.V. Tabiryan, T.J. Bunning, T.J. White, *J. Mater. Chem.* 22, 691-698 (2012).
- [102] K.M. Lee, M.L. Smith, H. Koerner, N. Tabiryan, R.A. Vaia, T.J. Bunning, T. J. White, *Adv. Funct. Mater.* 15, 2913 (2011).
- [103] S. Serak, N. Tabiryan, T.J. White, R.A. Vaia, T.J. Bunning, *Soft Matter* 6, 779-783 (2010).
- [104] T.J. White, S.V. Serak, N.V.; Tabiryan, R.A. Vaia, T.J. Bunning, *J. Mater. Chem.* 19, 1080-1085 (2009).

- [105] T.J. White, N.Tabiryan, V.P. Tondiglia, S. Serak, U. Hrozhyk, R.A. Vaia, T.J. Bunning, *Soft Matter* 4, 1796–1798 (2008).
- [106] K.M. Lee, H. Koerner, R.A. Vaia, T. Bunning, T. J. White, *Soft Matter* 7, 4318–4324 (2011).
- [107] K.M. Lee, H. Koerner, R.A. Vaia, T.J. Bunning, T. J. White, *Macromolecules* 43, 8185–8190 (2010).
- [108] N. Tabiryan, S. Serak, X.-M. Dai, T. Bunning, *Opt. Express* 13, 7442–7448 (2005).
- [109] K. M. Lee, N. V. Tabiryan, T. J. Bunning, T. J. White, *J. Mater. Chem.* 22, 691 (2012).
- [110] Z. Sekkat, J. Wood and W. Knoll, *J. Phys. Chem.* 99 (47), 17226–17234 (1995).
- [111] M. Yamada, M. Kondo, J.-I. Mamiya, Y. Yu, M. Kinoshita, C. J. Barrett and T. Ikeda, *Angew. Chem., Int. Ed.* 47(27), 4986-4988 (2008).
- [112] S. Maruo and J. T. Fourkas, *Laser Photonics Rev.* 2, 100-111 (2008).
- [113] S. H. Park, D. Y. Yang, and K. S. Lee, *Laser Photonics Rev.* 3, 1-11 (2009).
- [114] J. Fisher and M. Wegener, *Laser Photonics Rev.* 7, 22-44 (2013).

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DE QUELQUES SYSTÈMES EXOTIQUES MONO ET TRIDIMENSIONNELS

Pr. Mohamed BELAICHE

*Ecole Normale Supérieure - Rabat
Membre correspondant, Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*



Résumé

Ces dernières années les nanomatériaux et les matériaux nanostructurés, ont suscité un grand intérêt pour la communauté scientifique, et nécessitent une collaboration interdisciplinaire, car ils présentent de nouveaux concepts fondamentaux et des applications futures en matière des nanosciences et nanotechnologies. Ils présentent souvent des propriétés nouvelles et améliorées par rapport à leurs homologues massifs. Leurs nouvelles propriétés peuvent également être adaptées, modulées et orientées pour des applications spécifiques. Ainsi on a pu mettre en évidence des édifices moléculaires monodimensionnels pour des explorations à la fois scientifiques et technologiques, de même un modèle analytique original a été établie pour la première fois afin d'interpréter leurs propriétés magnétiques. Ces édifices moléculaires appelés matériaux exotiques, présentent des propriétés spécifiques appartenant à la fois aux systèmes 1D et 2D. Signalons aussi que dans ces systèmes, la topologie des réseaux et la compétition entre interactions concurrentes joue un rôle crucial dans la détermination des comportements magnétiques originaux, telle que la frustration ou bien un comportement ferrimagnétique similaire à celui des grenats ferrimagnétiques.

Les oxydes magnétiques représentent une large classe de matériaux qui ont un large éventail de structures cristallines et propriétés physiques. L'étude des propriétés magnétiques ou ferroélectriques, et, plus récemment, les propriétés multiferroïques ont suscité un intérêt considérable. Dans ce sens notre travail a été conduit, en partie, par le développement de nouvelles nanostructures d'oxydes multifonctionnelles dopés par des terres rares, ayant des propriétés physiques (électriques, magnétiques et mécaniques) spécifiques pour des applications intéressantes.

Session Parallèle 5 :
Physique, Sciences de la terre
et de l'environnement

Modérateur : Pr. Ahmed El Hassani
Rapporteur : Pr. Driss Ouazar

FROM THE ATLAS TO THE RIF A CRUSTAL SEISMIC IMAGE ACROSS MOROCCO

*Pr. Ramon CARBONELL¹, Pr. Puy AYARZA²,
Pr. Josep GALLART¹, Pr. Jordi DIAZ¹,
Pr. Mimoun HARNAFI³, Pr. Ahmed EL HASSANI³,
Pr. Alan LEVANDER⁴, Pr. Antonio TEIXELL⁵*

- 1. Institute of Earth Sciences, 'Jaume Almera', CSIC, 08028, Barcelona, Spain, e-mail : Ramon.carbonell@csic.es*
- 2. Department of Geology, Salamanca University, 37008, Spain.*
- 3. Institut scientifique, université Mohammed V Agdal, Rabat, Morocco. e-mail : ahmed.elhassani@gmail.com*
- 4. Department of Earth Sciences, Rice University, Houston, Texas, 77005-USA.*
- 5. Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Spain*



Pr. Ramon CARBONELL

Abstract

The velocity structure of the crust and the topography of the Moho across Morocco has been the main target of two recently acquired wide-angle seismic reflections transects. One is the SIMA experiment which provided seismic constraints beneath the Atlas Mountains and the second has been the RIFSEIS experiment which sampled the RIF orogen. Jointly this controlled source wide-angle seismic reflection data results in an almost 700 km, seismic profile going from the Sahara craton across the High and Middle Atlas and Rif Mountain till the Alboran. Current work on the interpretation of the seismic data-set is based on forward modeling, ray-tracing, as well as low fold wide-angle stacking. The data has resulted in a detailed crustal structure and velocity model for the Atlas Mountains and a 700 km transect revealing the irregular topography of the Moho beneath these two mountain orogens. Results indicate that the High Atlas features a moderate crustal thickness and that shortening is resolved at depth through a crustal root where the Saharan crust under-thrusts below the Moroccan crust, defining a lower crust imbrication which locally places the Moho boundary at, approximately, 40 km depth. The P-wave velocity model is characterized in averaged, by relatively low velocities. These low deep crustal velocities together with other geophysical observables such as: conductivity estimates derived from Mt measurements; moderate Bouguer gravity anomaly; surface exposures of recent alkaline volcanics; lead the interpretation to propose that partial melts are currently emplaced in the deep crustal levels and in the upper mantle. The Moho discontinuity defines a crust which is in average relatively thin beneath the Atlas which is almost a 4000 m high orogenic belt. The resulting model supports existence of mantle upwelling as a possible mechanism that contributes, significantly, to maintain the High Atlas topography.

Introduction

The Rif is considered to be part of one of the tightest orogenic arc on Earth, the Betic-Rif [Platt et al., 2013]. This orogen jointly with the Alboran domain (the extensional hinterland) can be considered most probably as a unique continental boundary zone where a range of complex tectonic processes, difficult to assess by rigid-plate tectonic collisional deformation.

Ziegler et al., [1995] describes the Moroccan Atlas Mountains as an intra-continental orogenic belt located near the diffuse Africa-Eurasia plate boundary. The geologic data suggests that the orogenic shortening is relatively low to moderate across the Atlas Mountains [Teixell et al., 2003]. Its topography reaches altitudes over 4000 m which is in excess of that expected from crustal thickening estimations [Teixell et al., 2003]. These characteristics coupled with: high heat flow, moderate negative Bouguer anomaly values and, an Eocene to recent alkaline volcanism make of this mountain range an intriguing orogenic belt. Therefore the Atlas has been the target of numerous studies in Earth Sciences since early 60's, including : Choubert and Faure-Muret, 1962; Mattauer et al., 1977; Schaer, 1987; Laville , 1988; Jacobshagen et al., 1988; Laville and Pique', 1992; Beauchamp et al., 1996,1999; Frizon de Lamotte et al., 2000; Gomez et al., 2000.

These seismic cristal structures of Morocco, including the topography of the crust-mantle boundary constitute the missing knowledge required to address the numerous geologic and tectonic questions that are still unresolved and, affect this unique continental collision zone between the African and European continents. The topography of the crust mantle boundary is an asset for our understanding of how the Earth system evolves and results in present day topography [Carbonell et al., 2013]. The RIFSEIS and SIMA seismic experiments (Fig. 1) aim to acquire the necessary controlled source seismic data to achieve this key objective.

Geological and Geophysical setting

The collision zone between Africa and Europe in the Western Mediterranean includes two characteristic orogens, the Betic-Rif system and the Atlas Mountains. Plat et al., [2013] provides a detail overview of the complexity and characteristics of the Betic-Rif and Alboran system. With respect to the Atlas Mountains they form a ~2000 km long (East-West oriented) intra-continental orogenic belt located to the south of the Rif system. The Atlas features two western branches in Morocco the High and Middle Atlas, which correspond to Mesozoic extensional basins related to the opening of the Atlantic and Tethys oceans, and later inverted as a consequence of the Cenozoic-to-present convergence between Europe and Africa. In the High and Middle Atlas, there are evidences that shortening was mainly achieved by thick-skinned thrusting and folding affecting the pre-Mesozoic basement and the Mesozoic–Cenozoic cover. Thin-skinned thrusting usually played a minor role and appears related to basement under-thrusting. Teixell et al [2003], report that the total shortening due to Cenozoic compression in the central High Atlas varies between 15% in the west to 24% to the east. The Middle Atlas has also a simple structure in which variations in the structural elevation of the Mesozoic beds suggests that basement is involved in the deformation, and shortening is <10%.

The Moroccan Atlas also hosts Cenozoic to Quaternary alkaline to peralkaline magmatism, synchronous with the compression. Geochemical data obtained from Quaternary lavas indicates the existence of a depleted asthenosphere that interacted with the mantle lithosphere.

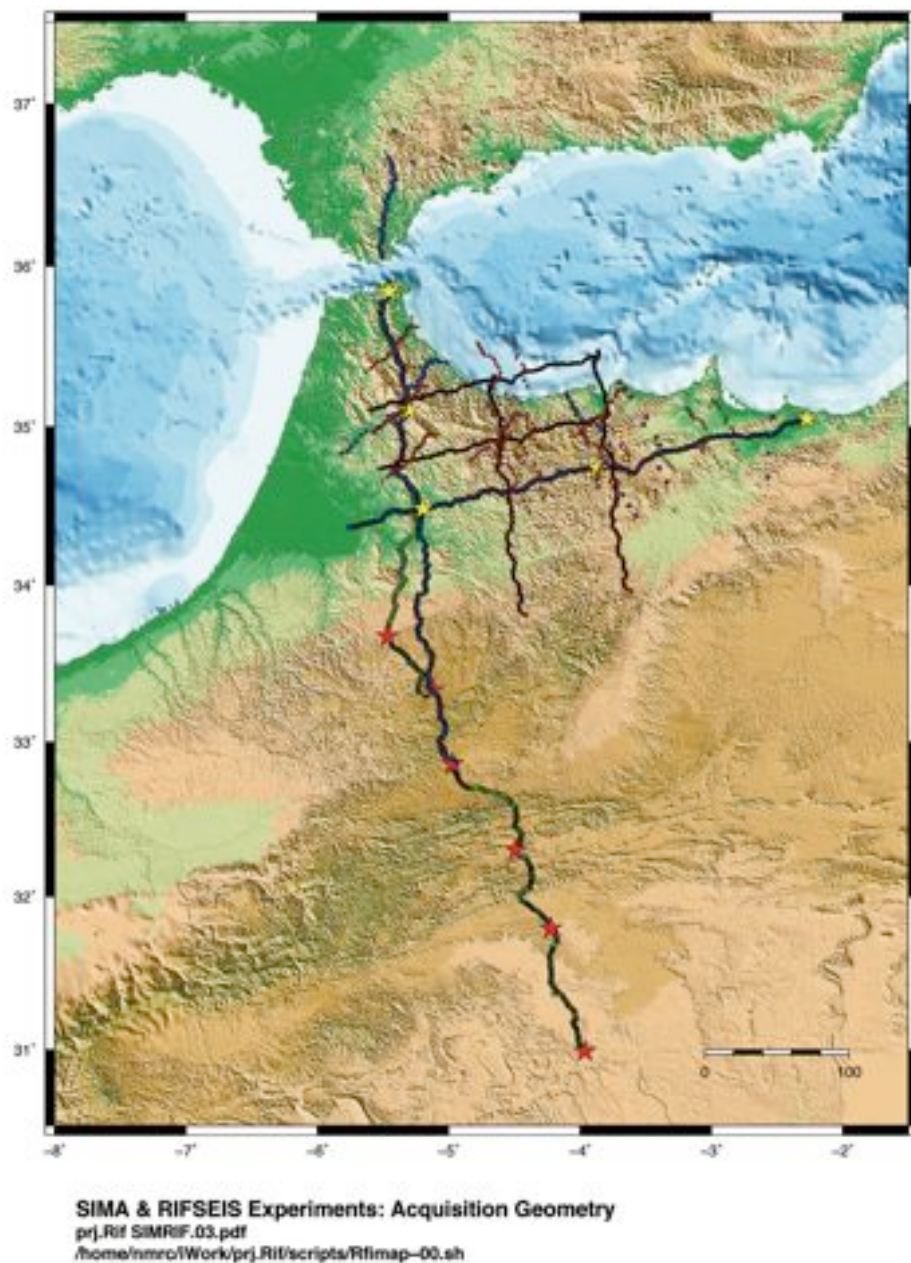


Figure 1: Geometry of the RIFSEIS and SIMA wide-angle seismic reflection experiments. Shot point locations are indicated by stars: Yellow stars correspond to the RIFSEIS and red stars to the SIMA projects. The green and blue dots indicate the location of the seismic recorders for the SIMA and RIFSEIS experiments, respectively. The red dots indicate the CMP (Common mid points) used for the low-fold wide-angle stacks.

This magmatism has similar petrology and signature as that of the Canary Islands and accordingly, a common source for both of them has been proposed. Relatively high heat flow values occur in Morocco, ranging between 40-100 mWm², and are in agreement with these observations, and even though they do not necessarily represent a hot mantle, a 50 km thick lithosphere was proposed by Ramdani (1998) to explain values of 86 mWm² in the southern High Atlas.

The first estimations of the thickness of the Atlas crust were made from low resolution refraction and wide-angle reflection data acquired in the 70's [Wigger et al., 1992, Giese and Jacobshagen 1992]. Bouguer gravity anomaly data has been modeled along two transects that cross the eastern and central High Atlas [Ayarza et al., 2005], the former being coincident with part of the seismic line here described. In the easternmost section, the Moho seems to be deepest towards the north of the peak altitudes of the High Atlas, thus evidencing the relative misfit between the Bouguer anomaly data and the topography, which is also manifested in a general positive isostatic anomaly.

A magnetotelluric survey coincident with Wigger et al's seismic experiment pointed out the existence of a north-dipping high-conductivity zone starting near the surface in the southern border of the High Atlas and either flattening down at mid crustal levels or dipping continuously northwards down to lower crustal depths. More recent MT surveys have found evidences of a conductive lower crust underneath the Moulouya plain which led to infer the existence of a fraction of 2-8% of partial melt near the Atlas crustal root, at 30-35 km depth. On the basis of a similar long period MT survey, a conductive anomaly located at 40 km has been interpreted as melting at the top of an anomalous mantle in connection with the Middle Atlas quaternary basaltic volcanism.

Potential field-based lithospheric models running from SW Iberia to the Sahara desert have taken into account most of the observations above described and concluded that the Atlas topography is supported by some sort of mantle upwelling that places the asthenosphere as high as ~70 km under the High Atlas. This plume-like feature has also an influence on the elevation of the Moroccan Mesetas and on that of the Middle Atlas, as well as in the alkaline volcanism of the region. The origin of this anomalous mantle is controversial although it does not seem to be linked to extensional tectonics, nor to delamination. Regardless of the agreement existing in relation to this model, the exact depth of the LAB boundary depends greatly on the topography of the Moho, which up to now, has only constrained by low resolution wide-angle seismic data [Wigger et al. 1992] and gravity data [Ayarza et al., 2005].

Currently, a large amount of passive seismic data is being acquired across the diffuse plate boundary of northern Africa and southern Iberia by the international collaboration projects of TOPOIBERIA and PICASSO which are coming up with relatively high resolution large scale tomographic models for the area.

The SIMA and RIFSEIS experiments

Two relatively high resolution controlled source wide-angle seismic reflection experiments were designed and acquired in Morocco, one across the Atlas and a second one centered at the Rif orogen. The SIMA aimed to constrain the crustal depth and the overall structure of the Atlas Mountains, while the RIFSEIS targeted the seismic structure along different domains of the Rif Cordillera. The success of both experiments was the

direct result of a tight collaboration between Spanish, Moroccan and American scientists. Both experiments used the Reftek 125a (Texans) from the IRIS instrument center. These almost 1000 vertical components digital stations recorded the acoustic energy generated by a series of (1TM) explosive shots (Table 1).

The average shot spacing in both experiments was of approximately 70 km. In the RIFSEIS data acquisition the Texans seismic stations were deployed along two roughly perpendicular profiles, in N-S and E-W directions respectively. The average station spacing was of 750 m along the 330 km-length profiles. The N-S line was extended northwards by a 70 km long segment in the Iberia Peninsula, sampling the Betic domains. Southwards, this profile connects and overlaps with the SIMA transect across the Atlas. This acquisition design resulted in the 700 km-long wide-angle seismic transect across the Betics-Rif-Atlas systems. The crust beneath Alboran was also targeted by a complementary operation coincident in time. This involved onshore-offshore recordings at both sides of the Western Alboran Basin. The marine data was acquired by the Spanish research vessel Sarmiento de Gamboa. The SIMA transect across the Atlas involved the deployment of the Texans between Tangier and the Sahara desert (Fig. 1). The average spacing was of 1000m from Tangier to Fes and of 400 m from Fes to Merzouga.

Conventional seismic processing was applied to the shot records. The first step was to increase the signal-to-noise ratio, to achieve this objective several steps were followed such as : band pass frequency filtering, spherical divergence amplitude corrections, spectral whitening (spectral balancing), amplitude gain (trace balancing). The shot records were then plotted using a reduction velocity of 6 km/s and also using 8 km/s to identify the different phases. In the interpretation traditional naming rules were used. For reflections a 1st uppercase letter is used to indicate the type of wave (incident wave) and 2nd lower case letter indicating the interface where the reflection takes place, these are followed by a 3rd letter indicating the type of wave that has been reflected. For example PiP refers to a P wave reflected at interface i from an incident P wave. In the case of refractions only the first two letters are required. In this case Pn indicated the refracted P wave at the Moho discontinuity (head wave traveling within the upper mantle. The shot records although they have relatively large offsets (long distance between the shot and the receiver) data can also be processed in a way to obtain a wide-angle, low fold seismic stack [Carbonell et al., 2002]. The specific acquisition geometry allow for the determination of several low fold stacks in different directions which provide nearly 3 dimensional constrains on the crustal structure, particularly beneath the Rif orogen (Fig. 1).

Data: Seismic Record sections

The quality of the shot records is variable, never the less a few phases can be identified. Note that shot gathers displayed with a reduced velocity have an extra time shift of 2s (Fig. 2) in order to allow identification of phases arriving at negative travel times after reduction. Across the Atlas (SIMA experiment) the changes in altitude along the profile, with stations located almost at sea level whereas others lie at more than 2000 m, hinders a straightforward interpretation of long, linear phases, and it is sometimes difficult to correlate energy along large offsets. Nevertheless, most shot gathers allow the identification of 4-5 phases. These are Ps, Pg, PiP, PmP and Pn. Detailed analysis of this events can be found elsewhere [Puy et al., 2013].

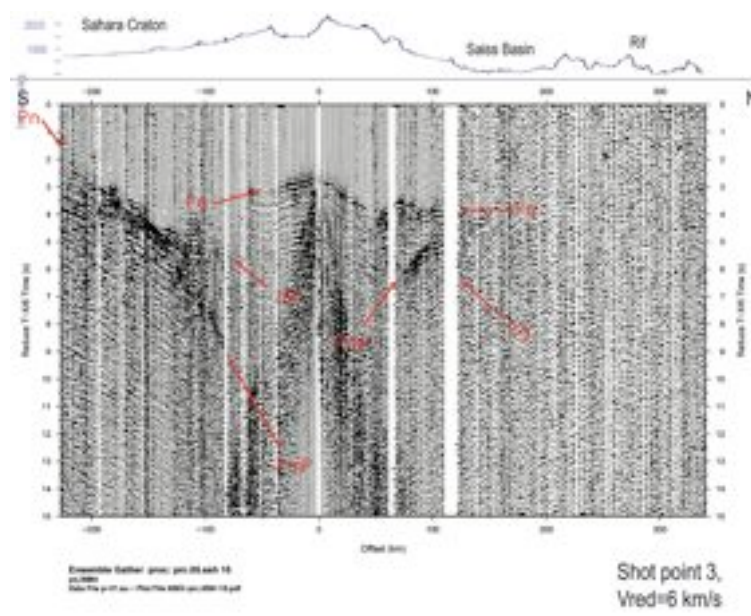


Figure 1c

Figure 2: Record sections of shot 3. Shots are numbered from 1 to 6 and from north to south. The shot record was reduced by a velocity of 6 km/s for display purposes. Seismic phases are also identified and indicated in red, Pg, PiP, PmP, Pn. Note the time difference (at the same offsets) between the PmP arrival to the north (positive offsets) and the PmP arrival to the south (negative offsets). Take, for example, an offset of 100 km. This constitutes evidence of a step at Moho depth.

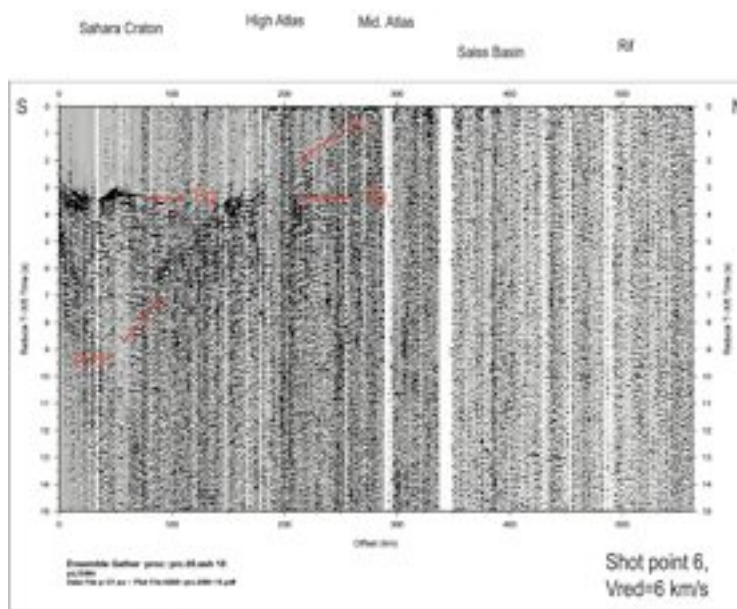


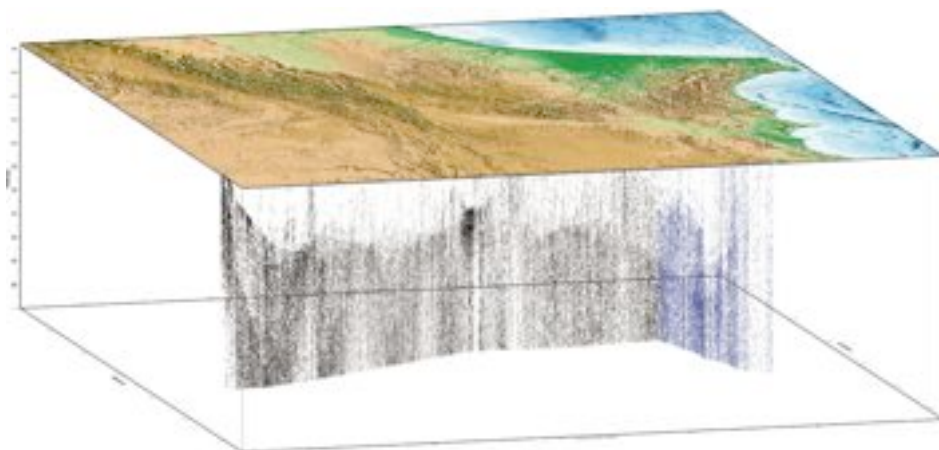
Figure 3f

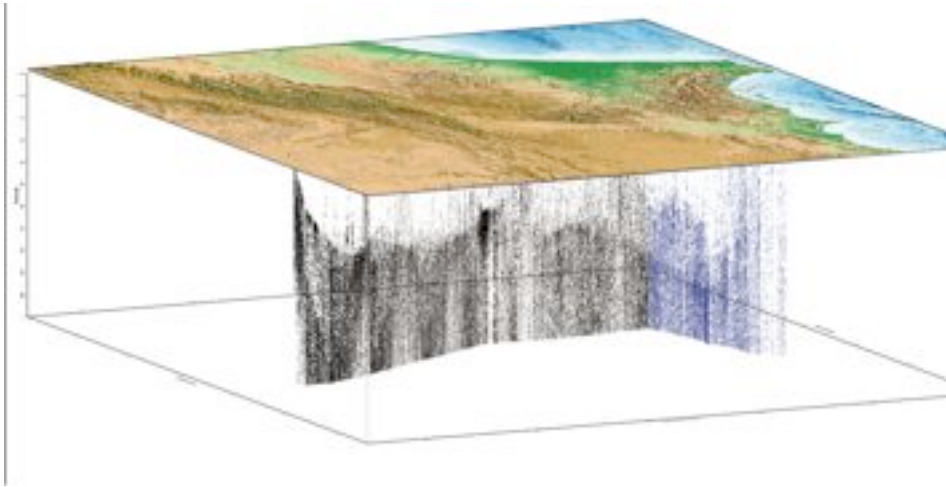
Figure 3: Record sections of shot 6. The reduction velocity used for display purposes is of (Vred) is 6 km/s. IN red the seismic phases identified; Pg, PmP and Pn.

Figures 2 and 3 constitute two examples of the shot records which were acquired along the SIMA Transect. This corresponds to shot 3 and 6 respectively. Shot 3 was located near Zaida, in the Moulouya Plain right to the N of the High Atlas (Fig. 1). In this shot record 4 phases can be identified (Fig. 2), the first of them being Pg which appears as a first arrival up to 115 km to the S and 140 to the N. A PiP phase can be observed to the S, at a distance of around 100 km. This phase is taken over by PmP, which shows critical distances of approximately 140 km to the S of this shot. This contrast with the critical distances at which PmP is observed in shots 1 and 2, and also, to the northern part of this shot gather, where a very well defined PmP shows its higher amplitudes at less than 100 km. To the N, the time at which we observe the PmP critical arrivals is below 7 s whereas to the S, it is above 8 s, suggesting a clear asymmetry in the crustal thickness and/or velocity structure to the N and S of this shot point. Also, to the S, this phase appears to have very high move-out, which can be indicative of a dipping interface. Pn can be observed to the S of the shot. It becomes a first arrival just above 150 km and shows an apparent velocity below 8 km/s.

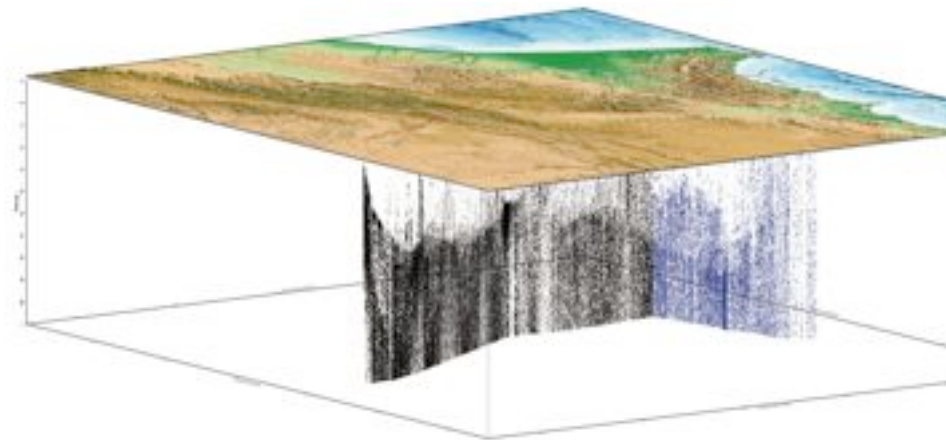
Shot 6, to the S of Merzouga (Fig. 1) represents the southernmost shot point of the experiment and the only one with end-on geometry. Unfortunately, this shot gather shows also little reflectivity and only P, PmP and, Pn phases can be identified (Fig. 3). Pg appears as first arrival along almost 150 km. It is not clear though if it merges some intracrustal phase at less than 100 km. PmP can be observed from 105 km (critical distance?) to 160 km, where a weak Pn phase is observed as a first arrival.

Constraints on the 3D geometry of the crust-mantle boundary can be obtained by producing Low-fold wide-angle stacks using the SIMA and RIFSEIS data sets. Two nearly perpendicular sections can be observed in Fig. 4. These sections constrain the topography of the Moho boundary from South to North, crossing the Atlas and reaching the Gibraltar arc in Tangier. From East to west the wide-angle low fold stack of the shots records acquired along the Rif cordillera constrain the base of the crust parallel to the southern margin of the Alboran basin where the topography is highly variable.

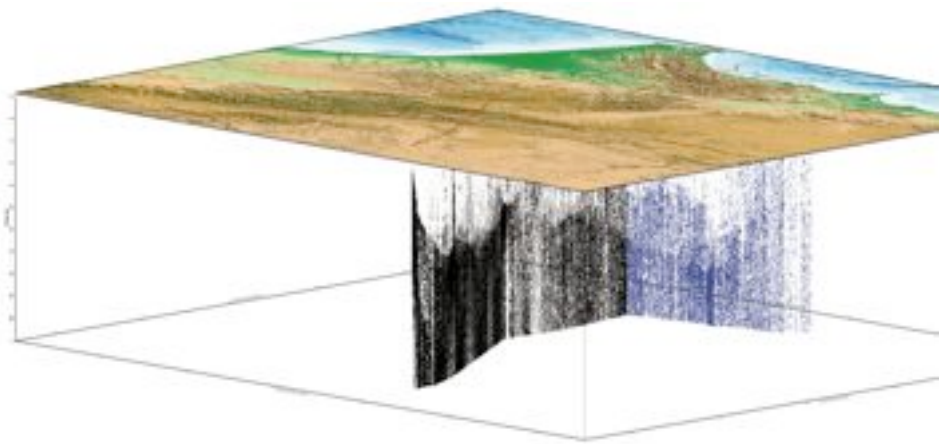




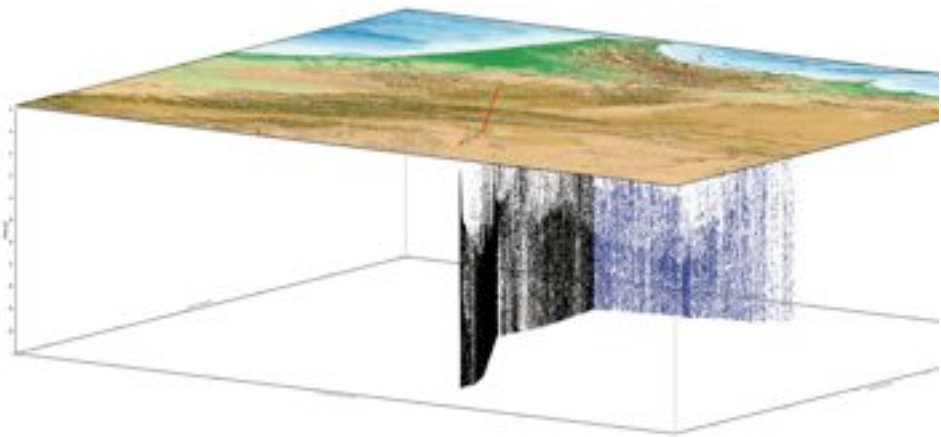
SIMA-RIF Transects Across Morroco Low Fold Stacks SR0062-stk03 and 597
prj.SRplts 6N-SR0062-stk03-597-50000-EW0262-stk03-30088-30757-115.pdf
Rifmap6mc-03.sh



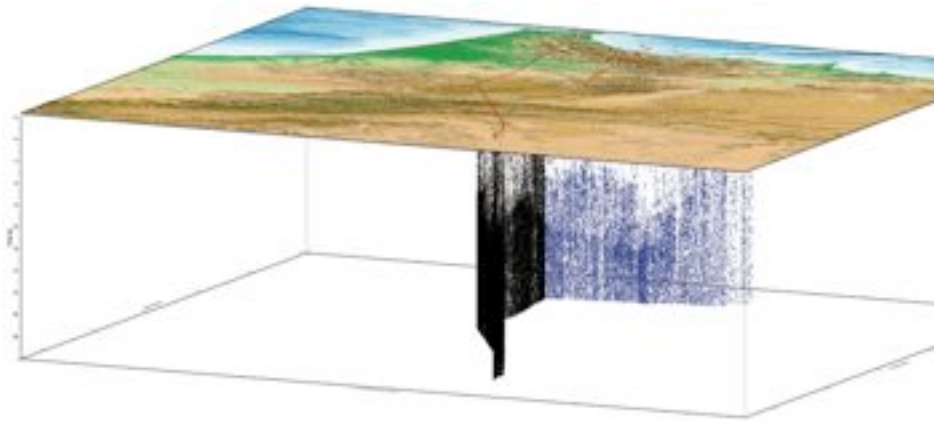
SIMA-RIF Transects Across Morroco Low Fold Stacks SR0062-stk03 and 597
prj.SRplts 6N-SR0062-stk03-597-50000-EW0262-stk03-30088-30757-125.pdf
Rifmap6mc-03.sh



SIMA-RIF Transects Across Morroco Low Fold Stacks SR0062-stk03 and 597
prj.SRplts 6N-SR0062-stk03-597-50000-EW0262-stk03-30088-30757-135.pdf
Rifmap6mc-03.sh



SIMA-RIF Transects Across Morroco Low Fold Stacks SR0062-stk03 and 597
prj.SRplts 6N-SR0062-stk03-597-50000-EW0262-stk03-30088-30757-145.pdf
Rifmap6mc-03.sh



SIMA-RIF Transects Across Morrocco Low Fold Stacks SR0062-stk03 and 597
 prj.SRplts 6N-SR0062-stk03-597-50000-EW0262-stk03-30088-30757-155.pdf
 Rifmap6mc-03.sh

Figure 4. 3 low fold wide-angle stalk of the SIMA and RIFSEIS shot records. In black the NS transect and in blue the EW transect following the trace of the Rif. Note the relatively high energy denoting the Moho reflection event. The upper part of the 3D display shows the topography of the studied area. In red the calculated location of the CMP which have been used to generate the low-fold stack. In green and light blue the location of the receivers for the SIMA and RIFSEIS experiments.

Results

The interpretation of the SIMA data set has been carried out through forward modeling using the Rayinvr ray-tracing based utilities [Zelt and Smith 1992]. This code uses a simple parameterization and is valid for the Middle and especially for the High Atlas, whose structural grain is sub-perpendicular to the seismic line. A reference line has been defined which allows the projection of source and receivers preserving the original offsets. We have departed from a simple 2D, P-wave velocity structure and we have iteratively modified the position of the interfaces and velocities until the observed and the modeled travel times present a good fit. A simple layer stripping approach was followed. Shallow/early arrivals (travel time picks) were used to constrain the velocity of the shallowest part of the model. Later phases were then included progressively, in order to define a crustal and upper mantle model. Because of the complexity of the data and arrivals, models were obtained using a trial and error methodology for each shot and then combined into a single model that accounts for all arrivals.

Since one of the main goals of the SIMA experiment was to map the crust-mantle boundary, special attention has been paid to offsets and travel times of the PmP and Pn phases. Shot gathers 1 and 2 show PmP critical distances of ~100 km to the N and S of the shot points. Shot number 3 features for the same phase critical distances of more than 140 km to the S and 100 km to the N, thus providing the key information to understand the crustal structure of the Atlas. Finally, shots 4, 5 and 6, show PmP critical distances higher than 100 km but well below 140 km. Together with these variations in critical distance, the PmP phase shows time shifts of up to 1.5 s between different shot points or even in a same shot gather. Accordingly, if we assume that P-wave velocities do not vary significantly along the seismic transect, an asymmetry has to be addressed at a Moho level to explain the travel time values and critical distances. Note that the S branch of the PmP featured a relatively high moveout that could be associated to a northward dipping Moho interphase.

The crust has been divided in 3 layers, namely sediments, upper crust and lower crust (Fig. 5). These layers are constrained by the identified arrivals in the shot records; Ps from the sediments, Pg from the boundary between sediments and basement/upper crust, PiP from the upper/lower crust boundary and PmP and Pn from the crust/mantle boundary. The structure and velocity of the sediments is well constrained by surface data and Vp apparent values. Maximum sediment thickness is found in the High Atlas (3.7 km), and in the Middle Atlas (2.6 km). The Saiss Basin is modeled as 4.5 km thick feature filled of low Vp sediments (2.6-3.6 km/s, Figure 6) although the low amplitude of the phases recorded by the stations deployed in the area impedes a precise interpretation. An intracrustal phase (PiP) constraints the existence of a boundary that separates the upper and the lower crust. The Moho boundary features a depth variation of, approximately, 10 km. In the area to the N of km 270, the crust/mantle boundary is modeled at ~31 km b.s.l., to the N, a crustal root positions this boundary at a maximum depth of 41 km b.s.l. at 240 km, to the N of the High Atlas. From there to the southern end of the profile the Moho shallows progressively up to 35 km.

The High and Middle Atlas mesozoic sediments show Vp's that range from 4 km/s to 5 km/s at the surface to 5.3 km/s at the bottom of the sedimentary layer (Fig. 5). The upper crust has Vp values that range from 5.4 to 5.8 km/s in the upper part to 6.2-6.35 km/s in the contact with the lower crust. In the lower crust Vp varies between 6.4-6.6 km/s in the upper part to 6.6-6.8 km/s at the bottom. The upper mantle has P-wave velocities that range between 7.6 and 7.8 km/s. Analysis of processed datasets already reveals the existence of major variations in crustal thicknesses, especially along the E-W profile that documents differences of more than 10 km in Moho depths. The thickest crust is found beneath the external Rif domain, with a rapid thinning eastwards, in the foreland and Atlasic terranes up to the Algerian border (Fig. 4). Detail discussion on the implications of the velocity model can be found in [Ayarza et al., 2013].

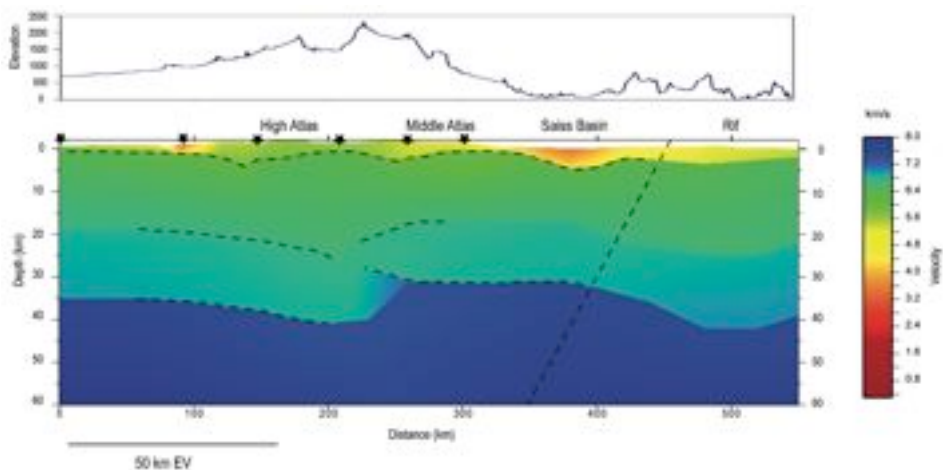


Figure 5: Velocity Model estimated from the SIMA seismic records across the Atlas orogen. The top inset illustrates the topography along the transect. The velocity model was determined from the identified arrivals by iterative forward modeling. The position of the crustal interfaces is accompanied by a color scale that shows the Vp values for the addressed crustal structure. The geometry of the boundaries is not entirely constrained by the raytracing and the areas that are sampled by incidence rays are marked with a discontinuous line. Constraints on the structure of the northern part of the profile were obtained from the RIFSIS experiment.

Conclusions

Two control source high resolution wide-angle seismic reflection experiments were carried out by an international team of scientist in Morocco. The seismic data was acquired across the Moroccan Atlas and the Rif Mountains. Its main goals were to constrain the crustal structure, position and geometry of internal discontinuities including the topography of the Moho. This new data would provide key knowledge to asses the mechanisms that support of the Atlas topography, and to clarify the tectonic evolution of this unique and complex collision zone between the European and African continent. The seismic data features an irregular signal/noise ratio, however relatively good resolution is observed beneath the Atlas area and the central Rif. Along the SIMA transect forward modeling of P-waves constrains a section of 300 km centered in the High and Middle Atlas and outlines a model with a three-layer crust, representing the Mesozoic and Tertiary sediments ($v=2-5.5$ km/s), the basement/upper crust ($v=5.8-6.35$ km/s) and lower crust ($v=6.4-6.8$ km/s). The Atlas mantle shows low V_p values, that never exceed 7.8 km/s. A mid crustal discontinuity is placed between 17 and 24 km depth and implies a smooth velocity increase of 0.1-0.15 km/s. This interface might act as a local detachment between upper and lower crust and represents the boundary where upper crustal thrusts might sole out. The seismic Moho reveals a crustal root in the northern part of the High Atlas coincident with the minimum Bouguer gravity anomaly values and its depth reaches 41 km. To the N and S of the root the crust is thinner, presenting thickness values of 30-32 km and 35-38 km respectively, suggesting different deformation history and/or contrasting pre-deformation thicknesses of both crusts. From East to west the wide-angle low fold stack of the shots records acquired along the Rif cordillera constrain the base of the crust parallel to the southern margin of the Alboran basin where the topography is highly variable.

Acknowledgements

Funding for this project has been available from Spanish Ministry of Science and Innovation under grants : CSD 2006-00041, CGL2007-63889 CGL2011-24101, CGL2010-17280 and by generalitat de Cataluña grant : 2009SGR996

Bibliography

- [1] Alvarez-Valero, A.M., Kriegsman, L.M., 2007. Crustal thinning and mafic underplating beneath the Neogene Volcanic Province (Betic Cordillera, SE Spain): evidence from crustal xenoliths. *Terra Nova* 19, 16.
- [2] Anahnah, F., Galindo-Zaldívar, J., Chalouan, A., Pedrera, A., Ruano, P., Pous, J., Heise, W., Ruiz-Constan, A., Benmakhlouf, M., López-Garrido, A.C., Ahmamou, M., Sanz de Galdeano, C., Arzate, J., Ibarra, P., González- Castillo, L., Bouregba, N., Corbo, F., Asensio, E., 2011. Deep resistivity cross section of the intraplate Atlas Mountains (NW Africa): New evidence of anomalous mantle and related Quaternary volcanism. *Tectonics* 30, 9.
- [3] Anguita, F., Hernan, F., 2000. The Canary Islands origin: a unifying model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 1-26, 26.
- [4] Arboleya, M.L., Teixell, A., Charroud, M., Julivert, M., 2004. A structural transect through the High and Middle Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 39, 18.

- [5] Ayarza, P., Alvarez-Lobato, F., Teixell, A., Arboleya, M.L., Teson, E., Julivert, M., Charroud, M., 2005. Crustal structure under the central High Atlas Mountains (Morocco) from geological and gravity data. *Tectonophysics* 400, 18.
- [6] Ayarza, P., Carbonell, R., Palomeras, I., Levander, A., Teixell, A., Harnafi, M., 2013, Constraint on the velocity structure and accomodation of shortning in the Atlas Mountains (Morocco) from inersion of refraction/wide-angle reflection seismic data, *Tectonophysics*, (in press).
- [7] Bargach, K., Ruano, P., Chabli, A., Galindo-Zaldivar, J., Chalouan, A., Jabaloy, A., Akil, M., Ahmamou, M., Sanz de Galdeano, C., Benmakhlouf, M., 2004. Recent Tectonic Deformations and Stresses in the Frontal Part of the Rif Cordillera and the Saïss Basin (Fes and Rabat Regions, Morocco). *Pure and applied geophysics* 161, 20.
- [8] Beauchamp, W., Allmendinger, R.W., Baranzagi, M., Demnati, A., El Alji, M., Dahmani, M., 1999. Inversion tectonics and the evolution of the High Atlas Mountains, Morocco, based on a geological/geophysical transect. *Tectonics* 18, 23.
- [9] Benz, H.M., Smith, R.B., Mooney, W.D., 1990. Crustal structure of the northwestern Basin and Range Province from the 1986 program for array seismic studies of the Continental Lithosphere Seismic Experiment. *Journal of Geophysical Research* 95 20.
- [10] Bijwaard, H., Spakman, W., 2000. Non-linear global P-wave tomography by iterated linear inversion. *Geophysical Journal International* 141, 10.
- [11] Carbonell, R., Gallart, J., Díaz, J., Gil, A., Harnafi, M., Ouraini, F., Ayarza, P., Teixell, A., Arboleya, M.L., Palomeras, I., Levander, A., 2013. A 700 km long crustal transect accross northern Morocco. *Geophysical Research Abstracts* 15.
- [12] Carbonell, R., Gallart, J., Pérez-Estaún, A., (2002) Modelling and imaging the Moho transition: the case of the southern Urals *Geophysical Journal International*, Vol 149, 134-148. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2002.01623.x
- [12] Carbonell, R., Gallart, J., Pérez-Estaún, A., Diaz, J., Kashubin, S., Mechie, J., Wenzel, F., Knapp, J., 2000. Seismic wide-angle constraints on the crust of the southern Urals. *Journal of Geophysical Research* 105, 23.
- [14] Carbonell, R., Levander, A., Kind, R., 2013, The Mohorovičić discontinuity beneath the continental crust: An overview of seismic constraints, *Tectonophysics*, Volume 609, 353-376, doi 10.1016/j.tecto.2013.08.037
- [15] Carbonell, R., Pérez Estaún, A., Gallart, J., Díaz, J., Kashubin, S., Mechie, J., Stadtlander, R., Schulze, A., Knapp, J.H., Morozov, A., 1996. Crustal root beneath the urals: Wide-angle seismic evidence. *Science* 274, 3.
- [16] Choukroune, P., Team., E., 1989. The ECORS Pyrenean deep seismic profile reflection data and the overall structure of an orogenic belt. *Tectonics* 8, 17.
- [17] Christensen, N.I., 1979. Compressional Wave Velocities in. Rocks at High Temperatures and Pressures, Critical Thermal Gradients, and Crustal Low- Velocity Zones. *Journal of Geophysical Research* 84, 9.
- [18] Daignières, M., Séguret, M., Specht, M., Team., E., 1994. The Arzacq-Western Pyrenees ECORS Deep Seismic Profile European Association of Petroleum Geologist Special Publications 4, 10.
- [19] Dunn, R.A., Forsyth, D.W., 2003. Imaging the transition between the region of melt generation and crustal magma chamber beneath the southern East Pacific Rise with short-period Love waves. *Journal of Geophysical Research* 108.

- [20] El Azzouzi, M., Bernard-Griffiths, J., Bellon, H., Maury, R.C., Piqué, A., Fourcade, S., Cotten, J., Hernandez, J., 1999. Evolution des sources du volcanisme marocain au cours du Néogène. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences de Paris* 329, 8.
- [21] Flecha, I., Palomeras, I., Carbonell, R., Simancas, F., Ayarza, P., Matas, J., González-Lodeiro, F., Pérez-Estaún, A., 2009. Seismic imaging and modelling of the lithosphere of SW-Iberia. *Tectonophysics* 472, 10.
- [22] Frizon de Lamotte, D., Saint Bezar, B., Bracène, R., Mercier, E., 2000. The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean. *Tectonics* 19, 22.
- [23] Giese, P., and Jacobshagen, V., 1992 Inversion Tectonics of the Intracontinental Ranges: High and Middle Atlas, Morocco, *Geologische Rundschau*, 81, 249-259.
- [24] Gil, A., Gallart, J., Díaz, J., Carbonell, R., Harnafi, M., Levander, A., 2013. Crust structure across the Rif Cordillera from 'RIFSIS' seismic refraction and wide-angle reflection experiment. *Geophysical Research Abstracts* 15.
- [25] Gómez, F., Beauchamp, W., Barazangi, M., 2000. Role of Atlas Mountains (northwest Africa) within the African/Eurasian plate boundary zone. *Geology* 28, 4.
- [26] Hammond, W.C., Humphreys, E.D., 2000. Upper mantle seismic wave velocity: effects of realistic partial melt geometries. *Journal of Geophysical Research* 105, 12.
- [27] Harmand, C., Cantagrel, J.M., 1984. Le volcanisme alcalin Tertiaire et Quaternaire du Moyen Atlas (Maroc) : chronologie K/Ar et cadre géodynamique. *Journal of African Earth Sciences* 2, 5.
- [28] Hoernle, K., Zhang, Y., Graham, D., 1995. Seismic and geochemical evidence for large-scale mantle upwelling beneath the eastern Atlantic and western and central Europe. *Nature* 334, 6.
- [29] Hyndman, R.D., Klemperer, S.L., 1989. Lower-crustal porosity from electrical measurements and inferences about composition from seismic velocities. *Geophysical Research Letters* 16, 4.
- [30] Karato, S., Spetzler, H.A., 1990. Defect microdynamics in minerals and solid-state mechanisms of seismic wave attenuation and velocity dispersion in the mantle. *Reviews of Geophysics* 28, 23.
- [31] Laville, E., and Piqué, A., 1992. Jurassic penetrative deformation and Cenozoic uplift in the central High Atlas (Morocco) : A tectonic model, structural and orogenic inversions. *Geologische Rundschau* 81, 14.
- [32] Laville, E., Lesage, J.-L., Seguret, M., 1977. Géométrie, cinématique (dynamique) de la tectonique atlasique sur le versant sud du Haut Atlas marocain. *Aperçu sur les tectoniques hercyniennes et tardihercyniennes*. *Bulletin de la Société Géologique de France* 7, 13.
- [33] El Kochri, A., Chorowicz, J., 1995. Oblique extension in the Jurassic trough of the central and eastern High Atlas (Morocco). *Canadian Journal of Earth Sciences* 33, 84-92.
- [34] Ledo, J.J., Jones, A.G., Siniscalchi, A., Campanyà, J., Kiyani, D., Romanoc, G., Rouaid, M., Team, T.M., 2011. Electrical signature of modern and ancient tectonic processes in the crust of the Atlas mountains of Morocco. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 185, 9.

- [35] Mattauer, M., Tapponier, P., F., P., 1977. Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales. L'exemple des chaînes atlasiques du Maroc. Société Géologique de France 7, 16.
- [36] Maystrenko, Y., Stovba, S., Stephenson, R., Bayer, U., Menyoli, E., Gajewski, D., Huebscher, C., Rabbel, W., Saintot, A., Starostenko, V., Thybo, H., Tolkunov, A., 2003. Crustal-scale pop-up structure in cratonic lithosphere : DOBRE deep seismic reflection study of the Donbas fold belt, Ukraine. *Geology* 31, 4.
- [37] Medina, F., Cherkaoui, T., 1991. Focal mechanisms of the Atlas earthquakes and tectonic implication. *Geologische Rundschau* 3, 12.
- [38] Morel, J.-L., Zouine, M., Poisson, A., 1993. Relations entre la subsidence des bassins moulouyens et la création des reliefs atlasiques (Maroc): Un exemple d'inversion tectonique depuis le Néogène. *Bulletin de la Société Géologique de France* 93, 13.
- [39] Morel, J.-L., Zouine, M., Andrieux, J., Faure-Muret, A., 2000. Des formations néogènes et quaternaires de la bordure nord haut atlasique (Maroc): rôle du socle et conséquences structurales. *Journal of African Earth Sciences* 30, 13.
- [40] Palomeras, I., Carbonell, R., Flecha, I., Simancas, F., Ayarza, P., Matas, J., Poyatos, D.M., Azor, A., Lodeiro, F.G., Pérez-Estaún, A., 2009. Nature of the lithosphere across the Variscan orogen of SW Iberia: Dense wide-angle seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research* 114.
- [41] Palomeras, I., Carbonell, R., Ayarza, P., Martí, D., Brown, D., Simancas, J.F., 2011. Shear wave modeling and Poisson's ratio in the Variscan Belt of SW Iberia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 12.
- [42] Palomeras, I., Thurner, S., Levander, A., Liu, K., Villaseñor, A., Carbonell, R., 2013. Finite-Frequency Rayleigh Wave tomography of the Western Mediterranean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* submitted.
- [43] Pastor, A., Teixell, A., Arboleya, M.L., 2012. Rates of Quaternary deformation in the Ouarzazate basin (Southern Atlas Front, Morocco). *Annals of Geophysics* 55, 1003-1016.
- [44] Platt, J.P., Behr, W., Johannesen, K., and Williams R., 2013. The Betic-Rif Arc and Its Orogenic Hinterland: A Review
- [45] Annual Review of Earth and Planetary Sciences Vol. 41: 313-357 doi: 10.1146/annurev-earth-050212-123951
- [46] Priestley, K., McKenzie, D., 2006. The thermal structure of the lithosphere from shear wave velocities. *Earth and Planetary Science Letters* 244, 17.
- [47] Prodehl, C., Mooney, W., 2012. Exploring the Earth's Crust - History and Results of Controlled Source Seismology, in: *The Geological Society of America Memoir*, 208, p. 764.
- [48] Ramdani, F., 1998. Geodynamic implications of intermediate-depth earthquakes and volcanism in the intraplate Atlas mountains (Morocco). *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 108, 16.
- [49] Rimi, A., 1999. Mantle heat flow and geotherms for the main geologic domains in Morocco. *International Journal of Earth Sciences* 99, 9.

- [50] Sandvol, E., Calvert, A., Barazangui, M., 1998. Grid search modelling of receiver functions: implications for crustal structure in the Middle East and North Africa. *Journal of Geophysical Research* 103 (B11), 19.
- [51] Schwarz, G., Mehi, H.G., Ramdani, H.G., Rath, V., 1992. Electrical resistivity structure of the eastern Moroccan Atlas System and its tectonics implications. *Geologische Rundschau* 81, 15.
- [52] Seber, D., Barazangi, M., Tadili, B., Ramdani, M., Ibenbrahim, A., Ben Sari, D., 1996. Three dimensional upper mantle structure beneath the intraplate Atlas and interplate Rif mountains of Morocco. *Journal of Geophysical Research* 101, 14.
- [53] Sébrier, M., Siame, L., Zouine, E.M., Winter, T., Missenard, Y., Leturmy, P., 2006. Active tectonics in the Moroccan High Atlas. *Comptes Rendus Geoscience* 338, 15.
- [54] Tadili, B., Ramdani, M., Ben Sari, D., Chapochnikov, K., Bellot, A., 1986. Structure de la croûte dans le nord du Maroc. *Annales Geophysicae* 4, 6.
- [55] Teixell, A., 1998. Crustal structure and orogenic material budget in the west central Pyrenees. *Tectonics* 17, 22.
- [56] Teixell, A., Arboleya, M.L., Julivert, M., 2003. Tectonic shortening and topography in the central High Atlas (Morocco). *Tectonics* 33, 14.
- [57] Teixell, A., Ayarza, P., Tesón, E., Babault, J., Alvarez-Lobato, F., Charroud, M., Julivert, M., Barbero, L., Amrhar, M., Arboleya, M.L., 2007. Geodinámica de las cordilleras del Alto y Medio Atlas: Síntesis de los conocimientos actuales. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 20, 17.
- [58] Teixell, A., Ayarza, P., Zeyen, H., Fernández, M., Arboleya, M.L., 2005. Effects of mantle upwelling in a compressional setting: the Atlas Mountains of Morocco. *Terra Nova* 17, 6.
- [59] Van der Meijde, M., Van der Lee, S., Giardini, D., 2003. Crustal structure beneath broad-band seismic stations in the Mediterranean region. *Geophysical Journal International* 152, 11.
- [60] Wigger, P., Asch, G., Giese, P., Heinsohn, W.-D., El Alami, S.O., Ramdani, F., 1992. Crustal structure along a traverse across the Middle and High Atlas mountains derived from seismic refraction studies. *Geologische Rundschau* 81, 12.
- [61] Zelt, C., Smith, R., 1992. Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophysical Journal International* 108, 19.
- [62] Zeyen, H., Ayarza, P., Fernandez, M., Rimi, A., 2005. Lithospheric structure under the western African-European plate boundary: A transect across the Atlas Mountains and the Gulf of Cadiz. *Tectonics* 24.

THERMOCHRONOLOGIE PAR TRACES DE FISSION SUR APATITE ET MOUVEMENTS VERTICAUX DE LA MESETA OCCIDENTALE MAROCAINE

Pr. Omar SADDIQI

et

Pr. Fatima-Zahra EL HAIMER

Laboratoire des Géosciences

Université Hassan II, Casablanca, Maroc



Résumé

La thermochronologie par traces de fission (TF) de l'Uranium dans les roches, combinée à la modélisation thermique, se révèle comme outil indispensable pour l'estimation des mouvements verticaux de la croûte continentale. Elle est fondée sur le fait que des dommages du réseau cristallin résultant de la fission spontanée de l'Uranium 238 s'accumulent dans les minéraux riches en Uranium (apatite, zircon, titanite), ou dans des verres volcaniques. L'estimation de l'âge s'effectue en déterminant la densité des traces dans ces minéraux, ainsi que leurs teneurs en U238.

Les traces sont métastables et sont effacées pour des températures supérieures à 110°C pour l'apatite et à 300°C pour le zircon, et constituent de ce point de vue un marqueur de la température. Les traces de fission sur apatite (AFT) voient leur effacement progressif se faire dans un intervalle de température continu entre 60 et 110°C environ (Partial Annealing Zone, PAZ) ce qui induit une sensibilité importante aux modifications fines des températures près de la surface terrestre. La zone de cicatrisation partielle des traces dans le zircon se situe, elle, entre 240 et 300°C. Ces caractéristiques font des traces de fission une méthode de plus en plus utilisée dans la reconstitution de l'histoire thermique, liée à l'enfouissement et au soulèvement des bassins sédimentaires et des chaînes de montagnes, ainsi qu'à l'évolution de leur relief. A partir de la reconstitution de l'histoire thermique obtenue, il devient possible d'estimer les taux de dénudation dans les ceintures orogéniques, les marges en extension, ainsi que dans les zones continentales stables. Il est possible de reconstituer l'évolution des bassins sédimentaires, en particulier les conditions qui contrôlent la genèse d'hydrocarbures, ou d'effectuer la datation des minéralisations et minerais, et de connaître l'âge absolu de mise en place de roches volcaniques.

Les études thermochronologiques par AFT et ZFT se sont multipliées au Maroc au cours des dernières années. Elles ont permis de mettre en évidence des mouvements verticaux complexes, faisant alterner subsidence et surrection depuis le Trias, et de redéfinir des concepts classiques telle la «Terre des Almohades» ou «West Moroccan Arch» pour la meseta occidentale notamment.

Dans le Haut Atlas central et sur le bloc ancien du Haut-Atlas de Marrakech, les résultats indiquent que l'exhumation du bloc ancien a eu lieu pendant le Néogène tandis que dans le segment plus à l'Est, une exhumation vers 50 Ma est mise en évidence. Dans le domaine anti-atlasique, les âges traces de fission révèlent grâce à la modélisation thermique que la phase majeure de soulèvement post-hercynienne se déroule au Jurassique supérieur – Crétacé inférieur.

Le soulèvement des montagnes de l'Atlas fait toujours objet de discussion à propos de son amplitude et des processus impliqués. Différentes études basées sur les données structurales et pétrologiques montrent que la lithosphère est plus mince sous le système atlasique le long d'un couloir orienté NE-SW. Les données géochimiques sur les laves les plus récentes (Plio-Quaternaire) confirment une réduction de l'épaisseur de la lithosphère continentale et une remontée asthénosphérique sous l'Anti-Atlas occidental, le Haut Atlas et le Moyen Atlas. Ces processus peuvent expliquer en partie l'important relief du système atlasique, mais aussi celui de l'Anti-Atlas.

1. Introduction

Le domaine atlasique marocain (Choubert et Faure-Muret, 1960-62) fait partie, avec la chaîne rifo-tellienne, du domaine orogénique maghrébin déformé au Cénozoïque. Ce domaine orogénique est situé au sud de la zone de convergence des plaques Afrique et Europe, en bordure nord de la plateforme saharienne. Au Maroc, le domaine atlasique inclut à la fois des chaînes de montagnes, le Haut Atlas et le Moyen Atlas, et des plateaux ou massifs anciens, les mesetas occidentale et orientale, aussi appelées Massif ou Plateau central et Hauts Plateaux (fig.1). La chaîne du Haut Atlas s'allonge de l'Océan Atlantique à l'Ouest jusqu'en Tunisie à l'Est suivant une direction SSW-NNE. La chaîne rifo-tellienne est une chaîne de type alpin (à nappes de charriage, ophiolites, métamorphisme, etc.) alors que les Atlas sont des chaînes d'avant-pays intracontinentaux.

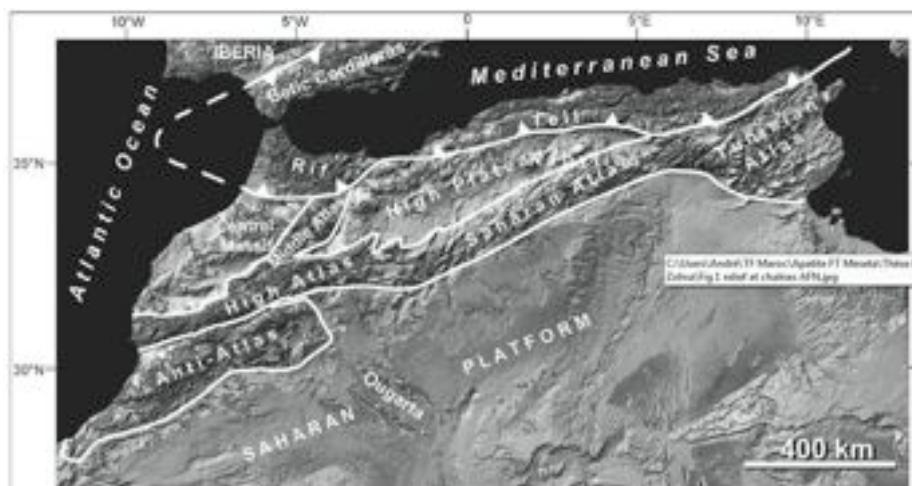


Fig. 1. Les grandes unités du domaine atlasique de l'Afrique du Nord (fond topographique STRM).

La topographie du Haut-Atlas, exceptionnellement haute pour une chaîne intracontinentale, a été d'abord considérée comme la conséquence directe et unique des processus tectoniques, c'est-à-dire du raccourcissement crustal dans le contexte de la convergence des plaques Afrique et Europe (Frizon de Lamotte, 2000). Cependant, différents auteurs (Tadili et al., 1986; Makris et al., 1985; Wigger et al., 1992; Mickus and Jallouli, 1999; Ayarza, 2005) ont souligné que la racine crustale sous le Haut Atlas n'était pas suffisante pour soutenir isostatiquement le relief, suggérant ainsi que celui-ci n'était sans doute pas exclusivement d'origine tectonique. L'existence d'une lithosphère peu épaisse et chaude sous le Haut Atlas, contribuant au relief par bombement thermique, a été suggérée par Seber et al. (1996) sur la base de la tomographie du temps d'arrivée des ondes P de télé-séismes. En bon accord avec ces résultats, différentes coupes d'échelle lithosphérique, construites en utilisant la même méthode d'inversion (qui utilise la topographie, le géoïde, la gravimétrie et le flux de chaleur) décrite par Zeyn & Fernandez (1994), montrent l'existence d'une lithosphère amincie (à peu près 70 km d'épaisseur) sous certaines parties du Haut et du Moyen Atlas (Frizon de Lamotte et al., 2004 ; Teixell et al., 2005 ; Missenard et al., 2005, 2006).

La description en 3D de cette zone à lithosphère amincie sous l'Atlas a été donnée par Fulla et al. (2010) grâce à la méthode utilisant les anomalies du géoïde, du flux thermique et de la topographie. A l'échelle du Maroc, les auteurs montrent que la zone à lithosphère amincie n'est pas restreinte au système atlasique mais dessine une ellipse de grand axe NE-SW recoupant les principales frontières tectoniques et, en particulier, les fronts du Rif et de l'Atlas. Ainsi, la topographie de l'Atlas traduit les effets combinés du raccourcissement tectonique et d'un dôme thermique, là où celui-ci existe. En accord avec Missenard et al. (2006), nous insistons sur le fait que la région la plus élevée (4200 m au Jebel Toubkal) est située dans le Haut Atlas central, là où le dôme thermique d'orientation NE-SW croise la chaîne atlasique d'orientation ENE-WSW.

Ainsi, deux processus différents ont contribué à la construction de la chaîne du Haut Atlas. Cependant, la chronologie des événements tectoniques et de la construction de la chaîne reste discutée. A l'échelle du Maghreb, deux événements compressifs principaux d'âge Eocène terminal et Pléistocène ont été reconnus (Frizon de Lamotte et al. 2000). Cependant cette chronologie reste mal établie au Maroc faute d'une datation correcte des terrains attribués à l'Oligo-Miocène. Par ailleurs, selon Missenard et al. (2006), le dôme thermique date du Miocène moyen, c'est-à-dire entre les deux événements compressifs. Cette proposition s'appuie sur l'âge du volcanisme alcalin associé.

La thermochronologie basse température sur apatite et zircon a été utilisée récemment au Maroc pour discuter des mouvements verticaux du socle du Haut Atlas (Barbero et al., 2007, Missenard et al., 2008) et des chaînes de montagnes d'Anti-Atlas (Malusa et al., 2007, Sebti et al., 2009, Ruiz et al., 2011, Oukassou et al., 2013). Dans ce travail, nous présentons une étude des traces de fission sur apatite (AFT=Apatite Fission Track) dans le domaine défini, selon les critères géologiques classiques (Choubert et Faure-Muret, 1962) comme un domaine tabulaire, celui de la Meseta marocaine occidentale. En fait, ce domaine constitue une zone relativement stable limitée par des chaînes de montagnes cénozoïques au sud, à l'est et au nord (les chaînes du Haut-Atlas, du Moyen Atlas, et du Rif respectivement), et par l'océan Atlantique à l'ouest (fig.2).

La Meseta occidentale comprend des massifs paléozoïques caractérisés par la déformation varisque, le métamorphisme et des intrusions granitiques variées, et des bassins continentaux fini-orogéniques (début du Permien). Ces massifs anciens appartiennent à

diverses zones structurales de la chaîne hercynienne. Le socle paléozoïque est directement recouvert, soit par des séries du Trias-Lias (Moyen Atlas tabulaire) soit par des plateaux du Crétacé-Tertiaire («Plateau des Phosphates» et Ganntour), et entouré par les bassins néogènes (Bahira-Tadla, Haouz, Doukkala, avant-fosse du Rif externe). Les plateaux crétacés-tertiaires ont été intensément étudiés pour l'exploitation des phosphates (les trois quarts des réserves des phosphates du monde) et des ressources en eau profonde.

Ghorbal et al. (2009) ont présenté des données AFT des régions nord (Zaër) et centrale (Rehamna) de la Meseta occidentale. Notre étude indépendante est principalement basée sur l'échantillonnage dans le Massif des Jebilet centrales et sur un échantillonnage supplémentaire dans le massif des Rehamna.

2. Cadre géologique

Le socle de la Meseta occidentale marocaine appartient à la partie méridionale de l'orogène varisque, dans lequel un certain nombre de granites se sont mis en place pendant l'intervalle Viséen-Permien inférieur (Hoepffner et al., 2006; Michard et al., 2008). Les granites des Jebilet sont datés à 330Ma (U-Pb sur zircon; Essaifi et al., 2003; Boummane et Olivier, 2007), et ceux des Rehamna à ~ 300Ma (Baudin et al, 2003). La chaîne s'est effondrée et a été érodée la première fois pendant la fin du Carbonifère supérieur-Permien inférieur (Hmich et al., 2006; Saber et al., 2007). Ensuite, le rifting associé à la Pangée décomposée a eu lieu sur les deux côtés de la future Meseta occidentale (Favre et al., 1991; Medina, 1995; Hafid, 2006; Zizi, 2002; El Arabi et al., 2006a, b). Le Rifting s'est produit durant la fin du Permien-Trias supérieur, se terminant temporairement à 200 Ma avec la mise en place des basaltes de la Province Magmatique de l'Atlantique Central (CAMP: Knight et al., 2004; Verati et al., 2007). Au cours du Lias-Dogger inf, le rifting a repris dans les bassins du Moyen Atlas (Charrière, 1990) et du Haut Atlas (Studer, 1987; Warme, 1988), avec l'accumulation de 3 à 8 km de dépôts. En revanche, dans la Meseta occidentale, d'importantes unités de socle affleurent du nord au sud: le Massif Central et la Meseta côtière, les Rehamna et les Jebilet (fig. 2). Les séquences de couverture triasique et liasique sont conservées uniquement à la bordure de la Meseta occidentale, au nord (Moyen Atlas tabulaire et les rides périphériques) ; au sud-est en subsurface (Tadla, Bahira) ; au sud-ouest (bassin d'Essaouira). Ailleurs, le socle de la Meseta occidentale est recouvert par des dépôts plus récents, Jurassique sup-Crétacé inférieur dans les collines des Mouissat à l'ouest des Jebilet (Hollard et al., 1985), et du Crétacé (principalement post-Aptien) dans les Rehamna et le sud du Massif Central (Gigout, 1954; Bolleli et al., 1959; Baudin et al., 2003).

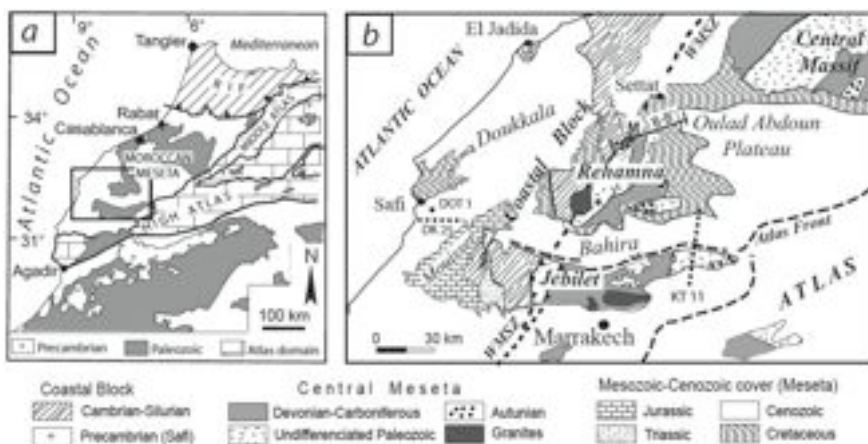


Fig. 2. Cartes de localisation: (a) provinces structurales au Nord du Maroc. PR: Prerif Ridges; SB: Selloum Basin; TMA: Tabular Middle Atlas. – (b) Carte schématique du socle étudié et régions voisines, d'après Hollard et al. (1985) et Hoepffner et al. (2006). Dashed lines (DK 25, etc.): Profils sismiques (Hafid, 2006; Hafid et al., 2008); Kh: Khouribga; WMSZ: Western Meseta Shear Zone, Y: Youssoufia.

Les contraintes géologiques pour reconstruire l'histoire thermique du socle mésétien sont résumées dans la section transversale de la figure 3. Cette figure montre également que la partie méridionale de la Meseta a été impliquée dans le raccourcissement de l'Atlas, avec le chevauchement du Massif des Jebilet sur les dépôts de la Bahira au cours du Trias-Néogène à travers une faille inverse au sud. En revanche, plus au nord, le socle de la Meseta et la couverture tabulaire du Crétacé-Eocène sont faiblement déformés à l'Alpin.

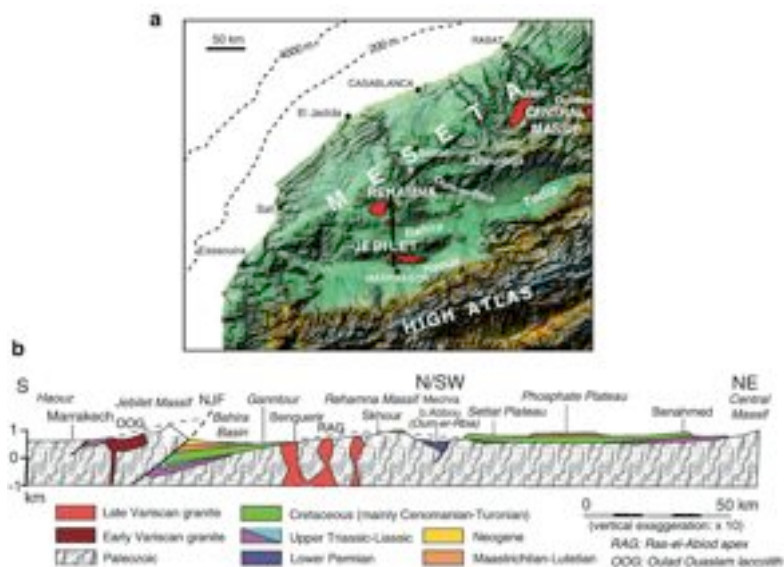


Fig. 3. (a) Modèle topographique de la Meseta marocaine (GETOPO data) et régions voisines, avec localisation des granites étudiés. Ligne en gras: trait de coupe (b). Asterisk: localisation de la photo Fig. 6. (b) Coupe géologique de la Meseta marocaine au sud du Massif Central. Noter l'exagération verticale.

3. Echantillonnage et procédure expérimentale

Huit échantillons sur dix (fig. 4, tableau 1) ont été prélevés dans des granites, dont trois à l'est des Jebilet centrales (granite d'Ouled Ouaslam; Boummame et Olivier, 2007), trois à l'ouest des Jebilet centrales (granite granophyre de Tabouchent; Huvelin, 1977; Essaifi et al., 2001, 2003), et deux dans les Rehamna centrales (leucogranite de Ras-El-Abiod; Hoepffner et al., 1982; Baudin et al., 2003). De plus, deux échantillons ont été prélevés dans les schistes paléozoïques des Rehamna centraux. Tous les échantillons ont été prélevés à 500-600 m d'altitude.

Tableau 1. Analyse des traces de fission sur Apatite dans les échantillons des Apatite Jebilet et Rehamna. Voir Fig. 4 pour la localisation des échantillons.

Echant	Lithologie	n	ρ_s	N_s	ρ_i	N_i	ρ_d	N_d	P(c2)	FT age	N	L	Dpar
			$\times 10^5 t/cm^2$		$\times 10^6 t/cm^2$		$\times 10^5 t/cm^2$		%	Ma \pm 1s		$\mu m \pm 1SD$	μm

Massif des Jebilet

JGO1	granodiorite	26	7.76	5496	3.76	2224	5.41	16464	99.9	193 \pm 5	111	11.90 \pm 2.12	1.48 \pm 0.12
JOG3	granodiorite	29	6.21	4029	2.91	1891	5.41	16464	99.1	199 \pm 6	-	-	1.43 \pm 0.19
JGO4	granodiorite	26	5.55	4881	2.72	2394	5.41	16464	100	190 \pm 5	100	11.07 \pm 2.27	1.28 \pm 0.12
JTB2	granophyre	29	6.52	4229	3.28	2126	5.41	16464	99.3	186 \pm 5	80	11.37 \pm 2.45	1.32 \pm 0.10
JTB3	granophyre	24	1.81	2482	8.47	1163	5.41	16464	100	199 \pm 7	-	-	1.31 \pm 0.10
JTB4	granophyre	26	2.05	2702	9.42	1243	5.41	16464	99.8	203 \pm 7	-	-	1.27 \pm 0.13

Massif des Rehamna

RH1	schist	11	1.90	633	1.80	598	8.52	17645	99.9	148 \pm 9	-	-	1.75 \pm 0.14
RH4B	schist	10	0.19	168	0.18	154	8.52	17645	99.8	153 \pm 18	-	-	1.83 \pm 0.15
RH8	leucogranite	15	3.88	649	3.62	605	8.52	17645	99.6	150 \pm 9	100	12.43 \pm 1.96	1.30 \pm 0.09
RH9A	leucogranite	15	4.00	997	3.55	885	8.52	17645	100	153 \pm 8	100	11.91 \pm 1.94	1.49 \pm 0.13
JTB3	granophyre	24	1.81	2482	8.47	1163	5.41	16464	100	199 \pm 7	-	-	1.31 \pm 0.10
JTB4	granophyre	26	2.05	2702	9.42	1243	5.41	16464	99.8	203 \pm 7	-	-	1.27 \pm 0.13

n, N_s and N_i , respectively number of crystals dated, total number of spontaneous and induced tracks counted; ρ_s and ρ_i , respectively spontaneous and induced track density in apatite grains and their detectors (JGO-JTB: kapton; RH: muscovite); ρ_d , mean induced track density in the detectors associated to NIST neutron glass monitors 962 (JGO-JTB) and CN5 (RH). $P(\chi^2)$ is the probability of obtaining a χ^2 value for n-1 degrees of freedom. As all samples passed the test at a 95% confidence level with $P(\chi^2) > 5\%$, ages were calculated using pooled statistics (Green, 1981). Zeta value of F.Z. El Haimer, analyst, 350 \pm 17 (JGO-JTB) and O. Saddiqi, analyst, 333 \pm 8 (RH) (1σ). Confined tracks: L and l s.d. are respectively the mean value and standard deviation, (N) is the number of tracks measured.

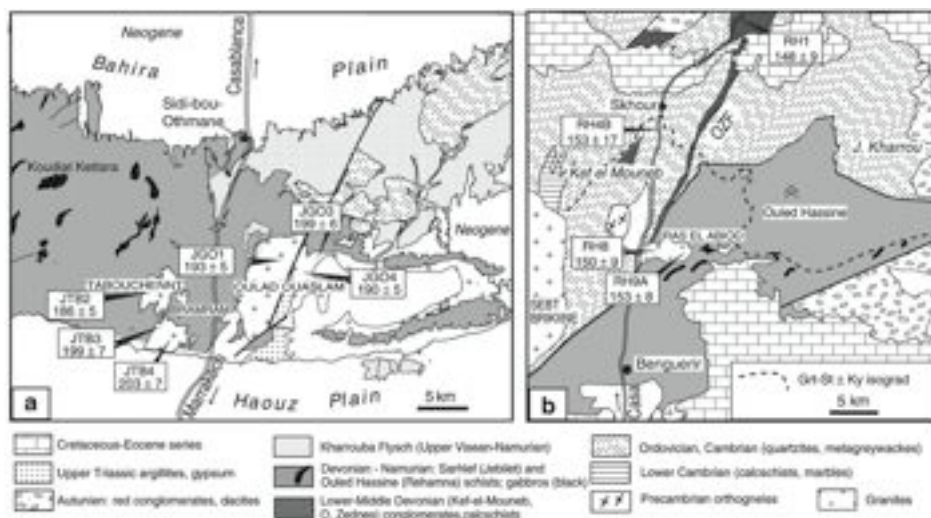


Fig. 4. Carte d'échantillonnage et résultats AFT (Ages moyens). (a) Jebilet Centrales; contours géologiques d'après Huvelin (1977). (b) Rehamna Centraux; contours géologiques d'après Michard (Ed.) (1982). Voir Fig. 2b pour localisation.

Les grains d'apatite ont été séparés en utilisant des liqueurs denses classiques (Bromoforme et Méthyl-iodure) et les procédures magnétiques de séparation. Les échantillons ont été datés par la technique du détecteur externe (feuilles de kapton pour les Jebilet, muscovite pour les Rehamna). Les traces de fission spontanées ont été révélées dans l'apatite avec l'acide nitrique 1M HNO_3 solution à 20°C pendant 45s, en utilisant une solution d'ébullition de l'hypochlorite de potassium pendant 8 min, et en muscovite dans HF à 40% pendant 45 min. Pour chaque échantillon, une population d'âge unique est observée. Le Dpar a été mesuré pour chaque échantillon (cinq mesures par grain). Les longueurs des traces confinées ont été réalisées sur cinq échantillons en utilisant une tablette graphique (Tableau 1).

4. Résultats

Nos analyses AFT sur les granites des Jebilet montrent des âges AFT qui s'étalent entre $202,6 \pm 7$ et $185,7 \pm 5$ Ma (Tableau 1). La longueur moyenne des traces (MTL) varie de 11,90 à 11,07 microns avec des écarts types de 2,4 à $2,1 \mu\text{m}$. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Mansour (1991) en utilisant la méthode des populations, méthode abandonnée et remplacée par celle du détecteur externe, avec des âges AFT allant de 218 ± 23 Ma à 170 ± 15 Ma (l'âge moyen est de 186 Ma).

Dans les échantillons des Rehamna, les âges AFT des granites et des schistes sont regroupés entre $148,4 \pm 9,3$ et $157,8 \pm 8,4$ Ma (Tableau 1), et sont identiques à ceux obtenus par Ghorbal et al. (2008). La longueur moyenne des traces confinées est rangée entre 12,43 à $11,91 \mu\text{m}$ (moins de $\sim 1 \mu\text{m}$ que la MTL donnée par Ghorbal et al. 2008) avec une déviation standard de 1,96 à $1,94 \mu\text{m}$. Les valeurs des Dpar sont homogènes au sein des échantillons et sont compris entre 1,27 et $1,83 \mu\text{m}$. Il n'y a pas de variation significative entre les valeurs des Dpar pour les deux massifs étudiés.

Les données ont été modélisées en utilisant le modèle de recuit (Ketcham et al. 1999) et AFTSolve (Ketcham, 2005). Les contraintes géologiques utilisées dans cette modélisation sont les suivantes:

- (1) La présence des deux massifs près de la zone totale de recuit à 280Ma, i) les granites étudiés sont datés à 330 Ma dans les Jebilet (Essaifi et al., 2003; Boummame et Olivier, 2007) et ~ 300Ma dans les Rehamna (Baudin et al., 2003) et ii) l'absence des galets de granite dans les dépôts autuniens affleurant à la périphérie des deux massifs témoigne que les granites étaient encore en dessous de la surface à 280Ma ;
- (2) La présence des échantillons à basse température pendant le Trias comme le prouvent les dépôts du Trias supérieur au-dessus du granite d'Ouled Ouaslam à l'ouest des Jebilet (Huvelin, 1977; Hollard et al., 1985), dans les forages de la Bahira au nord de la faille des Jebilet, et dans les affleurements ouest et nord du Massif des Rehamna ;
- (3) La présence des échantillons près de la surface à la fin du Crétacé inférieur avant la transgression cénomano-turonienne qui s'étend à travers l'Afrique du Nord (Guiraud

Les résultats de la modélisation montrent (fig. 5) :

- (1) Une exhumation rapide durant le Permien qui amène les échantillons vers la surface. Cette exhumation est contemporaine de l'enfouissement et l'érosion de la chaîne varisque. La distance par rapport à la surface apparaît toutefois différente pour les deux massifs: le granite des Jebilet était au moins partiellement à la surface (cf. transgression des sédiments du Trias), alors que le granite des Rehamna était encore en profondeur ;
- (2) Une phase de réchauffement jusqu'au Toarcien-Bajocien (180-170Ma). Cette épisode est contemporain de l'accumulation des sédiments enregistrée dans les bassins adjacents de l'Atlas, la plateforme de la Meseta orientale et le domaine pré-rifain (Charrière, 1990; Zizi, 2002) ;

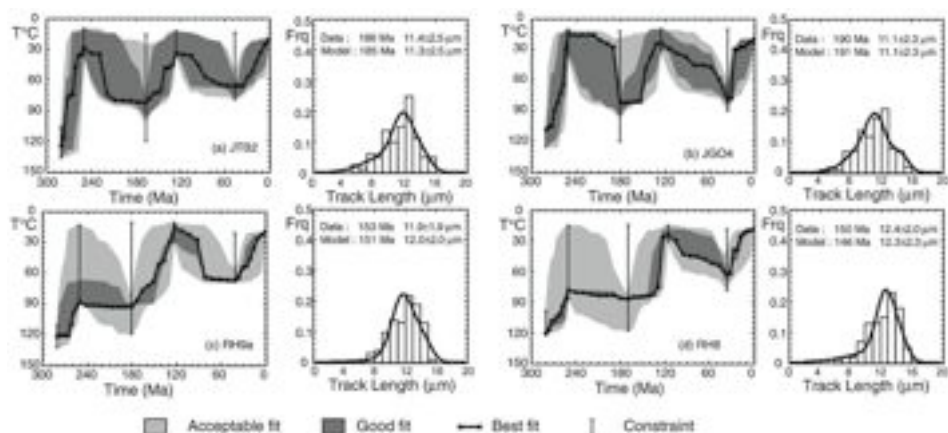


Fig. 5. Modélisations expérimentales (AFTSolve) pour les granites des Jebilet Centrales (a, b) et les granites et schistes des Rehamna Centraux (c, d).

- (3) Une exhumation renouvelée apportant les granites et les schistes des Rehamna ainsi que les granites des Jebilet jusqu'à la surface avant la transgression céno-mano-Turonienne (fig. 6), et probablement dès le Barrémien-Aptien, c'est à dire à 120-100 Ma (Gigout, 1954; Bolleli et al., 1959; Baudin et al., 2003; Frizon de Lamotte et al., 2008, Hoepffner et al, 2011).

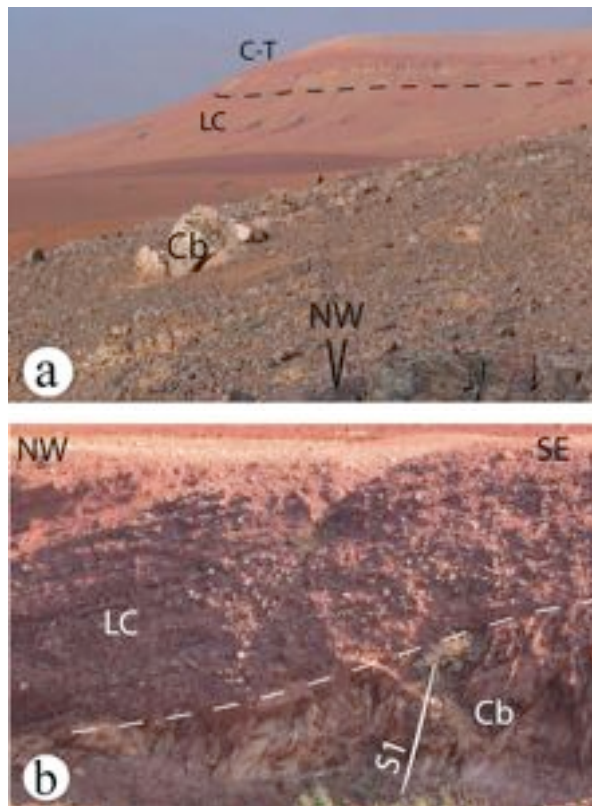


Fig. 6. Transgression du Crétacé (fig. 2a pour localisation). (a) Vue du Crétacé (LC) - Cenomanien-Turonien (C-T) au dessus du socle paléozoïque (Cb: Cambrien moyen). (b) La transgression majeure à la base du Crétacé est marquée par des couches rouges et des conglomérats. S1: Schistosité varisque.

L'enfouissement modéré durant le Crétacé supérieur-Eocène jusqu' à 35-40Ma, qui correspond à la dernière sédimentation marine dans le golf de l'Atlantique où les séries des phosphates se sont déposées sur les domaines de la Meseta et des Atlas (Boujo, 1976; Charrière, 1990; Herbig et Trappe, 1994; Zouhri et al, 2008).

5. Discussion

5.1. Les implications régionales

La Meseta marocaine a longtemps été considérée comme un ancien bloc soulevé entre l'Atlantique et les bassins d'enfouissement des Atlas durant la période Trias-Lias («Terre des Almohades», Choubert et Faure-Muret, 1962), actuellement appelée West Moroccan

Arch (WMA: Hafid, 2006; El Arabi, 2007). Le réchauffement qui a affecté les granites des Jebilet et des Rehamna jusqu'à $80 < T < 100^{\circ}\text{C}$ (fig. 5) avant leur refroidissement au Jurassique sup-Crétacé inf montre que le socle de la Meseta a connu une subsidence considérable au cours du Trias-Jurassique moyen. Cette conclusion est aussi celle de Ghorbal et al. (2008). Dans le cas des granites des Jebilet, qui ont affleuré à 260-250 Ma (voir ci-dessus), le réchauffement aurait atteint $60-80^{\circ}\text{C}$. Avec un gradient géothermique de $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, cela correspondrait à 2-2,4 km d'enfouissement sédimentaire à 180-170Ma. Cependant, le gradient géothermique était probablement plus fort au cours de l'intervalle 200-185Ma, en raison de l'immense magmatisme de la CAMP (Knight et al., 2004; Verati et al., 2007). Les veines de barytine réparties dans les Jebilet occidentales sont une évidence de l'activité hydrothermale dominante lors de l'ouverture de l'Atlantique au Trias-Jurassique moyen (Valenza et al., 2000). De même, des analyses K-Ar des micas dans les métapélites du Cambrien et les argilites du Trias (Huon et al., 1993) ont mis en évidence un événement thermique au Trias-Lias (195 ± 4 Ma, localement 184 ± 4 Ma) dans la Meseta occidentale. Par conséquent, en supposant un gradient géothermique de $40^{\circ}\text{C}/\text{km}$, l'enfouissement de l'WMA aurait pu être limité à 1,5-2km, inférieur à la valeur de 3 km proposée par Ghorbal et al. (2008).

L'épaisseur de 1,5 à 2km restaurée ici se compare avec l'épaisseur des séquences Trias-Lias préservées :

- i) à l'ouest et au nord-ouest du Massif des Jebilet, des séquences discordantes au-dessous du Jurassique supérieur-Crétacé inférieur, c'est à dire de 2 à 2,5 km dans le puit 1 d'Essaouira (Hafid, 2006), et de 1,5-2 km dans les profils sismiques du bassin de Doukkala-Abda (Echarfaoui et al, 2002a,b).
- ii) au nord et au nord-est de la Meseta marocaine, 1 à 1,5km dans les Rides Prérimaires (Sani et al., 2007.), ainsi que dans le Moyen Atlas tabulaire (Charrière, 1990; Gomez et al., 1996). Les dépôts contemporains dans les bassins de l'Atlas sont plus épais (~ 2 à 3,5km) et la subsidence continue là pendant le Dogger (Charrière, 1990 ; Ellouz et al., 2003, Studer, 1987 ; Warme, 1988). En revanche, la subsidence relativement modérée au Trias-Lias suggérée par nos données AFT pour la partie sud de la Meseta occidentale se compare favorablement à celle de la Haute Moulouya et le bassin de Missouri dans la Meseta orientale, qui varie de 1 à 2 km (Beauchamp et al., 1996; Ellouz et al., 2003).

Pour conclure, la Meseta occidentale marocaine aurait été un grand bassin dans la paléogéographie au Trias-Lias du Maroc, comparable à la Meseta orientale (Oranaise), au lieu d'être une terre émergée comme on l'admettait jusqu'à maintenant. La haute portion du Lias formé par le Moyen Atlas tabulaire et du Bassin Selloum (El Arabi et al., 2001) pourrait être une image de la West Moroccan Arch, avant le soulèvement et l'érosion au Jurassique-Crétacé.

Une autre implication des résultats rapportés par AFT (fig. 5) est l'importance du soulèvement au Jurassique supérieur-Crétacé inférieur qui a affecté les massifs des Jebilet et des Rehamna, et probablement l'ensemble de la WMA, résultant de l'érosion très active (fig. 6) de la couverture au Trias-Jurassique et du socle sous-jacent. Cette phase de soulèvement (responsable de la seconde bosse sur les chemins de T-t) est contemporaine de l'émersion de la majeure partie du domaine Atlasique, qui a été largement couvert par des couches rouges d'âge Bathonien-Barrémien, qui proviennent en partie du soulèvement de la WMA (Charrière et al., 1994, 2005; Frizon de Lamotte et al., 2008, Saddiqi et al., 2009).

Le soulèvement et l'érosion de la WMA ont été importants pendant l'orogénèse atlasique, comme le montre la dernière partie du parcours T-t des deux massifs Rehamna et Jebilet (fig. 5), alors que seul le dernier est délimité par une faille inverse majeure (Fig. 3). Toutefois, le raccourcissement crustal, qui a commencé à l'Eocène supérieur (Frizon de Lamotte et al., 2009), ne représente qu'une petite partie du soulèvement récent de la WMA; la part la plus significative résulte de l'amincissement lithosphérique régional, également responsable de l'important soulèvement de l'Atlas et de l'Anti-Atlas (Teixell et al., 2005; Missenard et al., 2006; Babault et al., 2008, Oukassou et al., 2013).

5.2. Le rôle de l'âge et de la profondeur de mise en place des granites échantillonnés

Les granites des Jebilet et des Rehamna donnent des âges AFT hétérogènes soit de 186 à 203 Ma et de 148-153 Ma respectivement, bien qu'ils aient suivi quasiment le même chemin T-t (fig. 5). Nous soutenons dans ce qui suit que cette différence d'âge AFT surprenante peut être expliquée par des différences dans l'âge et la profondeur de mise en place des granites étudiés.

Les granites des Jebilet mis en place comme des laccolites à ~ 330 Ma, avant et durant l'événement principal de plissement (Essaifi et al., 2001, 2003; Boumanne et Olivier, 2007), c'est à dire dans le niveau structural supérieure probablement moins de ~7 km de profondeur. Cette estimation est appuyée par la pétrologie des schistes encaissants caractérisés par une cristallisation très répandue d'andalousite (fig. 7).

En revanche, le granite de Sebti Brikiine du Massif des Rehamna a donné un âge de 270 Ma sur Rb-Sr sur roche totale (Mrini et al., 1992), et mis en place probablement à 300-290 Ma. Ce batholite tardi orogénique, à peine plus âgé que le volcanisme rhyolitique et dacitique du Permien inférieur, mis en place à la base du Paléozoïque plissé comme indiqué par la cartographie détaillée (Hoepffner et al., 1982; Baudin et al., 2003), c'est à dire à environ 10 km de profondeur est semblable au granite de Oulmes dans le Massif Central (Tahiri et al., 2007). La partie orientale du batholite et les sommets adjacents tels que le leucogranite de Ras-el-Abiod mis en place à la même profondeur que l'unité de haut degré de la zone cisailée de la Meseta occidentale (WMSZ; Hoepffner et al., 1982; Lagarde et Michard, 1987; Michard et al., 2008). Cette unité est caractérisée par le développement du staurotide et du disthène, équilibrée la première fois à environ 15 km de profondeur (fig. 7).

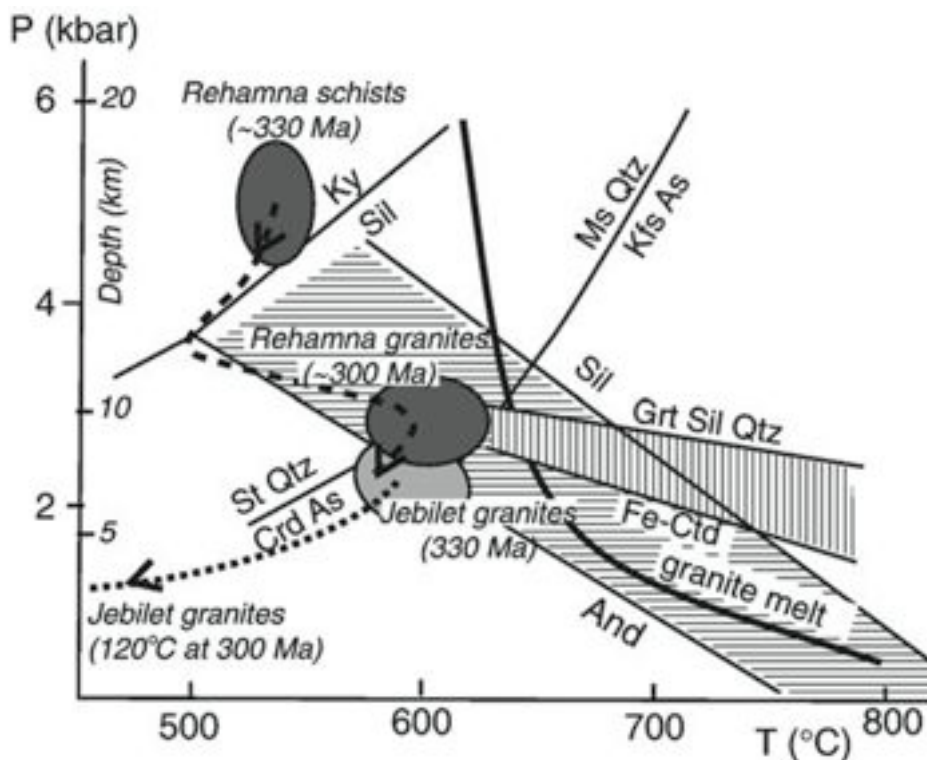


Fig. 7. Conditions P-T estimées pour la cristallisation des schistes des Jebilet et Rehamna et position pétrogénétique des granites d'après les associations minérales décrites par Essaifi et al. (2001) and Hoepffner et al. (1982), respectivement. Dashed: high-temperature P-T-t paths of the studied samples. Horizontally ruled: andalusite-sillimanite transition (Pattison, 1992). Vertically ruled: cordierite-garnet transition (Holdaway and Lee (1977). Staurolite-cordierite experimental curve after Richardson (1968). Peraluminous granite melt after Willye (1977). And: andalusite; As: aluminium silicate; Chl: chlorite; Cld: chloritoïde; Crd: cordiérite; Fe-Cld: iron-rich chloritoid; Grt: garnet (grenat); Kfs: K-felspar (feldspath); Ky: kyanite (disthène); Ms: muscovite; Qtz: quartz; Sil: sillimanite; St: staurolite.

En ce qui concerne les différences étonnantes (40-50 Ma) entre les âges moyens de AFT des massifs étudiés, ils peuvent être expliqués par la différence d'âge et la profondeur de mise en place des granites échantillonnés: les granites anciens et profonds ont franchis ou traversé la APAZ plus tôt que les granites jeune et plus profonds. En d'autres termes, dans les deux massifs, la succession des phases de refroidissement et de réchauffement a été identique aussi bien que la chronologie de l'érosion et l'événement de l'enfouissement est considéré, mais la température atteinte durant la première phase de l'érosion a été différente. Ainsi, la structure initiale et l'évolution du socle de n'importe quel tabulaire jeune ou un domaine montagneux doit être pris en compte afin d'interpréter les différences potentielles dans les âges AFT observées dans les différentes roches du socle. La différence des âges AFT entre les granites des Jebilet (186-202 Ma) et ceux des Rehamna et leur encaissant (148-158 Ma) est reconstruite à travers la figure 8.

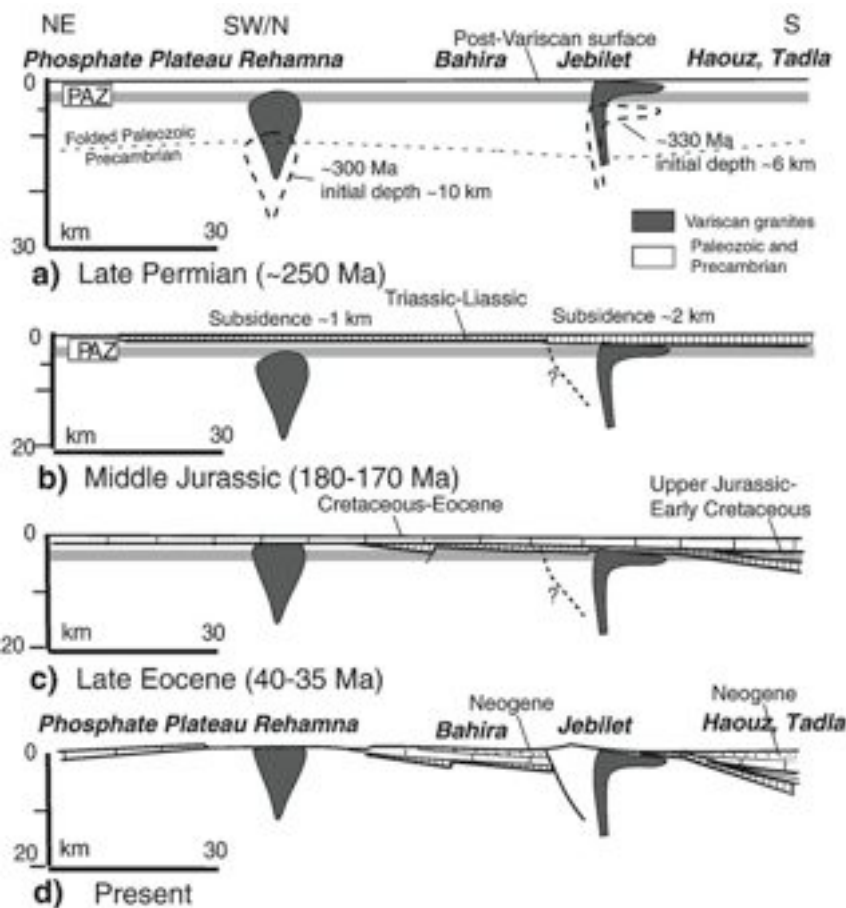


Fig. 8. Interprétation des résultats AFT obtenus sur les massifs granitiques et schistes du socle hercynien de la Meseta marocaine (a) At ~250 Ma (Late Permian), the early and shallow Jebilet granites are totally exhumed, whereas the deeper and younger Rehamna granites are still overlain by ~2 km of Paleozoic rocks. - (b) At the maximum of the Triassic-Liassic subsidence, i.e. at 180-170 Ma (latest Liassic-early Dogger), heating is comparable in both massifs, suggesting a southward thickening of the sedimentary burial. - (c) Late Eocene (40-35 Ma) heating event. The Late Jurassic-Early Cretaceous uplift and erosion (not shown) have completed the denudation of the Rehamna granites, whereas remnants of Triassic-Jurassic sequences are preserved southward. The Meseta basement is buried beneath the Upper Cretaceous-Eocene series, the thickness of which slightly increases south-westward. - (d) During the Atlas Orogeny, the Meseta Domain itself has been deformed, particularly close to the High Atlas (not shown, south of the Tadla and Haouz Basins). The basement massifs are exhumed and cooled below the apatite PAZ temperature. The vertical movement is related to a major reverse fault in the Jebilet, and to a very large wave-length crustal fold in the Rehamna.

6. Conclusion

Les données AFT présentées ici concernent une zone structurale majeure du Maroc, la WMA qui s'est formée pendant le Permien sup-Trias moyen de l'épaulement oriental du rift de l'Atlantique central et de l'épaulement nord-occidental du rift de l'Atlas (téthysien). Cette zone a agi comme un bloc relativement stable de la croûte varisque durant le Mésozoïque-Paléogène, largement couvert par les séries tabulaires du Crétacé-Eocène des phosphates et des plateaux de Gannour.

Nos résultats AFT sont basés sur les échantillons prélevés dans le socle des deux massifs au sud de la WMA, à savoir les massifs des Jebilet et des Rehamna. Ils ont donné des âges différents, de 203-186 Ma et de 148-153 Ma, respectivement. Les chemins Température-temps produits sont caractérisés par un aspect à deux bosses. Ils montrent que la WMA a été en subsidence durant le Trias et le Jurassique inférieur avant d'être soulevée et érodée durant le Jurassique supérieur-Crétacé inférieur. Par conséquent, le précédent concept de la Meseta occidentale émergée en permanence avant la transgression céno-manoturonienne doit être abandonnée. Nos résultats suggèrent que, durant le Jurassique inférieur et moyen, la WMA peut être comparée à la Meseta orientale-Missour, avec une couverture sédimentaire d'une épaisseur de 2 km au moins.

Références bibliographiques

- [1] Aghzer, A.M., Arenas, R., 1995. Evolution métamorphique des métapélites du massif hercynien des Rehamna (Maroc). *J. Afr. Earth Sci.*, 21, 383-393.
- [2] Babault, J., Teixel, A., Arboleya, M.L., Charroud, M., 2008. A Late Cenozoic age for long wave-length surface uplift of the Atlas Mountains of Morocco. *Terra Nova* 20, 102-107.
- [3] Barbarand, J., Hurford, T., Carter, A., 2003. Variation in apatite fission-track length measurement: implications for thermal history modelling, *Chemical Geology* 198, 77-106.
- [4] Barbero, L., Teixell, A., Arboleya, M.-L., Rio, P.D., Reiners, P.W., Bougadir, B., 2007. Jurassic-to-present thermal history of the central High Atlas (Morocco) assessed by low-temperature thermochronology. *Terra Nova* 19, 58-64.
- [5] Baudin, T., Chèvremont, P., Razin, P., Youbi, N., Andriès, D., Hoepffner, C., Thiéblemont, D., Chihani, E.M., Tegye, M., 2003. Carte géologique du Maroc au 1/50 000, feuille de Skhour des Rehamna, Mémoire explicatif. Notes Mém. Serv. Carte géol. Maroc, 435 bis, 1-114.
- [6] Beauchamp, W., Barazangi, M., Demnati, A., El Alji, M., 1996. Intracontinental rifting and inversion : Missouri Basin and Atlas Mountains, Morocco. *AAPG Bull.* 80, 1459-1482.
- [7] Bolleli, E., Choubert, G., Faure-Muret, A., Salvan, H., Suter, G., 1959. Carte géologique du Plateau des Phosphates et de la Zone synclinale du Tadla, feuilles Benahmed-El Borouj 1:200.000. Notes Mém. Serv. géol. Maroc 137.
- [8] Boujo, A., 1976. Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphates Crétacé-Eocène des Gannour (Maroc occidental). *Sci. Géol. Mém. Strasbourg*, 43, 227 pp.

- [9] Boummane, M.H., Olivier, Ph., 2007. The Oulad Ouaslam Variscan granitic pluton (Jebilet Massif, southwestern Moroccan Meseta): A forcibly emplaced laccolithic intrusion characterized by its magnetic and magmatic fabrics. *J. Afr. Earth Sci.*, 47, 49-61.
- [10] Charrière A., 1990. Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen Atlas au SE de Fès (Maroc), Unpubl. Doct. Etat thesis, Univ.Paul-Sabatier Toulouse, 589 p.
- [11] Charrière, A., Dépêche, F., Feist M., Grambast-Fessard, N., Jaffrezo, M., Peybernès, B., Ramalho, M., 1994. Microfaunes, microfiores et paléoenvironnements successifs dans la formation d'El Mers (Bathonien- ?Callovien) du synclinal de Skoura (Moyen Atlas, Maroc). *Geobios*, 27,157-174.
- [12] Charrière, A., Haddoumi, H., Mojon, P.O., 2005. Découverte de Jurassique supérieur et d'un niveau marin du Barrémien dans les « couches rouges » continentales du Haut Atlas central marocain : implications paléogéographiques et structurales. *C. R. Palevol.* 4, 385-394.
- [13] Choubert, G., Faure-Muret, A., 1962. Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques, in *Livre à la mémoire du Professeur Paul Fallot*, Soc. Géol. Fr., Mém. h.-s. 447-527.
- [14] Dempster, T.J., Persano, C., 2006. Low-temperature thermochronology: Resolving geotherm shapes or denudation histories? *Geology* 34, 73-76.
- [15] Echarfaoui, H., Hafid, M., Aït Salem, A., 2002. Structure sismique du socle paléozoïque du bassin des Doukkala, Môle côtier, Maroc occidental. Indication en faveur de l'existence d'une phase éovarisque. *C. R. Géosciences*, 334, 13-20.
- [16] Echarfaoui, H., Hafid, M., Aït Salem, A., Aït Fora, A., 2002. Analyse sismo-structurale du bassin d'Abda (Maroc occidental), exemple de structures inverses pendant le rifting atlantique. *C. R. Geoscience* 334, 371-377.
- [17] El Arabi, E.H., 2007. La série permienne et triasique du rift haut-atlasique : nouvelles datations ; évolution tectono-sédimentaire, Unpubl. Thesis (Thèse d'Etat) Université Hassan II Casablanca, 225 p.
- [18] El Arabi, E.H., Diez, J.B., Broutin, J., Essamoud, R., 2006a. Première caractérisation palynologique du Trias moyen dans le Haut Atlas ; implications pour l'initiation du rifting téthysien au Maroc, *C. R. Géosciences* 338, 641-649.
- [19] El Arabi, E.H., Hafid, M., Ferrandini, J., Essamoud, R., 2006b. Interprétation de la série syn-rift haut-atlasique en termes de séquences tectonostratigraphiques, transversale de Telouet, Haut Atlas (Maroc). *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc* 541, 93-101.
- [20] El Arabi, H., Ouhabbi, B., Charrière, A., 2001. Les séries du Toarcien-Aalénien du SW du Moyen-Atlas (Maroc) : précisions stratigraphiques et signification paléogéographique. *Bull. Soc. géol. Fr.* 172, 723-736.
- [21] El Arabi, H., Canérot, J., Ouhabbi, B., Charrière, A., Kerchaoui, S., 2004. The Selloum Basin : new element of the Middle Liassic paleogeography in the southern Middle Atlas (Morocco). *J. Afr. Earth Sci.* 39, 393-400.

- [22] Ellouz, N., Patriat, M., Gaulier, J.M., Bouatmani, R., Saboundji, S., 2003. From rifting to Alpine inversion: Mesozoic and Cenozoic subsidence history of some Moroccan basins, *Sedim. Geol.* 156, 185-212.
- [23] Essaifi, A., Lagarde, J.L. and Capdevila, R., 2001. Deformation and displacement from shear zone patterns in the Variscan upper crust, Jebilet, Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 32, 335-350.
- [24] Essaifi, A., Potrel, A., Capdevila, R., Lagarde, J.L., 2003. Datation U-Pb : âge de mise en place du magmatisme bimodal des Jebilet centrales (chaîne varisque, Maroc); Implications géodynamiques. *C. R. Geoscience* 335, 193-203.
- [25] Favre, P., Stampfli, G., Wildi, W., 1991. Jurassic sedimentary record and tectonic evolution of the north western corner of Africa. *Paleog. Paleoclim. Paleoecol.* 87, 53-73.
- [26] Frizon de Lamotte, D., Crespo-Blanc, A., Saint Bézar, B., Comas, M., Fernández, M., Zeyen, H., Ayarza, P., Robert-Charrie, C., Chalouan, A., Zizi, M., Teixell, A., Arbolea, M.-L., Alvarez-Lobato, F., Juliver, M. & Michard, A. 2004. TRANSMED-TRANSECT I: Iberian Meseta - Guadalquivir Basin - Betic Cordillera - Alboran Sea - Rif - Moroccan Meseta - High Atlas – Sahara Domain. In: *The TRANSMED atlas - The Mediterranean region from crust to mantle* (edited by Cavazza, R. W., Roure, F., Spakman, W., Stampfli, G. M. & Ziegler, P. A.). Springer-Verlag, Berlin, 91-96.
- [27] Frizon de Lamotte D., Zizi, M., Missenard Y, Hafid, M., El Azzouzi, M., Maury, R.C., Charrière, A., Taki, Z., Benammi, M., Michard A., 2008. The Atlas System. In: Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Frizon de Lamotte, D. (Eds.), *Continental evolution: The Geology of Morocco*. *Lect. Notes Earth Sci.* 116, Springer Verl., 133-202.
- [28] Fulla, J., Fernandez, M., Afonso, J.C., Verges, J. and Zeyen, H., 2010. The structure and evolution of the lithosphere-asthenosphere boundary beneath the Atlantic Mediterranean Transition Region. *Lithos*, 120, 74-95.
- [29] Ghorbal, B., Bertotti, G., Foeken, J., Andriessen, P., 2008. Unexpected vertical Jurassic to Neogene movements in “stable” parts of NW Africa revealed by low temperature geochronology. *Terra Nova* 20, 355-366.
- [30] Gigout, M., 1954. Carte géologique de la Meseta entre Mechra-ben-Abbou et Safi (Abda, Doukkala et massif des Rehamna), 1/200 000. *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc* 84.
- [31] Gomez, F., Barazangi, M., Bensaid, M., 1996. Active tectonism in the intracontinental Middle Atlas Mountains of Morocco: synchronous crustal shortening and extension. *J. Geol. Soc. London* 153, 389-402.
- [32] Green, P.F., 1981. A new look at statistics in the fission track dating. *Nucl. Tracks* 5, 77-86.
- [33] Guiraud, R., Bosworth, W., Thierry, J., Delplanque, A., 2005. Phanerozoic geological evolution of northern and central Africa: an overview. *J. Afr. Earth Sci.* 43, 83-143.
- [34] Hafid, M., 2006. Styles structuraux du Haut Atlas de Cap Tafelney et de la partie septentrionale du Haut Atlas occidental: tectonique salifère et relation entre l’Atlas et l’Atlantique. *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc* 465, 172 p.

- [35] Hafid, M., Zizi, M., Bally, A.W., Ait Salem, A., 2006. Structural styles of the western onshore and offshore termination of the High Atlas, Morocco. *C. R. Geoscience* 338, 50-64.
- [36] Hafid, M., Tari, G., Bouhadioui, B., El Moussaid, I., Eccharfaoui, H., Aït Salem, A., Nahim, M., Dakki M., 2008. Atlantic Basins. In: Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Frizon de Lamotte, D. (Eds.), *Continental evolution: The Geology of Morocco*. *Lect. Notes Earth Sci.* 116, Springer Verl., 301-329.
- [37] Herbig H.G., Trappe J., 1994. Stratigraphy of the Subatlas Group (Maastrichtian-Middle Eocene, Morocco). *Newslett. Stratigr.* 30, 125-165.
- [38] Hmich, D., Schneider, J.W., Saber, H., Voigt, S., El Wartiti, M., 2006. New continental Carboniferous and Permian faunas of Morocco: implications for biostratigraphy, palaeobiogeography and palaeoclimate, in S.G. Lucas, G. Cassinis and J.W. Schneider (Eds.), *Non-marine Permian biostratigraphy and biochronology*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 265, 297-324.
- [39] Hoepffner, C., Jenny, P., Piqué, A., Michard, A., 1982. Le métamorphisme hercynien dans le massif des Rehamna, in A. Michard (Ed.), *Le massif paléozoïque des Rehamna (Maroc)*. *Stratigraphie, tectonique et pétrogenèse d'un segment de la chaîne varisque*. *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc* 303, 130-145.
- [40] Hoepffner, C., Houari, M.R., Bouabdelli, M., 2006. Tectonics of the North African Variscides (Morocco, Western Algeria), an outline. In: D. Frizon de Lamotte, O. Saddiqi, A. Michard (Eds.), *Recent Developments on the Maghreb Geodynamics*. *C. R. Geoscience* 338, 25-40.
- [41] Hoepffner, C., Saddiqi O. & Michard A. 2011. Massif des Rehamna/Rehamna Massif, in NOUVEAUX GUIDES GÉOLOGIQUES ET MINIERES DU MAROC/NEW GEOLOGICAL AND MINING GUIDEBOOKS OF MOROCCO. A. MICHARD, O. SADDIQUI, A. CHALOUAN, E. RJIMATI & A. MOUTTAQI (Eds)
- [42] Holdaway, M.J., Lee, S.M., 1977. Fe-Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical and natural observations. *Contrib. Mineral. Petrol.* 63, 175-198.
- [43] Hollard H., Choubert G., Bronner G., Marchand J., Sougy J., 1985. Carte géologique du Maroc, scale 1:1,000,000.- *Serv. Carte géol. Maroc*, 260 (2 sheets).
- [44] Huon S., Cornée J.J., Piqué A., Rais N., Clauer N., Liewig N., Zayane R., 1993. Mise en évidence au Maroc d'événements thermiques d'âge triasico-liasique liés à l'ouverture de l'Atlantique. *Bull. Soc. géol. Fr.* 164, 165-176.
- [45] Huvelin, P., 1977. Etude géologique et gîtologique du massif Hercynien des Jebilet (Maroc occidental). *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc* 232, 232 bis, 1 vol. 308 p., 1 geol. map 1:100,000.
- [46] Ketcham, R.A., 2005. Forward and inverse modelling of low-temperature thermochronological data. *Rev. Mineral. Geochem.* 58, 275-314.
- [47] Ketcham, R.A., Donelick, R.A., Carlson, W.D., 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinematics: III. Extrapolation to geological time scales. *Am. Mineral.* 84, 1235-1255.

- [48] Knight K.B., Nomade S., Renne P.R., Marzoli A., Bertrand H., Youbi N., 2004. The Central Atlantic Magmatic Province at the Triassic-Jurassic boundary: paleomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence from Morocco for brief, episodic volcanism, *Earth Planet. Sci. Lett.* 228 143-160.
- [49] Lagarde, J.L., Michard, A., 1987. Stretching normal to the regional thrust displacement in a thrust-wrench shear zone, Rehamna Massif, Morocco. *J. Struct. Geol.* 8, 483-492.
- [50] Malusà M., Polino R., Cerrina Feroni A., Ferrero A., Ottria G., Baïdder L., Musumeci G., 2007. Post-Variscan tectonics in eastern Anti-Atlas (Morocco). *Terra Nova* 19, 481-489.
- [51] Mansour, E.M., 1991. Thermochronologie par la méthode des traces de fission dans l'apatite. Application aux massifs de l'Argentera-Mercantour (Alpes occidentales) et des Jebilet (Meseta marocaine). Thèse Univ. Joseph-Fourier, Grenoble, 197 p.
- [52] Martin J., Le Moyen Atlas Central, étude géomorphologique, 1981. Notes Mém. Serv. géol. Maroc 258 bis, 445 p.
- [53] Medina, F., 1995. Syn- and postrift evolution of the El Jadida-Agadir basin (Morocco): constraints for the rifting model of the central Atlantic. *Can. J. Earth Sci.* 32, 1273-1291.
- [54] Michard, A. (Ed.), 1982. Le massif paléozoïque des Rehamna (Maroc). Stratigraphie, tectonique et pétrogenèse d'un segment de la chaîne varisque. Notes Mém. Serv. Géol. Maroc 303, 180 p.
- [55] Michard, A., Hoepffner, C., Soulaïmani, A., Baïdder, L., 2008. The Variscan Belt. In: Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Frizon de Lamotte, D. (Eds.), *Continental evolution: The Geology of Morocco*. Lect. Notes Earth Sci. 116, Springer Verl., 65-132.
- [56] Missenard, Y., Zeyen H., Frizon de Lamotte, D., Leturmy, P., Petit, C., Sébrier, M., Saddiqi, O., 2006. Crustal versus asthenospheric origin of the relief of the Atlas Mountains of Morocco. *J. Geophys. Res.* 111 (B03401) doi:10.1029/2005JB003708.
- [57] Mrini, Z., Rafi, A., Duthou, J.L., Vidal, Ph., 1992. Chronologie Rb/Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc : Conséquences. *Bull. Soc. Géol. Fr. (n.s.)* 3, 281-291.
- [58] Oukassou M., Saddiqi, O., Barbarand J., Sebti S., Baïdder L., Michard A.. Post-variscan exhumation of the central Anti-Atlas (Morocco) constrained by zircon and apatite fission-track thermochronology, *Terra Nova*, 25, 151-159, 2013.
- [59] Pattison, D.R.M., 1992. Stability of andalusite and sillimanite and the Al_2O_3 triple point : constraints from the Ballachulish aureole, *Scot. J. Geol.* 100, 423-446.
- [60] Richardson, S.W., 1968. Staurolite stability in part of the system Fe-Al-Si-O-H. *J. Petrol.* 9, 467-488.
- [61] Saber, H., El Wartiti, M., Hmich, D., Schneider, J.W., 2007. Tectonic evolution from the Hercynian shortening to the Triassic extension in the Paleozoic sediments of the Western High Atlas (Morocco). *J. Iberian Geol.* 33, 31-40.
- [62] Saddiqi O., El Haimer F. Z., Michard A., Barbarand J., Ruiz G.M.H., Mansour E.M., Leturmy P. and Frizon de Lamotte D., 2009. Apatite fission-track analyses

- on basement granites from south-western Meseta, Morocco: Paleogeographic implications and interpretation of AFT age discrepancies, *Tectonophysics* 475, p. 29-37.
- [63] Sani, F., Del Ventisette, C., Montanari, D., Bendkik, A., Chenakeb, M., 2007. Structural evolution of the Rides Prérifaines (Morocco) : structural and seismic interpretation and analogue modelling, *Int. J. Earth Sci.* 96, 685-706.
- [64] Sebt S., Saddiqi O., Ruiz G., Michard A., Frizon de Lamotte D. Bousquet R. and Baidder L., 2009. Vertical movements at the fringe of the West African Craton: First zircon fission track datings from the Anti-Atlas Precambrian basement, Morocco, *C. R. Geoscience*, 341, p. 71-77.
- [65] Studer, M.A., 1980. Tectonique et pétrographie des roches sédimentaires, éruptives et métamorphiques de la région de Tounfite-Tirrhist (Haut Atlas central mésozoïque, Maroc), PhD thesis Univ. Neuchâtel. Notes Mém. Serv. géol. Maroc 43, 321, 1987, 65-197.
- [66] Tahiri, A., Simancas, J.F., Azor, A., Galindo-Zaldivar, J., Lodeiro, F.G., El Hadi, H., Martinez Poyatos, D.J., Ruiz-Constán, A., 2007. Emplacement of ellipsoid-shaped (diapiric?) granite: Structural and gravimetric analysis of the Oulmes granite (Variscan Meseta, Morocco). *J. Afr. Earth Sci.* 48, 301-313.
- [67] Teixell, A., Ayarza, P., Zeyen, H., Fernández, M., Arbolea, M.-L. 2005. Effects of mantle upwelling in a compressional setting: the Atlas Mountains of Morocco. *Terra Nova* 17, 456-461.
- [68] Valenza K., Moritz R., Mouttaqi A., Fontignie D., Sharp Z., 2000. Vein and karst barite deposits in the western Jebilet of Morocco : Fluid inclusion and isotope (S, O, Sr) evidence for regional fluid mixing related to Central Atlantic rifting. *Economic Geol.* 95, 587-606.
- [69] Verati C., Rapaille C., Féraud G., Marzoli A., Marzoli H., Bertrand H., Youbi N., 2007. Ar-Ar ages and duration of the Central Atlantic magmatic province volcanism in Morocco and Portugal and its relation to the Triassic-Jurassic boundary. *Paleogeogr. Paleoclim. Paleoecol.* 244, 308-325.
- [70] Warme J.E., 1988. Jurassic carbonate facies of the central and eastern High Atlas rift, Morocco, in Jacobshagen V. (Ed.), *The Atlas system of Morocco*, Lect. Notes Earth Sci. 15, 169-199.
- [71] Willye, P.J., 1977. Crustal anatexis: an experimental review. *Tectonophysics* 43, 41-71.
- [72] Zizi, M., 2002. Triassic-Jurassic extensional systems and their Neogene reactivation in northern Morocco- The Rides pré-rifaines and Guercif basin. Notes Mém. Serv. Géol. Maroc 416, 138 p.
- [73] Zouhri S., Kchikach A., Saddiqi O., El Haïmer F.Z., Baidder L., Michard A., 2008. The Cretaceous-Tertiary Plateaus. In: Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Frizon de Lamotte, D. (Eds.), *Continental evolution: The Geology of Morocco*. Lect. Notes Earth Sci. 116, Springer Verl., 331-358.

SPACE GEODESY FOR GEODYNAMIC AND EARTHQUAKE RESEARCH IN MOROCCO

Pr. Robert REILINGER

*Massachusetts Institute of Technology, Cambridge,
Massachusetts, USA*



With the collaboration of :

- Robert King, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, MIT, Cambridge, MA USA
- Driss Ben Sari and Driss Ouazar, Department of Civil Engineering, EMI, Rabat, Morocco
- Taoufik Mourabit, Abdelmalek Essaadi University, Tangier, Morocco
- Mostafa Serroukh, Abdelmalek Essaadi University, Tetouan, Morocco
- Ahmed El Hassani and Mimoun Harnafi, Institut Scientifique, Université Mohammed V Agdal, Rabat, Morocco
- Abdelilah Tahayt, Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST), Rabat, Morocco
- Rachid Azzouzi, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Morocco
- Achraf Koulali, Simon McClusky, Research School of Earth Sciences, ANU, Canberra, Australia
- Abdelali Fadil, School of Surveying, Otago University, New Zealand
- Philippe Vernant, Geosciences, University of Montpellier II, Montpellier, France
- Jose Martin Davila, Real Observatorio de la Armada, Cadiz, Spain
- Francisco Gomez, Department of Geological Sci., University of Missouri, USA
- Kurt Feigl, Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin, USA

Abstract

In this presentation, we review the historical development of space geodesy in Morocco and the major scientific results from >13 years of cooperative research.

Space geodetic research was introduced in Morocco in 1999 by a joint Morocco-USA project including EMI, Univ. Hassan II, Abdelmalek Assaadi Univ. Tetouan, MIT, and the Univ. of Missouri, with technical assistance provided by the University Navstar Consortium (UNAVCO). The first continuously tracking GPS station was established at EMI, Department of Earth Sciences in 2000; this station has operated continuously and is presently serving as a “Real-Time, NASA/IGS Global Tracking Station”. Additional continuous stations were established by our group at the University of Abdelmalek Assaadi, Department of Earth Sciences, Tetouan in 2000, and subsequently at Al Akhawayn University in Ifrane in 2001. The Ifrane station was relocated to the Seismological Observatory Facility in Ifrane in 2009 operated by the Institut Scientifique (Mohammed V Agdal University). Nation-wide survey GPS observations were initiated in 1999 with the establishment of 25 survey sites. The network has been reobserved periodically since then and expanded to include >40 sites at present. Additional continuous GPS stations were established by the ANCFCC that contribute data for geodynamic and atmospheric studies. The accuracy of site velocities varies with observation period, but many sites have horizontal velocity uncertainties < 0.7 mm/yr. Continuous stations provide constraints on vertical velocities at ~1 mm/yr.

In addition to contributing to the determination of Nubia Plate motion (McClusky et al., 2003, Reilinger and McClusky, 2011), significant results of these studies include:

- 1- The Rif Mountains, Alboran Sea, and Betic Mountains in Spain are deforming at rates of 3–4 mm/yr in association with active, oblique “collision” of the Nubian and Eurasian (Iberian) tectonic plates (Fadil et al., 2006, Tahayt et al., 2008, Vernant et al., 2010, Prowse et al., 2010, Koulali et al., 2012). This deformation is responsible for the significant earthquakes that struck the Al Hoceima region in 1994 and 2004 (Tahayt et al., 2009) and may reflect the same geodynamic processes that generated the Great Lisbon Earthquake and Tsunami of 1755 (Koulali et al., 2012, Gutscher, 2012).
- 2- GPS and InSAR observations constrain the coseismic fault slip for the 2004, Mw6.3 Al Hoceima Earthquake and help provide a framework for understanding the generation of earthquakes in this most active region of Morocco.
- 3- Shortening Across the High Atlas Mountains is less than 1 mm/yr consistent with rates deduced from geologic observations, and suggesting long repeat times for thrust events like the devastating 1960, M5.7, Agadir Earthquake.
- 4- Initial studies based on sparse data indicate that GPS observations of atmospheric water vapor hold promise for forecasting extreme weather events (Fadil and Ben Sari, 2007, Koulali et al., 2011).

In addition to helping develop geodetic expertise in Morocco, to date this project has resulted in 3 PhD degrees for Moroccan students, 2 Masters degrees (1 Moroccan and 1 French), the publication of 10 papers in refereed journals and over 20 presentations at international meetings. Furthermore, the project has been expanded to include direct cooperation with research groups in Spain and France with important implications for seismic and tsunami hazards in the western Mediterranean region.

Introduction and Project Background

Space geodetic research was introduced in Morocco in 1999 by a joint Morocco-USA project including EMI, University Hassan II, Abdelmalek Essaadi University, Tetouan, MIT, and the University of Missouri, with technical assistance provided by the University Navstar Consortium (UNAVCO). We initially established 25 precisely located GPS survey sites broadly distributed across the country north of the Sahara. The network has been reobserved periodically since then and expanded to include >40 sites at present. The first continuously tracking GPS station was established at EMI, Department of Civil Engineering in 2000; this station has operated continuously and is presently serving as a "Real-Time, NASA/IGS Global Tracking Station" (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/>). Additional continuous stations were established by our group at the University of Abdelmalek Essaadi, Department of Earth Sciences, Tetouan in 2000, and subsequently at Al Akhawayn University in Ifrane in 2001. The Ifrane station was relocated to the Seismological Observatory Facility in Ifrane in 2009 operated by the Institut Scientifique. Additional continuous GPS stations were established by the National Agency of Land Registry, Cadastre and Cartography (ANCFCC) that contribute data for geodynamic and atmospheric studies. The accuracy of site velocities varies with observation period, but many sites have horizontal velocity uncertainties < 0.7 mm/yr. Continuous stations provide constraints on vertical velocities at ~1 mm/yr.

GPS research in Morocco has expanded to include cooperation in data exchange and joint publication with cooperating partners in Spain (Real Observatorio de la Armada; ROA) and France (Montpellier Univ., Observatoire Midi-Pyrenees, Toulouse). This has allowed study of broad scale processes in the western Mediterranean zone of plate interaction with implications for earthquake and tsunami hazards as described below. Equally important, Morocco's international partners bring additional technical and academic opportunities to Moroccan students and scientists, as well as funding to extend and expand GPS infrastructure in the country. It is fundamentally important to the development of geodetic and geodynamic science in Morocco to support Moroccan participation in this broad range of international collaborations.

In this paper we briefly review the basic principles and applications of precise GPS observations, and describe the principal results for geodynamic and earthquake studies from our cooperative research project in the western Mediterranean region. While GPS in Morocco has also been used to monitor and study atmospheric water vapor with implications for weather forecasting (particularly extreme events), we restrict this paper to solid earth processes. We refer the interested reader to Fadil and Ben Sari (2006) and Koulali et al. (2012), for a discussion of recent studies in this important area of research.

GPS Geodesy

Geodesy is the study of the Earth's shape and gravity field and changes to them. Along with astronomy, it is perhaps the oldest of the sciences. Geodetic and survey techniques are essential for infrastructural development and as such have been continuously developed since early times. More than 2000 years ago, Greek scholars estimated the dimensions of the Earth from astronomical observations (Aujac, 2001). During the early Islamic period, Islamic scholars held to the notion of a spherical Earth and further developed geodetic and related fields of mathematics (King, 1993). More modern techniques began in the 17th century with spirit leveling and distance measurements. At present almost all geodetic and survey approaches involve space techniques. Chief among these is the Global Positioning System (GPS) (e.g., Hager et al., 1991).

GPS consists of a system of 32 satellites 20,000 km above the earth's surface that complete 2 orbits of the earth each 24 hrs (<http://tycho.usno.navy.mil/gpscurr.html>). The satellites are operated by the US Department of Defense in cooperation with the Interagency GPS Executive Board. The proliferation of applications across a broad array of social needs virtually assures open access to the system (i.e., commercial and personal navigation, surveying, communications, weather, structure monitoring, and many other engineering and scientific applications; National Research Council (1995)). Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have been developed by Russia (GLONASS), a European consortium (Galileo), Japan (QZSS), and China (Beidou) but these systems are not yet contributing significantly to measuring solid-Earth processes.

The basic principles involved in GPS precise positioning are provided in King et al. (1985), Fadil (2006), and Koulali (2011). The satellites transmit two microwave frequencies that allow observers on the ground to determine their position with an accuracy of 1-2 mm in horizontal coordinates and 3-10 mm in heights by recording data over a 24-hour period. The keys to obtaining these precisions from regional measurements are highly accurate orbital positions provided by the International GNSS Service (IGS) and processing software that uses elaborate mathematical models to account for the Earth's rotation, solid-Earth and ocean tides, and the atmospheric delay of the GPS signal.

Western Mediterranean Tectonic Framework and GPS Geodynamic Network

The tectonic framework of Morocco is dominated by the interaction between the Nubian (African) and Eurasian (Iberian) plates (Figure 1) (e.g., Dewey et al., 1989). Presently, the Nubian Plate moves in a NW direction with respect to Eurasia resulting in complex collision and strike-slip faulting from the Atlas Mountains (> 200 km from the plate boundary) to the Betic Mountains in S Spain (e.g., McClusky et al., 2003, Koulali et al., 2011). The Alboran Sea is an extensional basin that has developed since late Oligocene (~25 Ma) within this collisional setting (e.g., Jolivet and Faccenna, 2000; Platt and Vissers, 1989). North of the Alboran Sea the Betic Mountains form a roughly symmetric topographic arc with the Rif Mountains in Morocco. The region is seismically active across a 300 km wide zone (Figure 1) attesting to the complex deformation within this wide plate boundary (e.g., Fadil et al., 2006). A number of hypotheses involving both plate interactions and sub-crustal dynamic processes have been suggested to account for the development of the Alboran, extensional basin simultaneously with active continental collision (e.g., Royden, 1993, Morel and Meghraoui, 1996, Blanco and Spakman, 1993, Seber et al., 1996, Faccenna et al., 2004, Vernant et al., 2010, Prouzet et al., 2010, Gutscher et al., 2012).

Figure 2a shows GPS sites in the western Mediterranean for which our group has obtained sufficient observations to estimate horizontal velocities (spanning > 3 years). These include both continuous stations and repeated survey measurements. The velocities are shown in a reference frame where motion of the Eurasian plate is minimized – that is, the motions are with respect to Eurasia. These same results are shown in Figure 2b with respect to Nubia. For these velocity maps, Nubia and Eurasia motion are determined from many stations distributed widely around the plates (e.g., McClusky et al., 2003). The Moroccan network covers much of the country north of the Sahara, although with low spatial density (station spacing ~ 50 - 200 km). Higher station spacing has been developed in the north (~20-50 km). While strike-slip (right-lateral), and collision characterize the broad scale plate interactions, anomalous motions are apparent in the Rif Mountains in

N Morocco (Figure 2b) and the Betic Mountains in S Spain (Figure 2a). In the broadest sense, the zone of plate interaction (Rif Mountains, Alboran Sea, and Betic Mountains) is rotating counterclockwise and translating towards the west (Betics with respect to Iberia) and southwest (Rif with respect to Nubia). The velocity results shown in Figure 2a and 2b form the basis for a range of geophysical studies some of which are described briefly below.

Nubia Plate Motion

The first paper to provide precise, broad scale geodetic constraints on motion of the Nubian Plate was a joint Moroccan, Egyptian, and US effort including early, and critical results from the Rabat GPS station (McClusky et al., 2003). The remarkable level of broad scale plate stability identified in this study (WRMS misfit to coherent plate motion is 0.6 mm/yr) and the precise estimate of Nubia Plate motion have been validated by subsequent network expansion (e.g., Stamps et al., 2008, Reilinger and McClusky, 2011). This result, updated by the most recent observations provides the broad scale framework needed to understand better the nature of deformation within the plate collision zone.

Western Mediterranean Nubia-Eurasia Plate Boundary

The Rif Mountains, Alboran Sea, and Betic Mountains in Spain are deforming at rates of 3-4 mm/yr (Figures 2a, b) in association with active, oblique collision of the Nubian and Eurasian (Iberian) tectonic plates (Fadil et al., 2006, Tahayt et al., 2008, Vernant et al., 2010, Koulali et al., 2011). This deformation is responsible for the significant earthquakes that struck the Al Hoceima region in 1994 and 2004 (Tahayt et al., 2009) and may reflect the same geodynamic processes that generated the Great Lisbon Earthquake and Tsunami of 1755 (Gutscher, 2004, Koulali et al., 2011). Figure 3 shows a simple model involving an "Alboran block" that includes the Alboran Sea, the Betics of S Spain, and the Rif region of NW Morocco. This simple model provides a good fit to the GPS velocities and provides quantitative estimates of slip rates on block bounding fault systems.

The northern boundary of the Alboran block is located in the Betic Mountains of S Spain. The boundary has consistent right-lateral strike-slip motion at 3-4 mm/yr for more than 300 km in mainland Spain that may extend off shore (Figure 3). This boundary is seismically active along its full extent, and has had a number of significant instrumental earthquakes on and off shore. There is no clear evidence for a through going fault on the scale of the modeled boundary, but this most seismically active region of Spain has experienced large historic earthquakes ($>M7$) (e.g., Benito et al., 2009). Although still uncertain, the possibility that the Great 1755 Lisbon Earthquake and Tsunami occurred off shore on this structure needs further investigation (Gutscher, 2004, Koulali et al., 2011). Focused studies of geodetic strain, instrumental and historic earthquakes, and paleoseismology should be undertaken to better assess earthquake and tsunami hazards associated with this active boundary.

The eastern boundary of the Alboran block corresponds to one of the fault planes that broke causing the 2004 Al Hoceima earthquake. GPS and InSAR observations constrain the coseismic fault slip for the 2004, Mw6.3 Al Hoceima Earthquake and help provide a framework for understanding the generation of earthquakes in this most active region of Morocco (Tahayt et al., 2009, Ben Sari, 2005). Figure 4 (Tahayt et al., 2009) shows the results of the InSAR analysis indicating ~90 cm of fault slip. A similar earthquake could develop on this same segment of the fault in 225-300 years at the slip rates indicated by the

Koulali et al. (2011) block model. We caution that only an ~ 15 km segment of the eastern Alboran block boundary broke in the 2004 earthquake. More focused geodetic studies and paleoseismic investigations are needed to better assess the earthquake potential of this, and other segments of the boundary fault.

Shortening Across the High Atlas Mountains

Shortening Across the High Atlas Mountains is less than 1 ± 0.6 mm/yr consistent with rates deduced from geologic observations (Gomez et al., 2000), and suggesting long repeat times for thrust events like the devastating 1960, M5.7, Agadir Earthquake (e.g., Fadil et al., 2004, Koulali et al., 2011). However, because we haven't sufficient knowledge of the prehistoric history of earthquakes in the High Atlas similar to the Agadir event, we cannot presently evaluate seismic hazards on this fault system. We note that the high elevation and slow rate of convergence for the High Atlas suggests "dynamic" processes maintain the present elevation – how or if these processes are related to active deformation in the Rif (also likely related to sub-crustal dynamic processes) remains an area of active study.

Summary and Benefits to Morocco

This brief report provides an overview of some of the results for geodynamics and earthquakes and associated tsunamis from an ongoing Moroccan-USA-European study. The application of space geodesy to seismotectonic studies in Morocco has allowed direct quantification of deformation rates throughout the plate collision zone. These results provide new constraints on the dynamics of plate tectonic processes in the western Mediterranean continental collision zone with potential implications for natural resource exploration. In addition, quantifying slip rates on faults provides a basis to estimate earthquake hazards by identifying the zones of most rapid and concentrated deformation that are most likely to result in earthquakes, and for events near the coast, tsunamis. This information together with the paleoseismic record provides a basis for significantly improving our ability to estimate earthquake and associated tsunami hazards. However, the current GPS network is only capable of providing the broadest constraints on earthquake processes in Morocco. Maintaining and expanding the existing network to reduce velocity uncertainties and to establish spatial densification to < 10 km around seismically active faults will be required to better constrain earthquake processes and associated hazards.

In addition to scientific advances and developing geodetic expertise and infrastructure in Morocco, to date this project has resulted in 3 PhD degrees for Moroccan students, 2 Masters degrees (1 Moroccan and 1 French), the publication of 10 papers in refereed journals (indicated by asterisks in the reference list), and over 20 presentations at international meetings, most presented by Moroccan students. This experience in the international scientific arena places the Moroccan Earth science community in a unique position to take a leading role in space geodetic research and applications in N Africa. Given the wide range of applications of space geodesy, and its proliferation globally, and the importance for basic scientific and environmental studies of the Earth and atmosphere, we believe that Morocco will benefit in many ways from continuing to develop expertise in this rapidly expanding technology.

References

- [1] Aujac, G., *Eratosthène de Cyrène, le pionier de la géographie*, Paris: Édition du CTHS. 224p., 2001.
- [2] Benito, B., Navarro, M., Gaspar-Escribano, J.M., Vidal, F., Góngora, A., García Rodríguez, M.J., Martínez Solares, J.M., Seismic Hazards in Andalusia region (southern Spain), *8th International Workshop on Seismic Microzonation and Risk Reduction* 15-18 March 2009, Almería, Spain, 2009.
- [3] Ben Sari, D., *Prevision et Prevention des Catastrophes Naturelles et Environnement*, United Nations, ISBN:10- 923203980X, 2005.
- [4] Blanco, M.J., Spakman, W., The P-wave velocity structure of the mantle below the Iberian Peninsula: Evidence for a subducted lithosphere beneath southern Spain, *Tectonophysics*, 221, 13–34, 1993.
- [5] Dewey, J.F., Helman, M.L., Turco, E., Hutton, D.H.W. and Knott, S.D., Kinematics of the western Mediterranean, *Geological Society, London*, 45, 265-283, doi: 10.1144/GSL.SP.1989.045.01.15, 1989.
- [6] Faccenna, C., Piromallo, C., Crespo-Blanc, A., Jolivet, L., and Rossetti, F., Lateral slab deformation and the origin of the western Mediterranean arcs, *Tectonics*, 23, TC1012, doi:10.1029/2002TC001488, 2004.
- [7] Fadil, A., Vernant, P. McClusky, S., Reilinger, R., Gomez, F., Ben Sari, D., Mourabit, T., Feigl, K., and Barazangi, M., Active tectonics of the western Mediterranean: GPS evidence for roll back of a delaminated subcontinental slab beneath the Rif Mountains, Morocco, *Geology*, 34, 529-532, doi:10.1130/G22291.1, 2006.

Fadil, A., and D. Ben Sari, Correlation between precipitable water and rainfall using Global Positioning System technique, NATO Security Through Science Series “Remote Sensing of the Atmosphere for Environmental Security”, Springer Netherlands, doi 10.1007/978-1-4020-5090-9_17, pages 271-284, 2006.

Fadil, A., *Applications du systeme de Positionnement Global (GPS)*, PhD. Thesis, EMI, 2006.
- [8] Gomez, F., Beauchamp, W., Barazangi, M., Role of the Atlas Mountains (northwest Africa) within the African–Eurasian plate boundary zone, *Geology* 28, 775–778, 2000.
- [9] Gutscher, M.-A., What caused the Great Lisbon Earthquake, *Science* 27, 305, 5688, doi: 10.1126/science.1101351, 2004.
- [10] Gutscher, M.-A., Subduction beneath Gibraltar? Recent studies provide answers, *Eos Trans. AGU*, 93(13), 133, doi:10.1029/2012EO130001, 2012.
- [11] Hager, B.H., King, R.W., and Murray, M.H., Measurements of crustal deformation using the Global Positioning System, *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 19, 351-382, 1991.
- [12] Jolivet, L., and Faccenna, C., Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision, *Tectonics*, 19(6), 1095–1106, doi:10.1029/2000TC900018, 2000.
- [13] King, D.A., *Astronomy in the Service of Islam*, (Aldershot (U.K.): Variorum), 1993.
- [14] King, R.W., Masters, E.G., Rizos, C., Stolz, A., and Collins, J., *Surveying with GPS*, Monograph 9, School of Surveying, The University of New South Wales, Kensington, Australia, 128 pp., 1985.

- [15] Koulali, A., Ouazar, D., Tahayt, A., King, R. W., Vernant, P., Reilinger, R. E., McClusky, S., Mourabit, T., Davila, J. M., Amraoui, N, New GPS constraints on active deformation along the Africa–Iberia plate boundary, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 308, 211–217, doi:10.1016/j.epsl.2011.05.048, 2011.

Koulali, A., Ouazar, D., Bock, O., Fadil, A., Study of seasonal-scale atmospheric water cycle with ground-based GPS receivers, radiosondes and NWP models over Morocco, *Atmospheric Research*, v. 104–105, 273–291, doi:10.1016/j.atmosres.2011.11.002 2012.
- Koulali, A.D., Potential use of ground based GPS observations: Study of atmospheric humidity and crustal deformation over the West Mediterranean, PhD. Thesis, EMI, 2011.
- [16] McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., and Tealeb, A., GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motion, *Geophys. J. Int.*, 155, 126–138, 2003.
- [17] Morel, J.L., and Meghraoui, M., Goringe-Alboran-Tell tectonic zone: A transpression system along the Africa-Eurasia plate boundary, *Geology*, 24, 1996.
- [18] National Research Council (U.S.), Committee on the Future of the Global Positioning System, National Academy of Public Administration, Washington DC, 1995.
- [19] Perouse, E. Vernant, P., Chery, J., Reilinger, R., and McClusky, S., Active surface deformation and sub-lithospheric processes in the western Mediterranean constrained by numerical models, *Geology*, 38, 823–826, doi:10.1130/G30963.1, 2010.
- [20] Platt, J.P., Vissers, R.L.M., Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar Arc, *Geology* 17, 540–543.
- [21] Reilinger, R., and McClusky, S., Nubia-Arabia-Eurasia plate motions and the dynamics of Mediterranean and Middle East tectonics, *Geophys. J. Int.*, doi:/j.1365-246X.2011.05133.x, 2011.
- [22] Royden, L.H., Evolution of retreating subduction boundaries formed during continental collision, *Tectonics*, 12, 629–638, 1993.
- [23] Seber, D., Barazangi, M., Ibenbrahim, A., and Demnati, A., Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rif-Betic mountains, *Nature*, 379, 785–790, 1996.
- [24] Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi, P., and Gasperini, P., Kinematics of the western Africa–Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data, *Geophys. J. Int.* 169 (3), doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03367.x, 2007.
- [25] Stamps, D., Calais, E., Saria, E., Hartnady, C., Nocquet, J.-M., Ebinger, C., and Fernandes, R., A kinematic model for the East African Rift, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05304, 2008.
- [26] Tahayt, A., Mourabit, T., Rigo, A., Feigl, K., Fadil, A., McClusky, S., Reilinger, R., Serroukh, M., Ouazzani-Touhami, A., Ben Sari, D., and Vernant, P., Present-day movements of tectonic blocks in the western Mediterranean from GPS measurements 1999–2005, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (in French with abridged English Version), doi:10.1016/j.crte.2008.02.003, 2008.

- [28] Tahayt, A., Feigl, K., Mourabit T., Rigo, A., Reilinger, R., McClusky, S., Fadil, A., Berthier, E., Dorbath L., Serroukh, M., Gomez, F., and Ben Sari, D., The Al Hoceima (Morocco) earthquake of 24 February 2004: A cross-fault model inferred from geodetic, seismic, and surface faulting data, *Remote Sensing of Environment*, 113 (2), 306-316, 2009.
- [29] Vernant, P., Fadil, A., Mourabit, T., Ouazar, D., Koulali, A., Davila, J.M., Garate, J., S. McClusky, and Reilinger, R., Geodetic constraints on active tectonics of the Western Mediterranean: Implications for the kinematics and dynamics of the Nubia-Eurasia plate boundary zone, *J. of Geodynamics*, 49, 123-129, doi:10.1016/j.jog.2009.10.007, 2010.

Figures

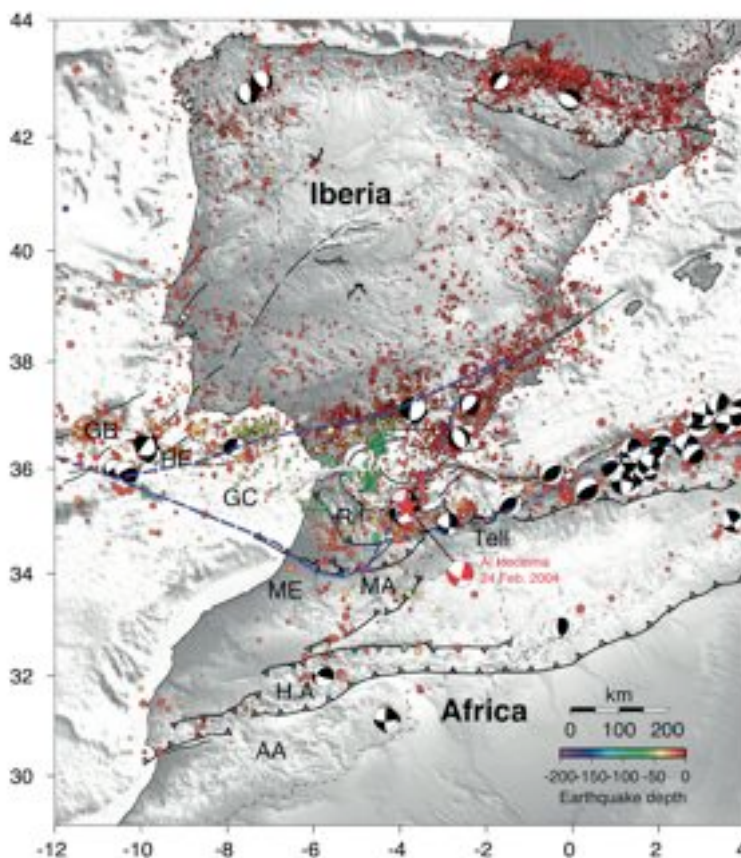


Figure 1. General structural setting map: seismicity and major faults in the Iberian-Maghreb region. Faults in this figure as well as in the following figures are taken from Gomez et al. (2000); Serpelloni et al. (2007). Topography and bathymetry are from SRTM (http://topex.ucsd.edu/www_html/srtm30_plus.html). The blue line corresponds to the proposed kinematic model (see text for discussion). The seismicity is from NEIC catalog (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>). Focal mechanisms are from Harvard CMT catalog (<http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>). Abbreviations are: AA: Anti Atlas, HA: High Atlas, MA: Middle Atlas, GC: Golf of Cadiz, ME: Meseta, GB: Goringe Bank, HF: Horseshoe Fracture zone. From Koulali et al. (2011).

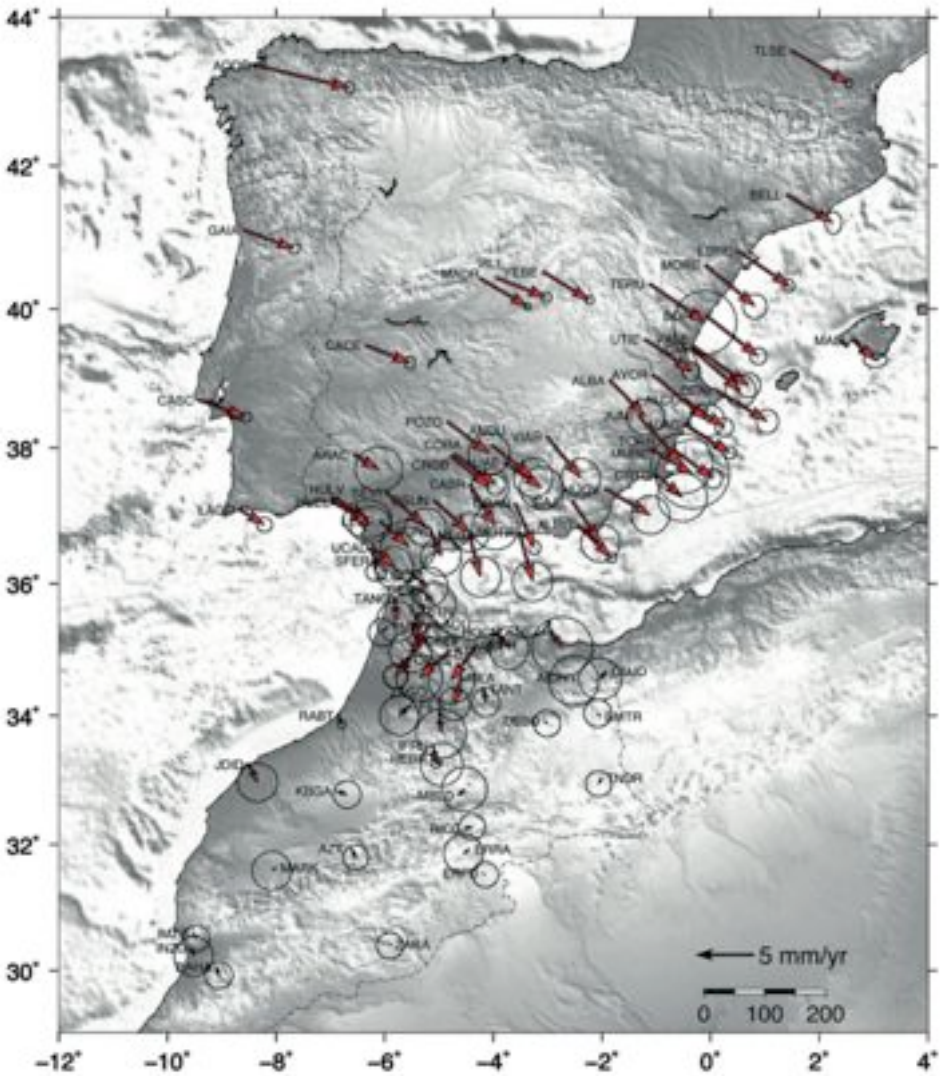


Figure 2b. GPS site velocities with respect to Africa (Nubia) and 95% confidence ellipses (from Koulali et al., 2011).

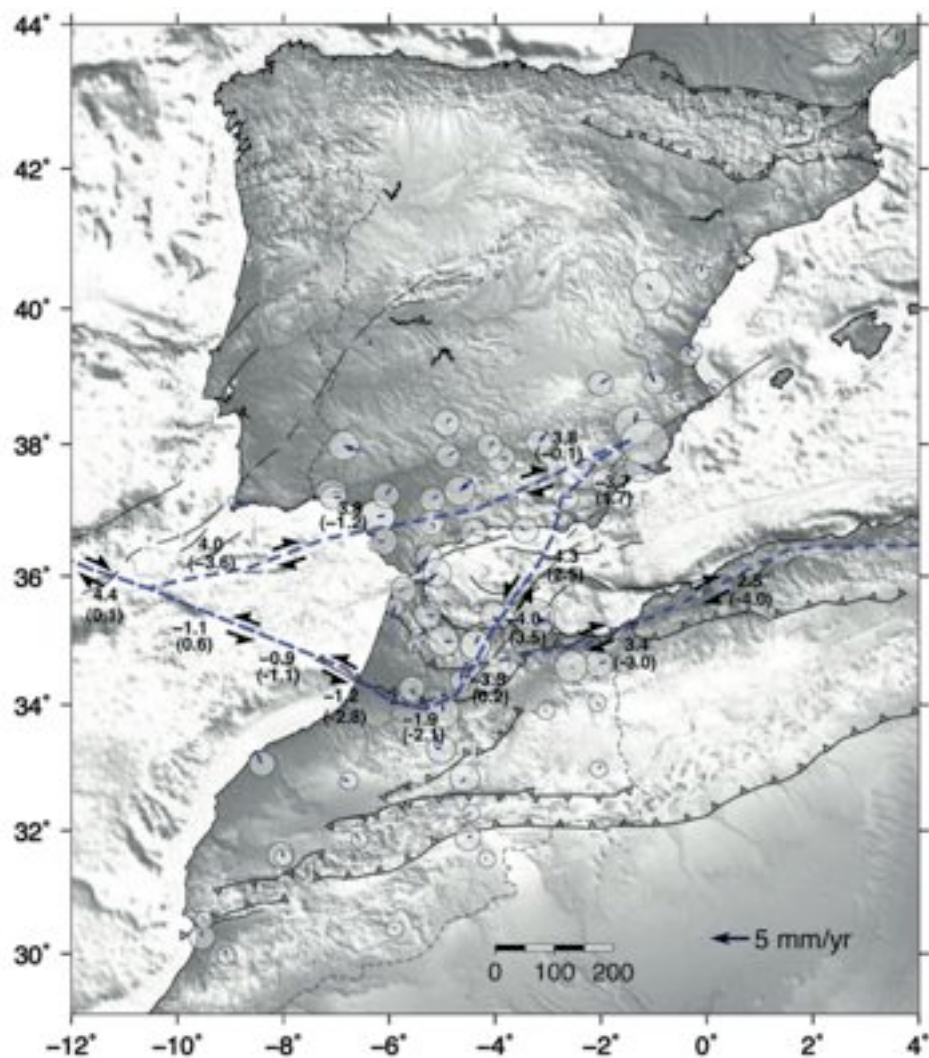


Figure 3. Residual velocities (observed minus predicted). Strike-slip and fault-normal slip on block bounding segments; rates in mm/yr (fault normal component in brackets; negative for left lateral and compression). From Koulali et al. (2011).

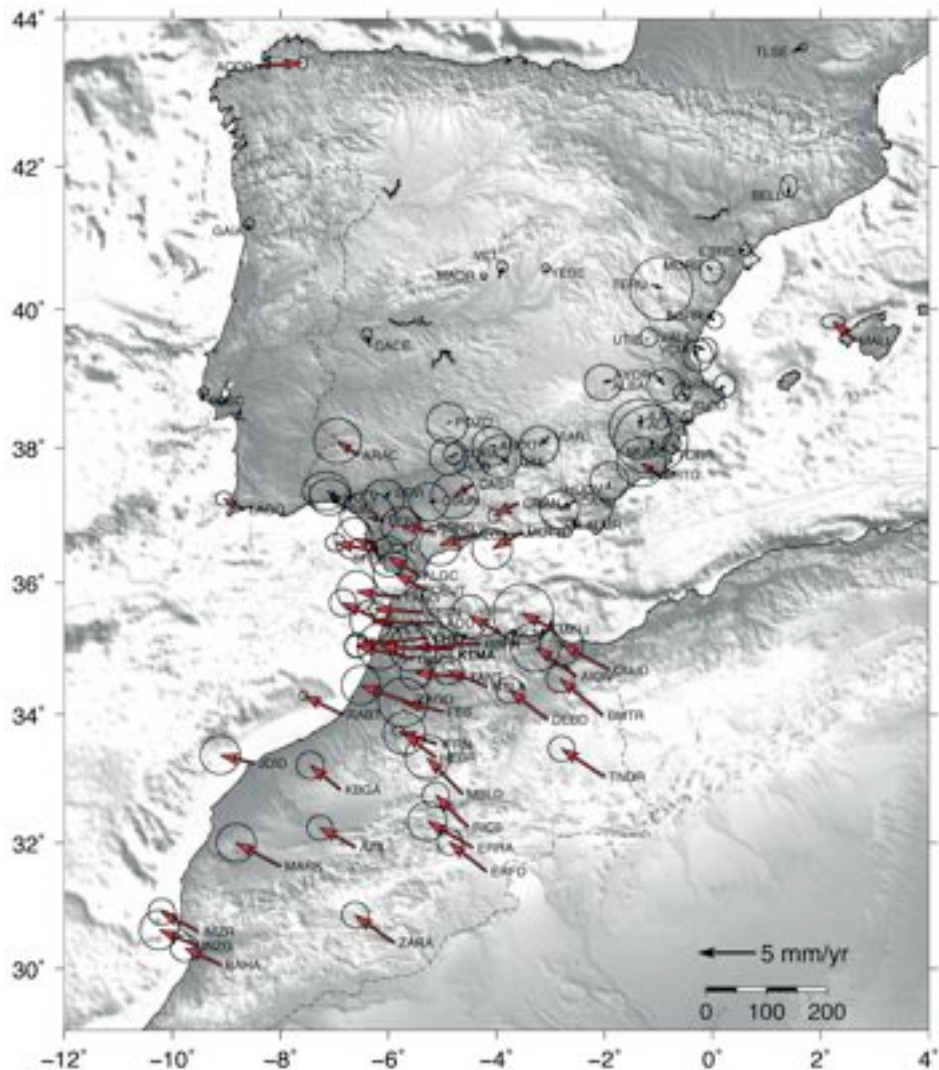


Figure 4. Coseismic deformation of the Al Hoceima 2004 earthquake. (A) Observed InSAR interferogram from ENVISAT data, acquired in ascending (on left) and descending (on right) passes. One cycle of color represents one interferometric fringe or a range change of 28 mm along the line of sight. The black arrows indicate the coseismic horizontal displacement vectors associated with the Al Hoceima earthquake, as measured by GPS with 95% confidence ellipses. The black lines show the 2-faults source model. (B) Simulated fringe pattern calculated from dislocations in an elastic half-space. The black arrows indicate vectors representing the coseismic displacement at the two GPS stations calculated from the same model. (C) Residual phase calculated by subtracting the modeled interferograms (B) from the observed ones (A). See Tahayt et al. (2009) for details.

A CLIMATE-DRIVEN MODEL AND DEVELOPMENT OF A FLOATING-POINT TIMESCALE FOR THE MIDDLE DEVONIAN EIFELIAN STAGE USING TIME-SERIES ANALYSIS OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY (χ) DATA SETS

*Pr. Brooks B. ELLWOOD^a, Pr. Ahmed EL HASSANI^b,
Pr. Jonathan H. TOMKIN^c, Pr. Pierre BULTYNCK^d*

*^a Louisiana State University, Department of Geology and
Geophysics, Baton Rouge, LA 70803 USA*

*^b Institut Scientifique, Université Mohammed V-Agdal,
Rabat - Morocco*

*^c School of Earth, Society, and Environment, University of
Illinois, Urbana, IL-61801, USA*

*^d Department of Paleontology, Royal Belgian Institute of
Natural Sciences, Brussels, Belgium*



Pr. Brooks B. ELLWOOD

Abstract

Presented here are magnetic susceptibility (χ) results from analyses of Moroccan rocks from the Eifelian Stage, covering the lower half of the Middle Devonian. These analyses use high-resolution data sets to establish an age chronology that can be applied to any geologic stage; employing cyclostratigraphic methods to geochemical or geophysical data sets that serve as a climate proxy. Specifically, magnetostratigraphy susceptibility (MSS) data sets are used as the basis for fitting an independent uniform climate model directly to the MSS data for the entire Eifelian Stage. To do this, it is necessary to first define a uniform Milankovitch ~ 405 kyr eccentricity climate model for the Eifelian, with a duration corresponding to the published duration for the Eifelian of ~ 5.6 Ma (Gradstein et al., 2012). This model can then be tested by graphically comparing the climate model to MSS data that are pinned to time series analysis from outcrop samples; (1) from the lower Eifelian boundary (Emsian–Eifelian GSSP, Germany); (2) from the upper Eifelian boundary (Eifelian–Givetian GSSP, Morocco), and (3) data from Jebel Amelane near Erfoud, Anti-Atlas Morocco, where all but a small amount of the total Eifelian is exposed. Using time series analysis of magnetic susceptibility data (employing the Fourier and Multi-Taper methods), it was possible to identify cycles in the MSS data that conform to the ~ 405 kyr, and graphically compare the MSS zonation with the climate model. To this model are fit a well-established conodont zonation developed independently using graphic correlation (Gouwy and Bultynck, 2003), thus allowing time estimates for

conodont ranges for the Eifelian. These zones allow high correlation among sections to better resolve timing of major bio-events, and provide a floating-point time scale to which absolute ages can be applied. In addition, these data allow direct evaluation of sedimentation rates throughout the Eifelian Stage, and make estimates for the duration of the Eifelian.

1. Introduction

Cyclostratigraphic analyses of high-resolution geochemical and geophysical data sets, as proxies for climate (Weedon and Jenkyns, 1990; Weedon and Shimmield, 1999; Weedon et al., 1999) is being used more and more to demonstrate the relative uniformity in many marine successions, especially through critical intervals of interest, such as important biozones, zones of major extinctions, and within global boundary stratotype sections and points (GSSP)s (e.g., Crick et al., 2001). It is expected that longer-term climate cycles are more readily identified in older rock sequences, and that the ~405 kyr eccentricity cycle has a robust, long-term paleoclimatic stratigraphic signal that should be recorded (Shackleton et al., 1999; Lasker et al., 2004; Ellwood et al., 2011a). Given that longer-term climate cycles are preserved in the sedimentary record, robust geochemical or geophysical methods that can track these changes should provide useful proxies for climate.

One such method that is now well established uses low-field, mass-specific magnetic susceptibility (χ) data sets in marine sediments to track climate cyclicity (Mead et al., 1986; Hartl et al., 1995; Weedon et al., 1999; Jovane et al., 2006, 2007; Ellwood et al., 2011a). In addition to its utility in paleoclimatic studies, magnetostratigraphic susceptibility (MSS) can be used for high-resolution correlation among marine sedimentary rocks of broadly differing facies with regional and global extent (Crick et al., 1997, 2000; Ellwood et al. 1999, 2000, 2007a, b; Whalen and Day, 2008). χ is a correlation method that provides a robust data set to independently evaluate and adjust stratigraphic position among geological sequences. It requires reasonable biostratigraphic control to initially develop a chronostratigraphic framework where distinctive χ zones can be directly correlated with high precision among successions, even when biostratigraphic uncertainties or slight unconformities are known to exist within sections (Ellwood et al., 2006; 2007a). χ works as a climate proxy because regional and global processes that drive erosion, including climate and eustasy, bring the detrital/eolian components responsible for the χ signature into the marine environment where its stratigraphy is preserved (Ellwood et al., 2000).

This paper presents χ data showing a Milankovitch eccentricity climate zonation for the Middle Devonian Eifelian Stage that is pinned to time-series analysis from its upper (Emsian–Eifelian) and upper (Eifelian–Givetian) bounding GSSPs. By using time-series analysis of these data a uniform cyclicity model is defined that conforms to a ~405 kyr cyclicity, with a duration corresponding to the published duration for the Givetian of ~5.6 myr (Gradstein et al., 2012). Then, the best available biostratigraphic conodont zonation schemes are fit to this model to test and revise the age model using χ as an independent data set. This approach has recently been applied in developing a floating-point timescale for the entire Givetian Stage (Ellwood et al., 2011a).

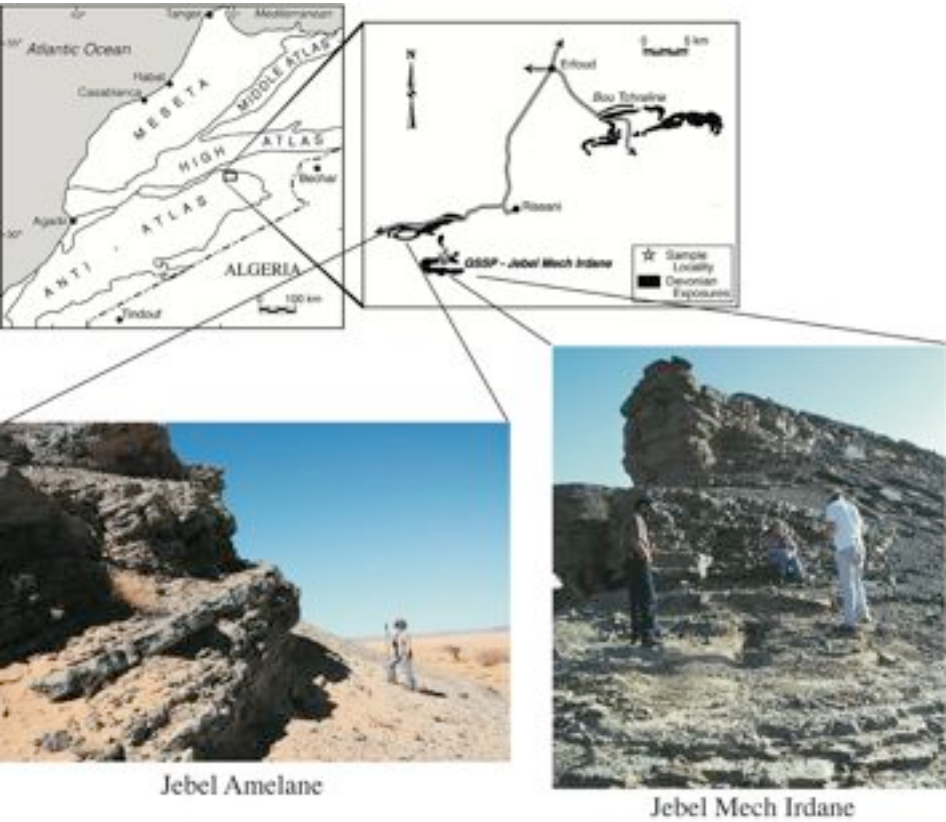


Fig. 1. Location and outcrop exposure of Jebel Amelane and Jebel Mech Irdane in the Anti-Atlas region of Morocco.

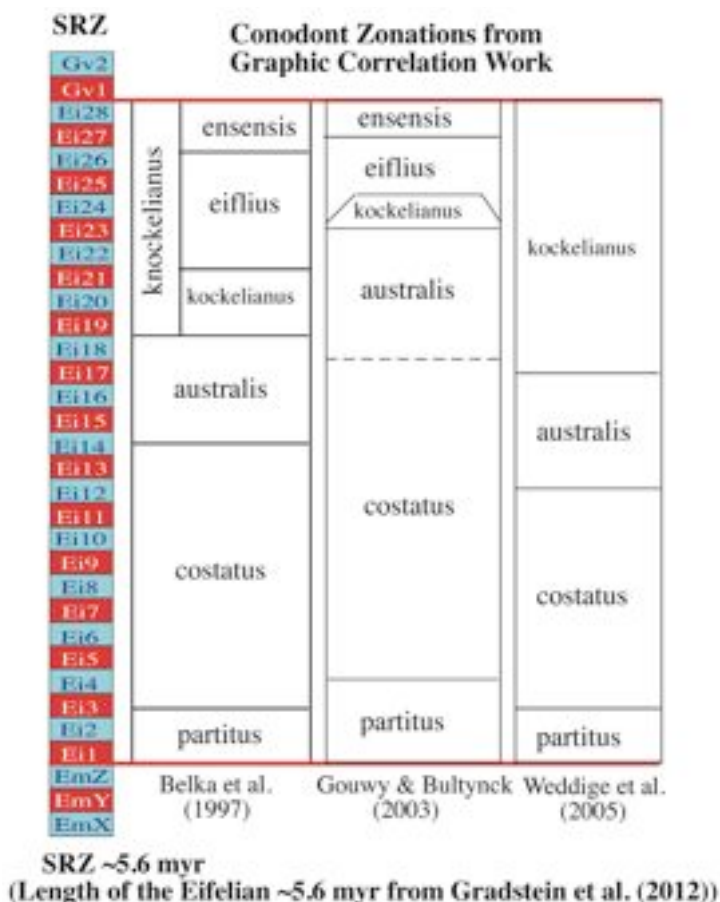


Fig. 2. Three conodont biozonations for the Middle Devonian Eifelian Stage, modified from (1) Belka, et al. (1997), (2) Gouwy and Bultynck (2003), and (3) Weddige et al. (2005) compared to a standardized reference zonation representing ~405 kyr climate half cycles (~200 kyr) over 5.6 myr estimated by Gradstein et al. (2012) as the duration for the Eifelian. Half cycles are labeled using a scheme representing Emsian (EmX to EmZ), Eifelian (Ei1 to Ei28), Givetian (Gv1 to Gv2). Note that the labeling scheme allows Emsian cycles to be added as new data become available.

2. Previous Work

Our understanding of the timing of events in Earth history is seriously hampered by age uncertainties for most of geologic time. This problem becomes critically important in resolving timing of significant events. It is possible that age uncertainties have actually ‘created’ distinctive changes in Earth history, or the importance of some changes have been completely missed because we have not realized that abrupt changes identified within globally distributed stratigraphic sequences, thought to be age independent, are in fact coeval.

In an effort to establish better biostratigraphic precision and reduce age uncertainties, the international geological community has been working toward establishing standards defining geologic time boundaries, defining a system of GSSPs for all geologic stage

boundaries within the Phanerozoic. Once geologic stage boundaries have been established, the bounded stage can then be characterized using non-traditional data sets that can be tied directly to the bounding GSSPs, thus providing an age framework that can eventually link both marine and non-marine sequences all over the world. As part of the GSSP mandated work, it is being stressed that abiotic methods, geochemical and geophysical be used in conjunction with biostratigraphy for boundary correlation purposes. χ is one such abiotic method that has great potential for reducing age uncertainties. The method can also be calibrated against other stratigraphic data sets.

3. A procedure to define an entire geological stage using abiotic methods

In their work on the Middle Devonian Givetian Stage, Ellwood et al. (2011a), used the bounding GSSPs (Eifelian–Givetian, Morocco, and Givetian–Frasnian, France) to constrain the rest of the Givetian χ data set that was derived from outcrop and core from successions in New York, USA. To do this work they developed a multi-step procedure, outlined below, that they followed in defining a standard reference zonation (SRZ) that was based on the assumption of a uniform ~405 kyr Milankovitch climate cyclicity argued to have been recorded in Phanerozoic rocks (Shackleton et al., 1999). The approach used here is as follows:

- Step 1: Choose any stage in the Phanerozoic. The Middle Devonian Eifelian Stage was chosen for this work.
- Step 2: Estimate the length of the stage from published timescales. An age of ~5.6 myr was selected from the timescale of Gradstein et al. (2012).
- Step 3: Fit ~405 kyr cycles to the time estimate and build a uniform SRZ. For the Eifelian, this results in ~14 cycles (28 half cycles) and this climate model is given in Fig. 2.
- Step 4: Collect samples from the bounding GSSPs and measure χ . For the Eifelian, χ data are given for the Emsian–Eifelian GSSP by Ellwood et al. (2006) and for the Eifelian–Givetian GSSP by Ellwood et al. (2012a,b).
- Step 5: Test the GSSP data sets using time series analysis, looking for ~405 kyr cyclicities. These cycles for the Eifelian–Givetian GSSP were confirmed by Ellwood et al. (2012a,b) for both GSSPs. Time series analysis for the Emsian–Eifelian GSSP is given below.
- Step 6: Compare the ~405 kyr cyclicity for the bounding GSSPs to the SRZ and fill in the gap with additional successions. For the Eifelian, the bounding GSSPs (Emsian–Eifelian GSSP and Eifelian–Givetian GSSP) were used and the gap was filled by a succession from Jebel Amelane, in the Tafilalt region of Morocco (Fig. 1).
- Step 7: Graphically compare the χ data sets to the SRZ and corresponding biozones, and adjust the SRZ to the new ~405 kyr cyclicity if necessary. For the Eifelian, the adjusted SRZ requires an additional ~0.5 myr, bringing the time represent to ~6.0 to 6.1 myr. This is discussed below.

4. Methods

4.1. Magnetostratigraphic susceptibility: general comments

All materials are «susceptible» to becoming magnetized in the presence of an external magnetic field, and initial low-field bulk magnetic susceptibility or χ is an indicator of the strength of this transient magnetism. χ is very different from remanent magnetism

(RM), the intrinsic magnetization that accounts for the magnetostratigraphic polarity of materials. χ in marine stratigraphic sequences is generally considered to be an indicator of detrital/eolian paramagnetic and ferrimagnetic grains, mainly ferromagnesian and clay minerals (Ellwood et al., 2000; 2008b; da Silva and Boulvain, 2002), and can be quickly and easily measured on small samples. In the very low inducing magnetic fields that are generally applied, χ is largely a function of the concentration and composition of the magnetizable material in a sample.

4.2. χ sampling and measurement

In the field the sections reported here were cleaned using scrapers and brushes, so that all beds and lithologies were well exposed. Highly weathered zones were cleaned by digging, chipping and brushing. Samples were collected at ~5 cm intervals and returned to the laboratory for study.

χ measurements reported in this paper were performed using the susceptibility bridge at LSU, calibrated relative to mass using standard salts reported by Swartzendruber (1992) and CRC Tables. χ is reported in terms of sample mass because it is much easier and faster to measure with high precision than is volume. The low-field χ bridge at LSU can measure diamagnetic samples at least as low as -4×10^{-9} . This is illustrated by two relatively pure calcite samples from a standing speleothem in Carlsbad Caverns National Park, with values of -3.37×10^{-9} and -3.46×10^{-9} m³/kg and standard deviations for three measurements of 7.64×10^{-11} and 8.69×10^{-11} m³/kg, respectively.

4.3. Presentation of χ data

For presentation purposes and inter data-set comparisons, the bar-log format, similar to that previously established for magnetostratigraphic polarity data presentations, is used here. Bar-logs are constructed from smoothed χ data and are accompanied by both raw and smoothed χ data sets. Here, raw χ data for the Eifelian section at Jebel Amelane (Fig. 3) are smoothed using splines to hold data points in stratigraphic position (solid data curve in Fig. 3; splines were calculated using the JMP statistical software package from the SAS Institute Inc.). Splines vary depending on the number of samples in each data set being smoothed, and therefore using splines is somewhat subjective, as are other smoothing techniques. Splines applied were adjusted in increments of 10 to produce an χ zonation that conforms to the ~405 kyr cyclicity. Finer splines represent shorter cycles. Because χ data are cyclic, for the purpose of correlating to the SRZ, a bar-log plotting convention is used, such that if a χ cyclic trend is represented by two or more data points, then this trend is assumed to be significant and the highs and lows associated with these cycles are differentiated by black (high χ values) or white (low χ values) bar-logs shown in Fig. 3. This method is best employed when large numbers of closely spaced samples are being analyzed.

5. Results

5.1. χ and time-series analyses for GSSP sequences bounding the Eifelian Stage

The Emsian–Eifelian GSSP is located in the Eifel hills in western Germany. The base of the Eifelian was defined there based on the first occurrence of the conodont species *Polgnathus costatus partitus*, and the boundary was ratified in 1985 (Ziegler and Klapper, 1985). χ for 172 samples was published by Ellwood et al. (2006), and this χ data set was used

in developing the time-series analysis given in Fig. 4. While the time-series result is not excellent, there is a strong FT peak representing E2 (~ 405 kyr) cyclicity at ~ 0.3 cycles/m.

The Mid-Devonian, Eifelian–Givetian GSSP, which defines the base of the Givetian Stage, was established at Mech Irdane, near the town of Rissani in SE Morocco (Walliser et al., 1995; Fig. 1). There, ~ 11 m of section was collected for χ measurement (220 samples), and the spectral analysis results reported by Ellwood et al. (2011a,b). They report a peak at ~ 0.2 cycles/m that corresponds to the ~ 405 kyr eccentricity band.

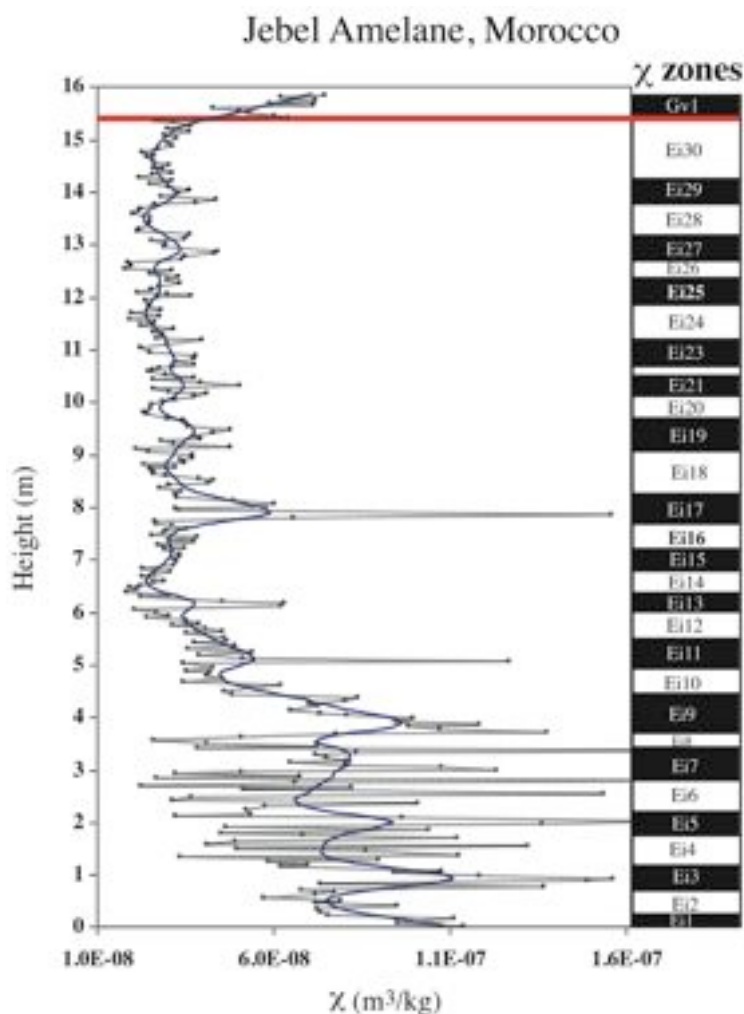


Fig. 3. χ data for the Eifelian at Jebel Amelane (Fig. 1). Bar-logs (filled – high χ ; open – low χ constructed from smoothed χ data using splines - solid data curve; methods discussed in text); raw χ data are shown as dotted curve. χ zones labeled are: Ei1 to E30 corresponding to χ zones established for the splined curve that was adjusted for ~ 405 kyr cyclicity for the succession. Bold horizontal line represents the Eifelian–Givetian boundary location.

The Emsian–Eifelian boundary is just below the end of the section in χ zone Ei1.

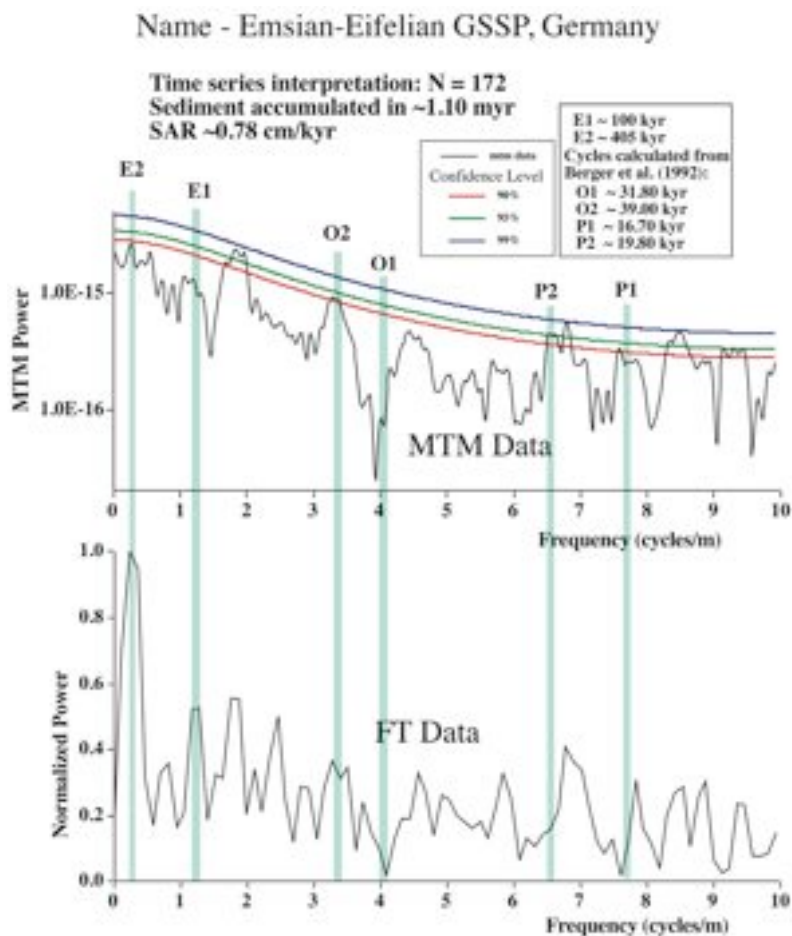


Fig. 4. Spectral power of raw χ values for the Emsian–Eifelian (the data used from Ellwood et al., 2006), as determined using the Multi-Taper (MTM) and Fourier Transform (FT) methods of the original χ (unsmoothed) data. Frequency in cycles/m. The vertical bars labeled in the diagram indicate the centers of the Milankovitch eccentricity peaks E-2 (~405 kyr) is weak in the MTM data set but well-defined in the FT data set. Showing MTM power are O2 obliquity and P2 precession (values given are recalculated from Berger et al., 1992).

5.2. χ and time-series analyses for the Eifelian Stage

In addition to the bounding GSSPs, time-series analysis of the raw χ data (independent of smoothing) was performed for samples collected from Jebel Amelane, covering 15.82 m of section at a 5 cm sample interval. To avoid introducing error, the studied section was selected where covered intervals could either be avoided or be sampled after careful cleaning of the section (Fig. 1). Uniformly spaced samples then collected and it was assumed that this uniform spacing represents a linear distribution relative to time, i.e., Δx is proportional to Δt , so that harmonic analysis methods could be used. The less this assumption is true, due to variations in sediment accumulation rate, differential diagenesis, or other factors, the more noise that will be produced in the spectral graph, and the less well defined will be spectral peaks (lower power).

The spectral power for the MS data sets was obtained using both the Multi-taper (MTM) and Fourier Transform (FT) methods after the data were both detrended and subjected to a Hanning window to reduce spectral leakage and increase the dynamic range (Jenkins and Watts, 1968; Thompson, 1982). Incidences of statistically significant peaks (at the 90, 95 and 99% confidence limits) in the resulting spectra are determined by employing MTM (Ghil et al, 2002), as calculated with the SSA-MTM toolkit (Dettinger et al., 1995). A null hypothesis of red noise was assumed (low frequency high power in the spectrum, sloping toward lower values at high frequencies), with a three taper model. As this method is prone to producing false positives, the use of statistical significance is limited here to its role in supporting (or not) the positions of multiple Milankovitch bands within the data set. The positions of these bands are fixed relative to each other, and so a climate forcing mechanism is supported by the spectral analysis when the Milankovitch frequencies are also frequencies of high spectral power. The MTM and FT methods, like the spline-smoothed χ data and bar-logs derived from these data sets, are capable of resolving high frequency features in the data. The approach here then, is to (1) collect closely and uniformly spaced samples in the field, (2) report both FT and MTM after normal detrending and comparing the two, (3) apply confidence limits to the MTM data, (4) placing the important Milankovitch climate bands on the FT and MTM diagrams for consistency checks, and (5) establish a uniform model using bar-logs, that can then be compared to the χ cyclicity as a check on sediment accumulation rate uniformity, or lack thereof. These five elements then allow rigorous evaluation of the time-series data sets developed here. The results for the time-series analysis shows significant power in Milankovitch E1 (100 kyr), E2, (~405 kyr) and for a low-frequency band containing 1–2 myr cyclicities.

5.3. Sediment accumulation ages and rate estimates using time-series analysis

The spectral data can be used to make a determination of the age range for any succession, due to the fact that climate-change cycles drive fluctuations in erosion. The resulting variation in the accumulating marine sediment composition can then be detected using χ and other techniques. According to Berger (1978; personal communication) and Shackleton et al. (1999a), frequencies with ~405 kyr periods (the Milankovitch E2 band) are expected to be found in geological data sets. For the Eifelian data set, if it is assumed that the second strongest non-stationary peak (at ~3.9 cycles/m, Fig. 5) is ultimately a product of Milankovitch E1 (~100 kyr) cyclicity, then that represents a total age for the ~11 m section at Jebel Amelane of ~6.1 myr. This age, determined by time-series analysis of the raw χ data set, is supported by the E2 (~405 kyr) peak at ~0.95 cycles/m. The peak at ~0.1 cycles/m (Fig. 5) then falls at the position where the Milankovitch 1–2 myr bands should lie.

6. Discussion

6.1. Adjusting the initial model - modification of the initial SRZ

Examination of the conodont zonation for the Jebel Amelane χ data set (Fig. 3), relative to the initial SRZ zonation that assumes an age range of 5.6 myr (Figs. 2) based on the time scale of Gradstein et al. (2012), requires that the initial SRZ be adjusted by expanding the sequence to account for one the additional E2 cycle represented in the Jebel Amelane data set (Fig. 6). This adjustment requires the addition of 2 ~405 kyr half cycles, bringing the duration of the Eifelian up to ~6.0 myr (~30, 200 kyr half cycles). Added to Fig. 6 for comparison is the conodont zonation of Belka et al. (1997) that was developed using graphic correlation methods (Shaw, 1964).

6.2. Graphic comparison of χ Middle Devonian, Eifelian Stage data to the SRZ

In Fig. 7, bar-logs, developed from the smoothed χ data sets for the measured GSSPs and Jebel Amelane successions, are graphically compared to the adjusted SRZ. The result is an excellent fit of the χ zones to the SRZ. A single envelope or 'tunnel' for each GSSP (green in Fig. 7) fits the comparison fairly well, while the Jebel Amelane tunnel (orange in Fig. 7) is excellent. The comparison of these χ zones to the SRZ makes it possible to evaluate SARs for each section as a test of the time-series data, the assumption being that SARs should be relatively steady. The straight-line tunnel segments indicate that SAR, at least on the ~ 405 kyr time scale, is relatively steady in sequences reported here. The observed variations are clearly cyclic (Fig. 7) and result from lower frequency cycles being superimposed on the ~ 405 kyr cyclicity used in developing the bar-logs. The core of the Jebel Amelane data set yields a relatively low SAR of ~ 0.32 cm/kyr, and was deposited during a period of ~ 4.7 myr.

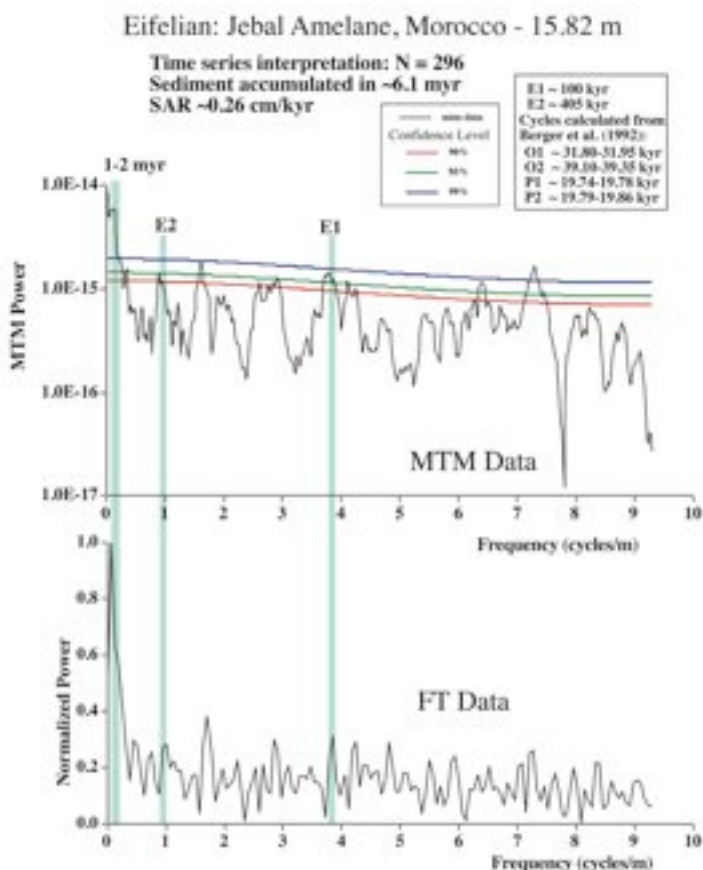


Fig. 5. Spectral power of raw χ values for the Eifelian (Fig. 3), as determined using the Multi-Taper (MTM) and Fourier Transform (FT) methods of the original χ (unsmoothed) data.

Frequency in cycles/m. The vertical bars labeled in the diagram indicate the centers of the Milankovitch eccentricity peaks E-1 (~ 100 kyr) and E-2 (~ 405 kyr), and a strong peak in the 1–2 myr obliquity peak, with all bands statistically significant at the 95% level or greater. The χ bar-log cyclicity reported here (Fig. 3) falls within the range of the E-2 eccentricity band.

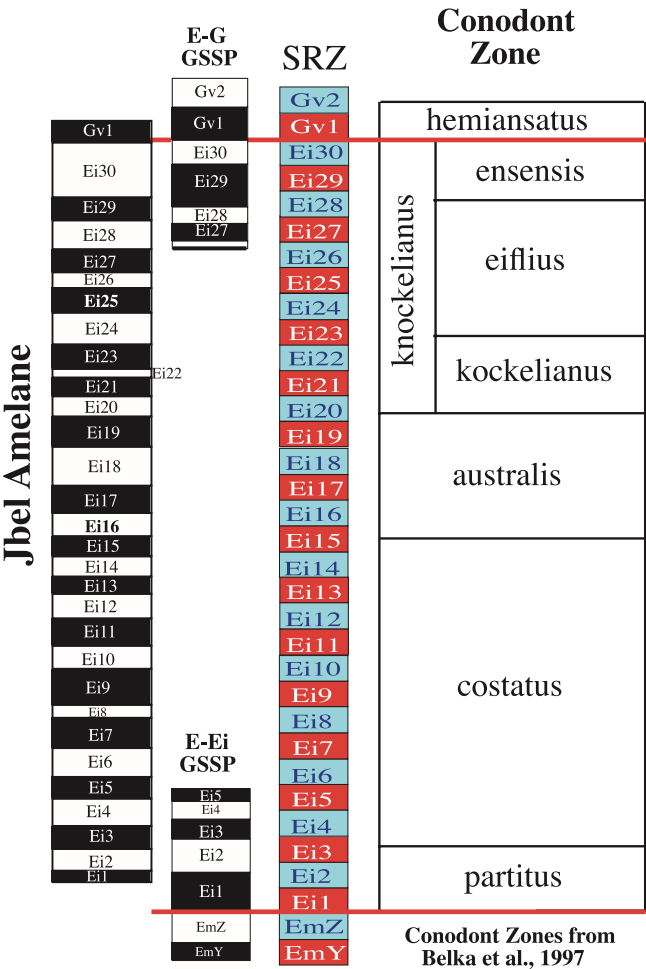


Fig. 6. Bar-log for Jebel Amelane (Fig. 3) correlated to bar-logs from the Emsian–Eifelian GSSP (Ellwood et al., 2006) and Eifelian–Givetian GSSP (Ellwood et al., 2011b).

Because there are 30 E2 half cycles identified in this data set it requires extending the SRZ to account for an additional ~405 kyr cycle. The new SRZ is given here for comparison to the χ bar-log data sets.

Also presented for comparison is the conodont biozonation for the Middle Devonian Eifelian Stage from (1) Belka, et al. (1997).

6.3. Developing a floating-point timescale (FPTS) for the Eifelian Stage

Because χ zones have been shown to represent Milankovitch climate cyclicality in the ~405 kyr eccentricity band, the SRZ presented in Fig. 7 can be considered as a FPTS, with each χ zone representing ~200 kyr of time (a ~400 kyr half cycle). Then, depending on the absolute time scale used, it is possible to assign specific ages to each χ zone boundary and thus to estimate the timing of the biostratigraphic zonation used (here based on conodonts).

To plug into a specific timescale, an age for one of the GSSPs is used. For example, if the timescale of Gradstein et al. (2012) is used, they place the beginning of the Eifelian at 393.3 Ma. Then, if the timescale used is different, or it changes, it is a simple matter to recalculate the new age of the χ zone of interest. Timing of these conodont zones can then be compared on a global scale to other sections using the χ zonation identified for those successions, with comparison to the Eifelian FPTS, to evaluate the global timing and consistency of the biostratigraphic data set in question.

6.4. SRZ, associated conodont zonation and important biozone events

The conclusion of many time-series studies is that χ can serve as a proxy for climate (Weedon et al., 1999; Ellwood et al., 2000; Jovane et al., 2006; Whalen and Day, 2008; Ellwood et al., 2011a). Given that conclusion, it is then possible to evaluate timing and duration for biozones and bioevents, and other events in Earth history recorded in the rock record. Fig. 8, then, utilizes the new, ~405 kyr SRZ, representing timing for the Eifelian Stage, for a comparison with the conodont zonation of Gouwy and Bultynck (2003) that was developed using graphic correlation.

This conodont zonation is slightly different from that reported by Belka et al. (1997), due to some modification of this earlier work (Belka et al., 1997).

The conodont zonation of Weddige et al. (2005) was not used because there are finer-scale zonation schemes for the upper portion of the Eifelian Stage in the zonations published by Belka et al. (1997) and Gouwy and Bultynck (2003) papers (Fig. 2).

By assigning FPTS ages to SRZ elements, it is possible to estimate durations for the conodont biozones given in Fig. 8. The shortest of these, the kockelianus zone is estimated at ~50 kyr, while the longest, costatus zone is estimated at ~2.9 myr. Also shown in Fig. 8 are two bio-events, the Chotec (Lower Eifelian) and Kačák (Upper Eifelian) events, discussed for example by Walliser (1996). These are correlated to their position within the SRZ in Fig. 8 for the Gouwy and Bultynck (2003) conodont zonation. These events provide important bio-markers for the Eifelian Stage, that in turn can be correlated with high precision to globally distributed Middle Devonian sections.

The Chotec Event, of relatively long duration, appears to have lasted for ~600 kyr, while the Kačák Event appears to have been significantly shorter at ~200 kyr. This result is essentially the same in length as that reported by Ellwood et al. (2011b) who used E1 (~100 kyr) cyclicity for their estimate.

GSSPs and Jbel Amelane Eifelian Graphic Comparison to the SRZ

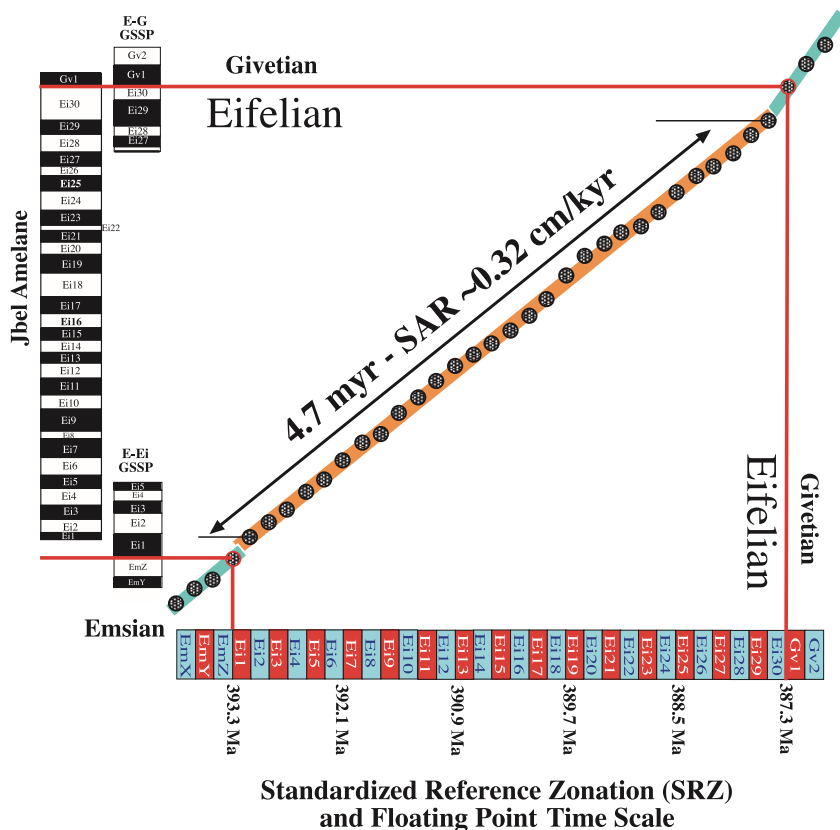


Fig. 7. Graphic comparison (similar to the graphic correction method [Shaw, 1964]) of the Emsian–Eifelian, Eifelian, and Eifelian–Givetian GSSP bar logs given in Fig. 6 with the SRZ that assumes a ~405 kyr cyclicality over a period of ~6.0–6.1 myr, the duration of the Eifelian determined in Figs. 3 and 5 from bar-log and time series analyses; this provides a floating-point time scale (FPTS) for the Eifelian Stage. Data points are the intersection of each χ zone top and base top with the corresponding SRZ top and base. A sleeve or ‘tunnel’ is fit through each data set. Variability within each tunnel results from the superimposition of lower frequency cycles on the ~405 kyr trends. The longest coherent tunnel within the Eifelian represents ~4.7 myr with an sediment accumulation rate of ~0.32 cm/kyr. Note that building this FPTS by starting with 393.3 Ma, given by Gradstein et al. (2012), changes the Eifelian–Givetian boundary, which becomes 387.3 Ma, instead of 387.7 Ma given by Gradstein et al. (2012).

Eifelian Standardized SRZ and Conodont Zonation

(Conodont zonation from Graphic Correlation work of
Gouwy and Bultynck, 2003; Bultynck, 2007)

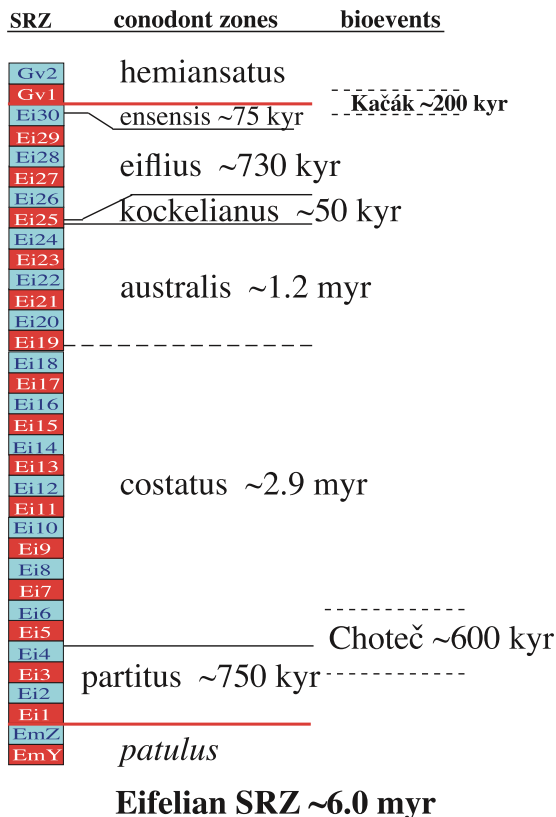


Fig. 8. The revised SRZ (Fig. 6), based on 30 ~200 kyr half cycles, is compared with the conodont zonation scheme of Gouwy and Bultynck (2003). Also plotted are the positions of the important Choteč and Kačák bio-events, and, based on comparison to the SRZ, the length of time that each biozone/event is estimated to have lasted.

6.5. The Choteč bio-event

Summaries dealing with the Choteč, basal Eifelian bio-event are presented by several workers including House (2002) and Walliser et al. (1995). χ data presented here indicate a relatively long period of time (Fig. 8) where rising sea level caused a gentle turnover in fauna in European and North African successions (Walliser et al., 1995, 1996; House, 2002). This is equivalent in time to the base of T-R cycle Ic of Johnson et al. (1985, 1989), where they see an 'immense' impact on the mega fauna due first to a major regression, followed by rapid transgression and major extinction of brachiopod faunas in the western USA (Johnson et al., 1985, 1989). In Morocco, the χ data indicate that Ic of Johnson et al. (1985) probably lasted to the base of Ei10 (Fig. 3), well into the costatus biozone (Fig. 8).

6.6. The Kačák bio-event

Summaries dealing with the Kačák end Givetian bio-event (House, 1985) have been presented by several authors (Walliser, 1990; Walliser, 1996; Schöne, 1997; House, 2002; DeSantis et al., 2007), and it is clearly defined in the Eifelian–Givetian GSSP (Walliser et al., 1995). This event is associated with transgression and corresponding dysoxic or anoxic bottom waters (House, 2002), and this is reflected in low χ values for the event (Ellwood et al. (2011a,b), where its position is represented by χ zones Ei29 to Ei30 and ending at the beginning of the Givetian. Extinctions identified during this time are attributed to a transgressive anoxic event (Walliser, 1996) that is equivalent to the onset of the stepped T–R cycle If of Johnson et al. (1985).

7. Conclusions

A climate-based age model for the Middle Devonian Eifelian Stage is tested, using magnetic susceptibility (χ) as an abiotic, climate-sensitive indicator of cyclicity and to develop a standard reference zonation (SRZ) for Milankovitch E2 (~405 kyr) cyclicity known for the Middle Devonian. χ data, when graphically compared to the SRZ for the Eifelian Stage, yield a duration for the Eifelian of ~6.0 to 6.1 myr, in close agreement but slightly longer than the duration given by Gradstein et al. (2012). The general approach used here is to first identify a geologic Stage of interest (we chose the Eifelian). Then, (1) select an initial age for the duration of the stage from the literature, in this case ~5.6 myr from Gradstein et al., (2012), and (2) a standard biostratigraphic zonation is fit to a SRZ, here a standard conodont zonation was chosen and compared to an expected ~405 kyr χ cyclicity that is fit to the duration estimated for the stage (~5.6 myr from Gradstein et al., 2012). This yields approximately fourteen ~405 climate cycles. Following this, (3) the bounding Global boundary Stratotype Sections and Points (GSSP)s are identified for that stage (if they have been defined), and they are sampled and measured these for χ . (4) Then, time-series analysis is applied to the measured data sets to identify the ~405 kyr climate cyclicity if present. (5) This result is tested by comparing χ cyclicity with the SRZ model by graphically comparing χ zones from the bounding GSSPs and a reference succession that ties the GSSPs into a composite section. In this case χ zones from the Emsian–Eifelian, GSSP in Germany, and Eifelian–Givetian GSSP in Morocco, along with χ zones from the Eifelian χ zone data set recovered from the Jebel Amelane succession in Morocco. Based on χ , biostratigraphic and time-series data, we adjusted the duration of the Eifelian Stage to ~6.0–6.1 myr, yielding ~30 χ zones representing 20, ~405 kyr half cycles. The process is then completed by plugging the standard biostratigraphic zonation into the uniform climate zonation for the stage. This work provides a framework that can then be further modified as additional data become available, ideally with each modification resulting in greater age precision.

A floating-point timescale (FPTS) for the Eifelian was developed by graphically comparing χ zones to an SRZ model that assumes uniform ~405 kyr climate cyclicity. Because each χ zone only represents half of the cycle, the χ zonation presented here represents time resolution to ~200 kyr. Any biostratigraphic zonation for the Eifelian can be tied to the SRZ allowing timing of significant bio-events that have been described for the Middle Devonian. In the Eifelian these are the Choceč and Kačák extinction bio-events that are both shown to occur in association with T–R χ cycles, in agreement with biostratigraphic and lithologic studies. It has been argued that these events are global. Therefore, the zonation described here can provide a means for precise identification of these events in other regions, and the FPTS allows evaluation of relative timing of

these events in a global context. Most important is that the method used here provides a means for high-resolution correlation on a global basis, using geophysical or geochemical climate-proxy data sets.

Acknowledgements

This work was funded in part by grants to R.E. Crick and B. Ellwood from the National Science Foundation (NSF; EAR-9628202) and the American Chemical Society PRF (#30845-AC8 and #34259-AC8). We wish to thank Suzanne Ellwood for her important contribution to this work in designing the sampling method used in collecting our samples, for her participation in collecting all of the Moroccan samples reported here, and for other significant contributions to the work.

References

- [1] Berger, A.L., 1978. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *Journal of Atmospheric Sciences* 35, 2362–2367.
- [2] Berger, A., Loutre, M.F., Lasker, J., 1992. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. *Science* 255, 560–566.
- [3] Bultynck, P., 2007. Limitations on the application of the Devonian standard conodont zonation. *Geological Quarterly* 51, 339–344.
- [4] Crick, R.E., Ellwood, B.B., El Hassani, A., Feist, R., Hladil, J., 1997. Magnetostratigraphy (MSEC) of the Eifelian–Givetian GSSP and associated boundary sequences in north Africa and Europe. *Episodes* 20, 167–175.
- [5] Crick, R.E., Ellwood, B.B., El Hassani, A., Feist, R., 2000. Proposed Magnetostratigraphy Susceptibility Magnetostratotype for the Eifelian–Givetian GSSP (Anti-Atlas Morocco). *Episodes* 23, 93–101.
- [6] Crick, R.E., Ellwood, B.B., El Hassani, A., Hladil, J., Hroudá, F., Chlupac, I., 2001. Magnetostratigraphy Susceptibility of the Pridoli–Lochkovian (Silurian–Devonian) GSSP (Klonk, Czech Republic) and a Coeval sequence in Anti-Atlas Morocco. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 167, 73–100.
- [7] Da Silva, A.-C., Boulvain, F., 2002. Sedimentology, magnetic susceptibility and isotopes of a Middle Frasnian carbonate platform: Tailfer Section, Belgium. *Facies* 46, 89–102.
- [8] Dettinger, M.D., Ghil, M., Strong, C.M., Weibel, W., Yiou, P., 1995. Software expedites singular-spectrum analysis of noisy time series. *Eos Transactions of the American Geophysical Union* 76, 12–21.
- [9] DeSantis, M.K., Brett, C.E., Ver Straeten, C.A., 2007. Persistent depositional sequences and bioevents in the Eifelian (early Middle Devonian) of eastern Laurentia: North America. Evidence of the Kacak Events? In: BECKER, R.T. & KIRCHGASSER, W.T. (eds) *Devonian Events and Correlations*. Geological Society of London, Special Publications 278, 83–104.
- [10] Ellwood, B.B., Algeo, T., El Hassani, A., Tomkin, J.H., Rowe, H., 2011b. Defining the Timing and Duration of the Kačák Interval within the Eifelian/Givetian Boundary GSSP, Mech Irdane, Morocco, Using Geochemical and Magnetic Susceptibility Patterns. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 304, 74–84.

- [11] Ellwood, B.B., Brett, C.E., MacDonald, W.D., 2007a. Magnetostratigraphy of the Upper Ordovician Kope Formation, Northern Kentucky. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 243, 42–54.
- [12] Ellwood, B.B., Crick, R.E., El Hassani, A., 1999. The magneto-susceptibility event and cyclostratigraphy (MSEC) method used in geological correlation of Devonian rocks from Anti-Atlas Morocco. *American Association of Petroleum Geologists* 83, 1119–1134.
- [13] Ellwood, B.B., Crick, R.E., El Hassani, A., Benoist, S.L., R. H. Young, R. H., 2000. The magnetostratigraphy event and cyclostratigraphy (MSEC) method applied to marine rocks: detrital input versus carbonate productivity. *Geology* 28, 1134–1138.
- [14] Ellwood, B.B., García-Alcalde, J.L., El Hassani, A., Hladil, J., Soto, F.M., Truyols-Massoni, M., Weddige, K., Koptikova, L., 2006. Stratigraphy of the Middle Devonian Boundary: Formal Definition of the Susceptibility Magnetostratotype in Germany with comparisons to Sections in the Czech Republic, Morocco and Spain. *Tectonophysics* 418, 31–49.
- [15] Ellwood, B.B., Tomkin, J.H., El Hassani, A., Bultynck, P., Brett, C.E., Schindler, E., Feist, R., Bartholomew, A., 2011a. A climate-driven model and development of a floating point time scale for the entire Middle Devonian Givetian Stage: A test using magnetostratigraphic susceptibility as a climate proxy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 304, 85–95.
- [16] Ellwood, B.B., Tomkin, J.H., Ratcliffe, K.T., Wright, M., Kafafy, A.M., 2008. High Resolution Magnetic Susceptibility and Geochemistry for the Cenomanian/Turonian Boundary GSSP with Correlation to Time Equivalent Core. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 261, 105–126.
- [17] Ellwood, B.B., Tomkin, J., Richards, B., Benoist, S.L., Lambert, L.L., 2007b. MSEC Data Sets Record Glacially Driven Cyclicity: Examples from the Arrow Canyon Mississippian-Pennsylvanian GSSP and Associated Sections. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, doi: 10.1016/j.palaeo.2007.08.006.
- [18] Ghil M., Allen, R.M., Dettinger, M.D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M.E., Robertson, A., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F., Yiou, P., 2002. Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews in Geophysics* 40, 3.1–3.41, 10.1029/2000RG000092.
- [19] Gouwy, S., Bultynck, P., 2003. Conodont based graphic correlation of the Middle Devonian formations of the Ardenne (Belgium): implications for stratigraphy and construction of a regional composite. *Revista Española de Micropaleontología* 35, 315–344.
- [20] Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., Ogg, G.M., 2012. *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, Netherlands 1144 .
- [21] Hartl, P., Tauxe, L., Herbert, T., 1995. Earliest Oligocene increase in South Atlantic productivity as interpreted from “rock magnetism” at Deep Sea drilling Site 522. *Paleoceanography* 10, 311–326.
- [22] House, M.R., 2002. Strength, timing, setting and cause of mid-Palaeozoic extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 181, 5–25.
- [23] Jenkins, G.M., Watts, D.G., 1968. *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco, 525 pp.

- [24] Johnson, J.G., Klapper, G., Sandberg, C.A., 1985. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica. *Geological Society of America Bulletin* 96, 567–587.
- [25] Johnson, J.G., Sandberg, C.A., 1989. Devonian eustatic events in the Western United States and their biostratigraphic responses. In: McMillan, N.J., Embry, A.F., Glass, D.J. (Eds.), *Devonian of the World*. Calgary, Canadian Society of Petroleum Geologists, *Memoir* 14, vol. 3, pp. 171–178.
- [26] Jovane, L., Florino, F., Sprovieri, M., Pälke, H., 2006. Astronomic calibration of the late Eocene/early Oligocene Massignano section (Central Italy). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7, 10 p., Q07012, doi: 10.1029/2005GC001195.
- [27] Jovane, L., Sprovieri, M., Florindo, F., Acton, G., Coccioni, R., Dall’Antonia, B., and Dinarés-Turell, J., 2007. Eocene–Oligocene paleoceanographic changes in the stratotype section, Massignano, Italy: clues from rock magnetism and stable isotopes: *Journal of Geophysical Research* 112, 16 p., B11101, doi:10.1029/2007JB004963.
- [28] Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A., Levrard, B., 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics* 428, 261–285.
- [29] Mead, G.A., Yauze, L., LaBrecque, J.L., 1986. Oligocene paleoceanography of the South Atlantic: paleoclimate implications of sediment accumulation rates and magnetic susceptibility. *Paleoceanography* 1, 273–284.
- [30] Schöne, B.R., 1997. Der otomari-Event und seine Auswirkungen auf die Fazies des Rhenoharzynischen Schelfs (Devon, Rheinisches Schiefergebirge). *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie* 70: 140 pp.
- [31] Shackleton, N.J., Crowhurst, S.J., Weedon, G.P., Laskar, J., 1999b. Astronomical calibration of Oligocene–Miocene time. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, A* 357, 1907–1929.
- [32] Shaw, A.B., 1964. *Time in Stratigraphy*. New York, McGraw Hill, 365 pp.
- [33] Swartzendruber, L.J., 1992. Properties, units and constants in magnetism. *Journal of Magnetic Materials* 100, 573–575.
- [34] Walliser, O.H., 1990. How to define «Global Bio-Events». In: Kauffman, E.G. & Walliser, O.H. (Eds.): *Extinction Events in Earth History*. *Lecture Notes in Earth Sciences* 30: 1–3 (Springer Verlag).
- [35] Walliser, O.H., 1996. Global events in the Devonian and Carboniferous. In: O.H. Walliser (ed.), “Global Events and Event Stratigraphy”. Springer Verlag, 225–250.
- [36] Walliser, O.H., Bultynck, P., Weddige, K., Becker, R.T., House, M.R., 1995. Definition of the Eifelian–Givetian Stage boundary. *Episodes* 18, 107–115.
- [37] Weddige, K., Menning, M., Jansen, U., Schindler, E., 2005. Die Devon-Zeitskala der stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. *Newsletters on Stratigraphy* 41, 61–69.
- [38] Weedon, G.P., Jenkyns, H.C., 1990. Regular and irregular climatic cycles and Belemnite Marls (Pliensbachian, Lower Jurassic, Wessex Basin). *Journal of the Geological society of London* 147, 915–918.
- [39] Weedon, G.P., Jenkyns, H.C., Coe, A.L., Hesselbo, S.P., 1999. Astronomical calibration of the Jurassic time-scale from cyclostratigraphy in British mudrock formations. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, A* 357, 1787–1813.

- [40] Weedon, G.P., Shimmield, G.B., 1991. Late Pleistocene upwelling and productivity variations in the northwest Indian Ocean deduced from spectral analyses of geochemical data from sites 722 and 724. *Proceedings of the Ocean Drilling program Scientific Research* 117, 431–443.
- [41] Whalen, M.T., Day, J.E., 2008. Magnetic Susceptibility, Biostratigraphy, and Sequence Stratigraphy: Insights into Devonian Carbonate Platform Development and Basin Infilling, Western Alberta. *Papers on Phanerozoic Reef Carbonates in Honor of Wolfgang Schlager*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication 89, 291–314.
- [42] Ziegler, W., Klapper, G., 1985. Stages of the Devonian system. *Episodes* 8, 104–109.

GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

Pr. Abdelkrim RIMI

*Institut Scientifique,
Université Mohammed V - Agdal,
Rabat, Morocco*



Abstract

The Environmental issues in Morocco are mainly related to natural hazards, water, greenhouse gas emissions as well as climate change.

The mapping of physical properties of earth materials (rocks, air and water bodies) such as density, elasticity, electrical conductivity and magnetization allow to identify and characterize the underground and improve the knowledge of the physical and environmental impacts of any socio-economic project.

Efficient use of geophysical investigations refers to quantitative physical methods (including seismic waves propagation, electrical resistivity, magnetic susceptibility, ground penetrating radar and underground temperature), which are used to evaluate resources such as oil, gas, minerals, water and construction materials and reduce costs of overall resources management and related environmental issues.

Thus, the range of the environmental application of geophysics covers the natural hazards (seismic hazard estimation for strategic projects before construction, tsunamis, landslides, underground cavities ...), the water resources (resources assessment and preservation, preventing the risk of water pollution and contamination), the mining and energy resources (operating careers, alternative resources), the planning and sustainable development (landfills, waste disposal), the climate change (greenhouse gas emissions and surface temperature changes), the assessment of the archaeological heritage (non-destructive characterization of objects and underground structures, pottery kilns, detection of metal pipes, walls and towers).

This article presents : *i*) an overview on the most used geophysical exploration methods for environmental Earth Sciences and Engineering and *ii*) evaluating how we can integrate these images in the studies that require a subsoil acknowledgment for disaster prevention, maintenance of existing constructions, archeological heritage, groundwater pollutions and finally *iii*) focusing on two applications in climate change in Morocco which are : Recent subsurface warming in the north of Morocco from disturbed geothermal gradients and Carbon capture and geological storage potential in Morocco.

The general purpose of the geophysics is the study of physical properties of the rocks from associated earth physical phenomena by using non-destructive techniques to recognize the subsoil.

This leads to numerous fields of application, from the deepest regions until the detection of superficial structures of the Earth : geology, mining, environmental, geotechnical, civil engineering, hydrology and archeology

So, we can summarize the mission of the geophysical exploration in three phases :

- i) data on the ground,
- ii) models (images) of the underground and then,
- iii) interpretation of these models in collaboration with geologists, engineers, archaeologists,...

On the other hand geophysical methods are indirect investigations of earth physical properties and are divided into two main categories :

Active : Depending on artificial source

- 1- Seismic method (seismic velocity)
- 2- Electric method (electrical resistivity)
- 3- GPR method (electromagnetic wave).

Passive: Depending on natural source

- 1- Gravity method (density)
- 2- Magnetic method (magnetic susceptibility)
- 3- Seismology method (seismic velocity).
- 4- Geothermal (temperature, natural radioactivity)
- 5- Self potential (SP) (natural electrical currents)

In the following, we relate some Moroccan applications of geophysical measurements in civil engineering, archeology, in the field of environmental protection and climate change.

1- Seismic Hazard Calculations

Damage caused by an earthquake depends on how the ground moves and how buildings are constructed in the affected area. Expected movements of the ground, which correspond to the seismic hazard, are calculated by one of the two methods :

**Deterministic : This method assumes the location and magnitude of specified scenario earthquakes and determines the effects from these particular events.*

**Probabilistic : This method uses the information from all historic earthquakes, plus geologically inferred earthquake sources (faults, locations and magnitudes), and computes the probable ground shaking levels that may be experienced during, recurrence period.*

These probabilistic estimates serve best for urban planning, land-use, zoning, and seismic building code regulations, also help to determine risk based earthquake insurance primes.

While the design of the main construction projects in Morocco (dams, bridges, power plants...), earthquake ground motion have been taken into account (Figure 1).

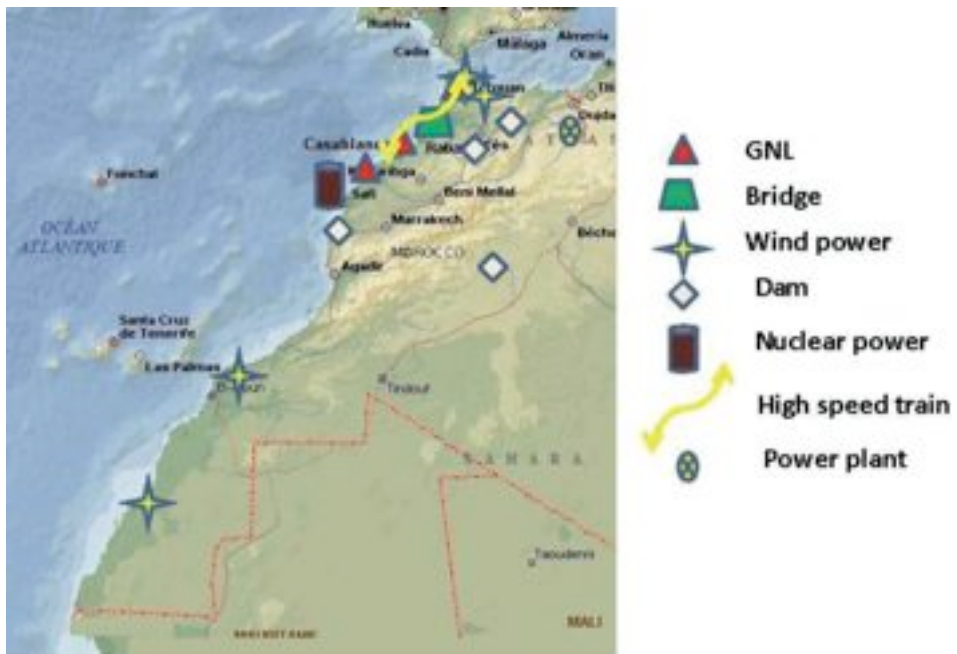


Figure 1 : some strategic projects sites in Morocco

2- Development and preservation of the archaeological heritage

- **Contribution of seismic site effect recording in the assessment of deterioration processes on archaeological sites of Chellah and Oudayas, Rabat (Figures 2 and 3) (Aseabri et al, Ital.J.Geosci. 2009)**

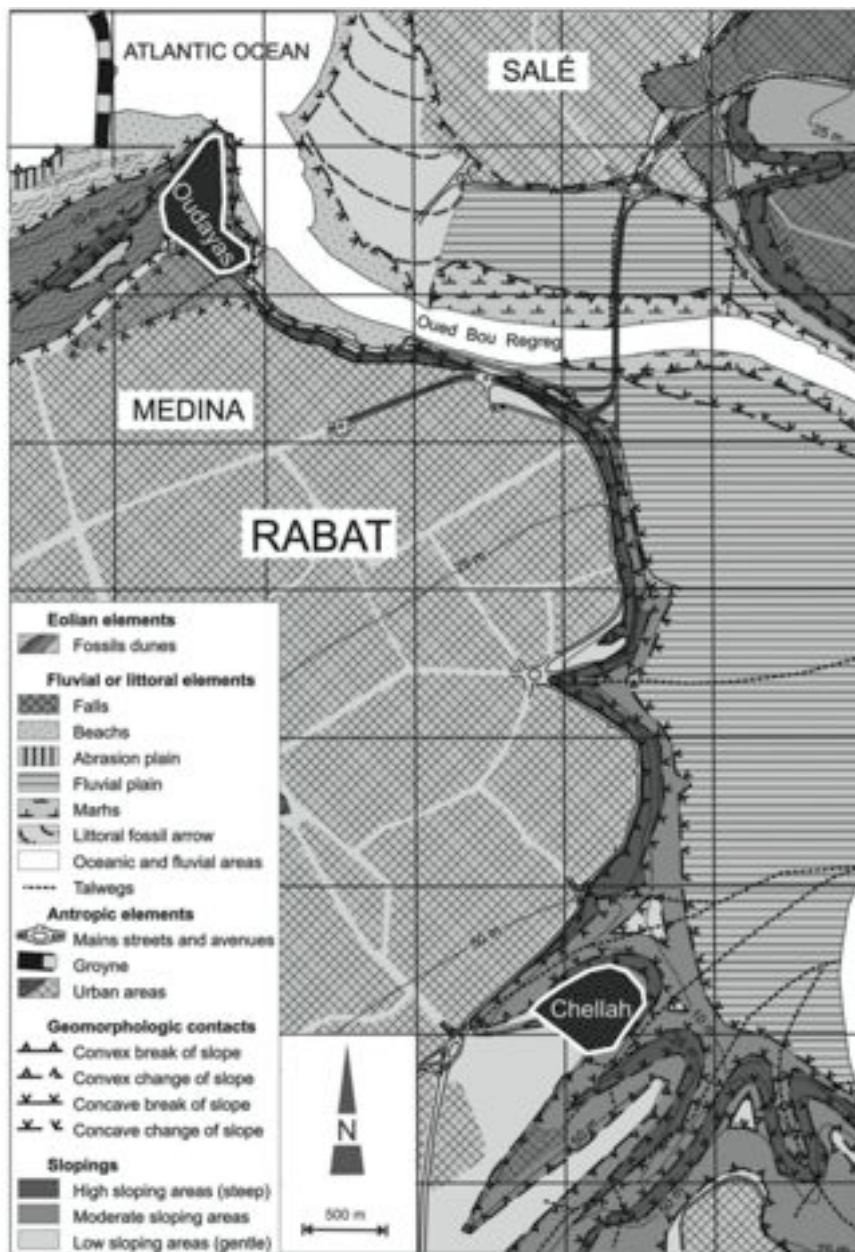


Figure 2 : location of Oudaya and Chellah historical sites of Rabat

By recording and processing of seismic ambient noise to characterize local geological conditions in terms of the dynamic response of soil during earthquakes, Badrane et al. (2006) drew a micro-zoning map of the city of Rabat based on the contours of dominant periods. Such a micro-zoning map can be used by engineers and decision makers for urban and land use planning and also as a guide in reduction of the seismic vulnerability of buildings.

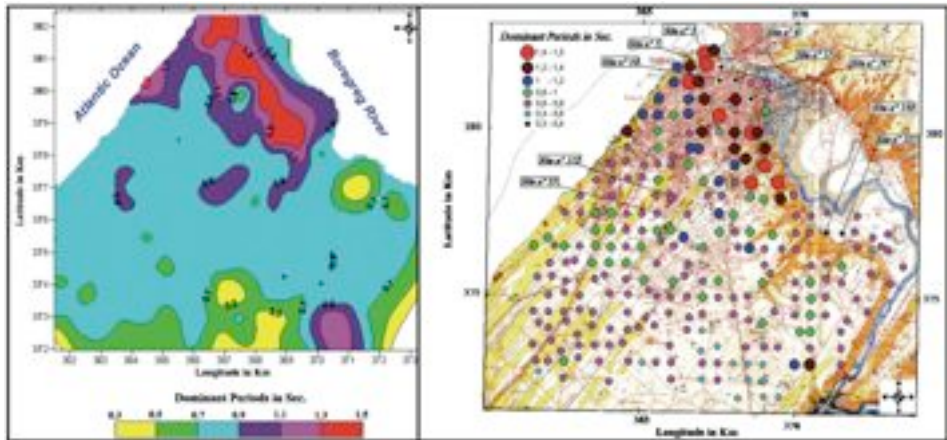


Figure 3 : spectral ratio of the horizontal to vertical components of micro-quakes recorded at the surface during a few minutes, to determine the fundamental period and the maximum amplification factor at the site of measurement (Badrane et al., *J. G. Eng.* 2006).

3- Magnetic survey on Targha Medieval archeological site

(Figures 4 and 5)



Figure 4 : In Targha, everything seems to confirm that in the Middle Ages, Targha was a city of great importance on the coast : density of human occupation, existence of a mosque, a surveillance citadel, an artisan quarter and signs of agricultural activities.

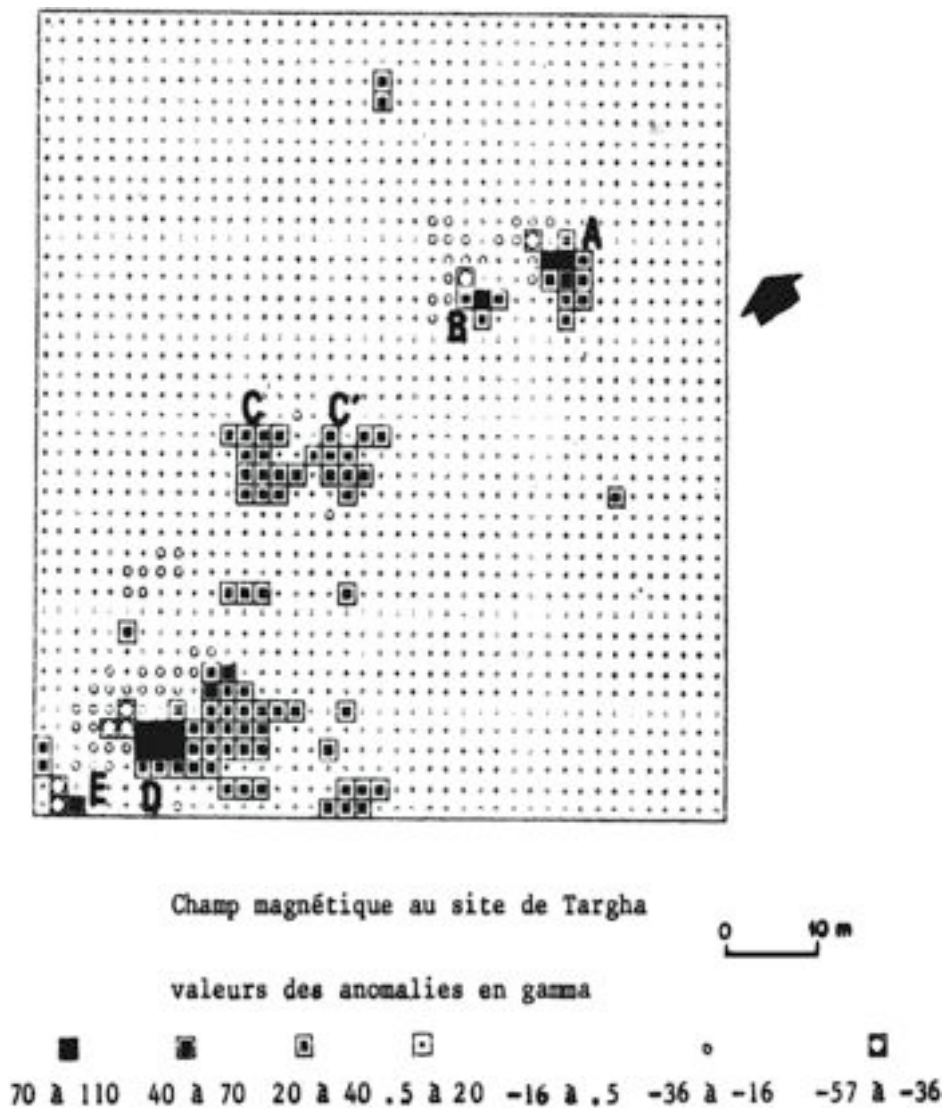


Figure 5 : The firing of clay to make bricks and pottery also has a thermo-remnant effect, making them potentially detectable by Magnetometry surveys depending on their size and depth (El Alami et al. 1988).

4- Reconstruction of remote climate change from disturbed geothermal profiles in northern Morocco

- Surface temperature change from geothermal measurements.

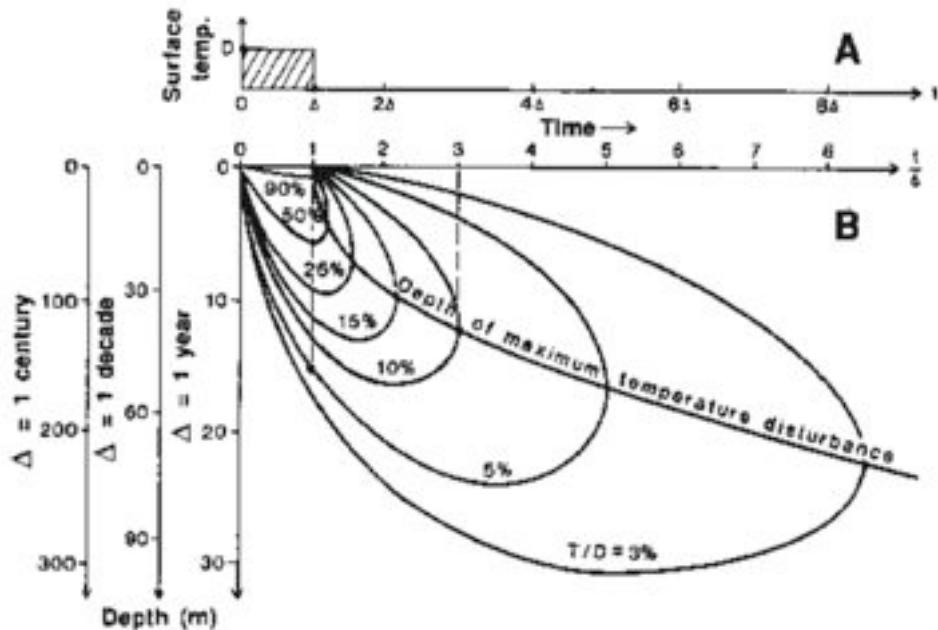


Figure 6 : Thermal memory of earth surface events.

A surface temperature anomaly (A) whose duration is Δ spreads and weakens with depth (B). The curves show the depth-time field, the magnitude of the temperature anomaly T , expressed as a percentage of the surface anomaly D . The ordinate scales give for a thermal diffusivity k_{diff} of $10^{-6} \text{ m}^2.\text{sec}^{-1}$, the depth in meters of events during 1 year, 1 decade, and one century respectively. The maximum signal drops to 10% at the end of a time $t=3\Delta$ after a thermal event and could be observed at a depth of about 11 m for $\Delta = 1$ year and 110 m for $\Delta = 1$ century. At the end of an uniform perturbation of duration Δ , the anomaly becomes insignificant ($<5\%$) below about 50 m for $\Delta = 1$ decade, and 250 m for $\Delta = 1$ century, (Lachunbruch & Marshall, 1986).

From a two temperature profiles in several hydraulic boreholes located in the Oujda-Berkane area, the ground surface temperature history (GSTH) was reconstructed in order to make in evidence a recent warming of $0.1 - 1^\circ\text{C}$ in the last century (Alae et al., 2012).

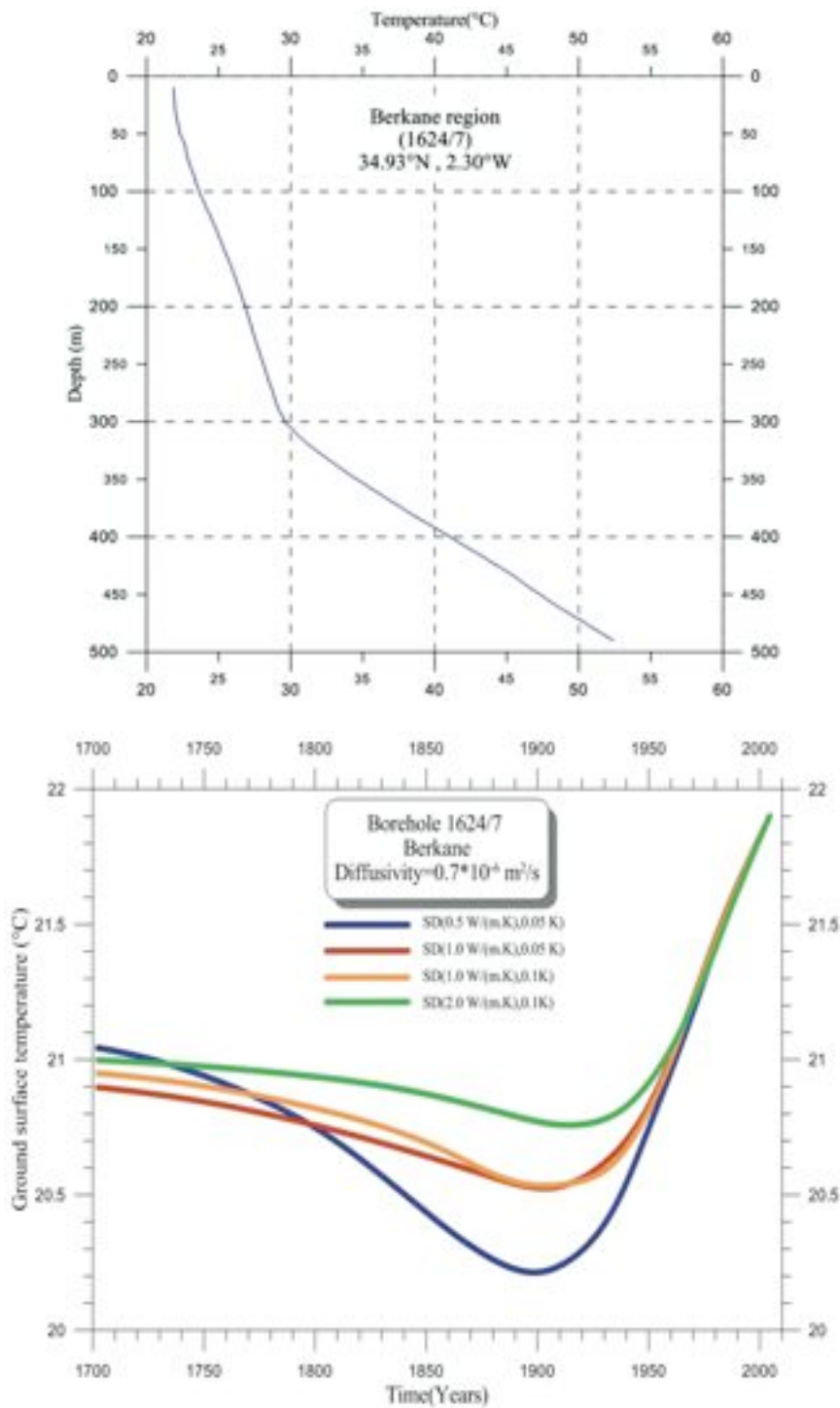


Figure 7 : a- Temperature-Depth profile selected for this study (1624/7 in Berkane).
b-Ground surface temperature history.

5- Geologic Storage of Carbon in Morocco Potential sites for CO₂ storage

The 4.5 (%) average annual growth rate in Morocco is associated with an increase in the country's energy demand, which likely will be met by fossil fuels for at least the next three decades. Accordingly, Carbon Capture and Storage (CCS) are listed as a carbon mitigation strategy for Morocco. Within the scope of FP7 "COMET" project, the location and expected emissions volumes of the main existing CO₂ emission sources, from 2005 to 2010 (power plants, the refinery of Casablanca, cement plants, chemical plants) have been identified in Morocco. CO₂ storage potential reservoirs have also been screened and are restricted to depleted oil and gas fields and neighboring deep saline aquifers in Essaouira, Abda-Doukkala and Gharb areas.

A Geographical Information System (GIS) was used to define seven CO₂ emission source clusters and three sinks clusters in Morocco, taking into account distance, geographical, infrastructure and geological continuity barriers. Indeed the selected sedimentary basins for CO₂ storing extend along the Atlantic coastline axis, from southward Safi to Kenitra northward, which hosts nearly 50% of industrial utilities.

Identification and characterization of point sources and storage location will allow transport network scenarios to be developed between the major source clusters and the sinks clusters. Hence, the sequestration of CO₂ from northern Morocco sources in Mediterranean offshore storage sites (in common with southern Spain) could be more cost effective than in the Gharb where the storage capacity is very limited.

- Reservoir depth (800 m to 2500 m);
- Low permeability of the Cape rock rocks;
- Salinity of the reservoir;
- Porosity and permeability of the reservoir;
- Water temperature, influencing the CO₂ solubility;
- Geological and seismo-tectonic structure.
- This basic information is taken from the files of hydrocarbon exploration boreholes and their associated geophysical logs.

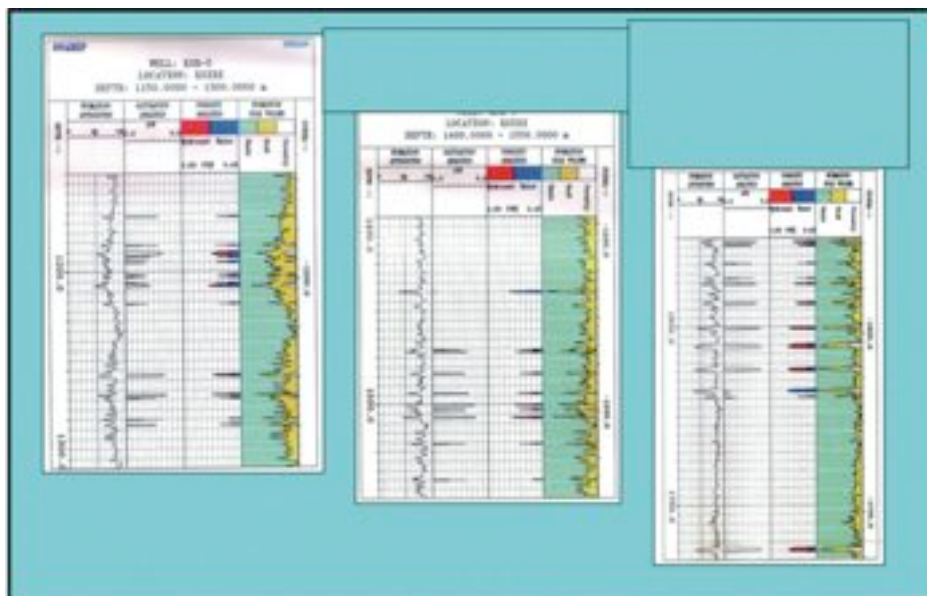


Figure 8 : Stratigraphy based on oil and gas exploration drilled wells data and the interpretation of seismic profiles.

Structural maps and conversion from TWT to m

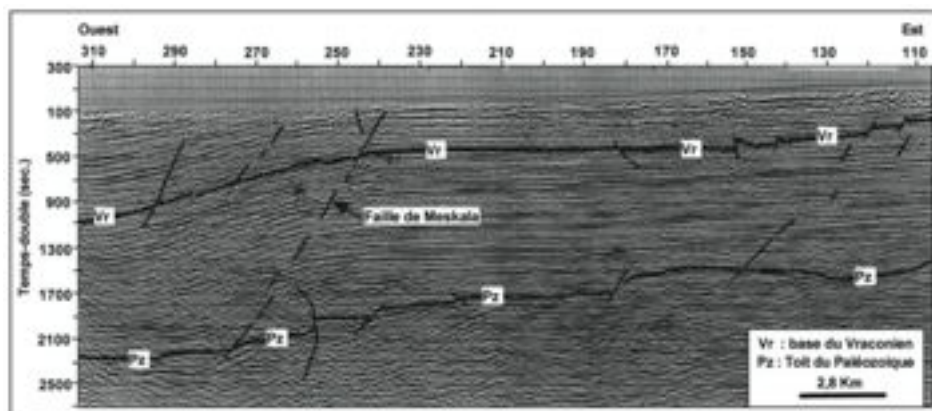


Figure 9 : Seismic data acquired by exploration companies in the 70's and 80's interpreted in various projects.

Potential basins for storing CO₂ in northern Morocco: (Figure 10)

Essaouira, Doukkala and Gharb Basins

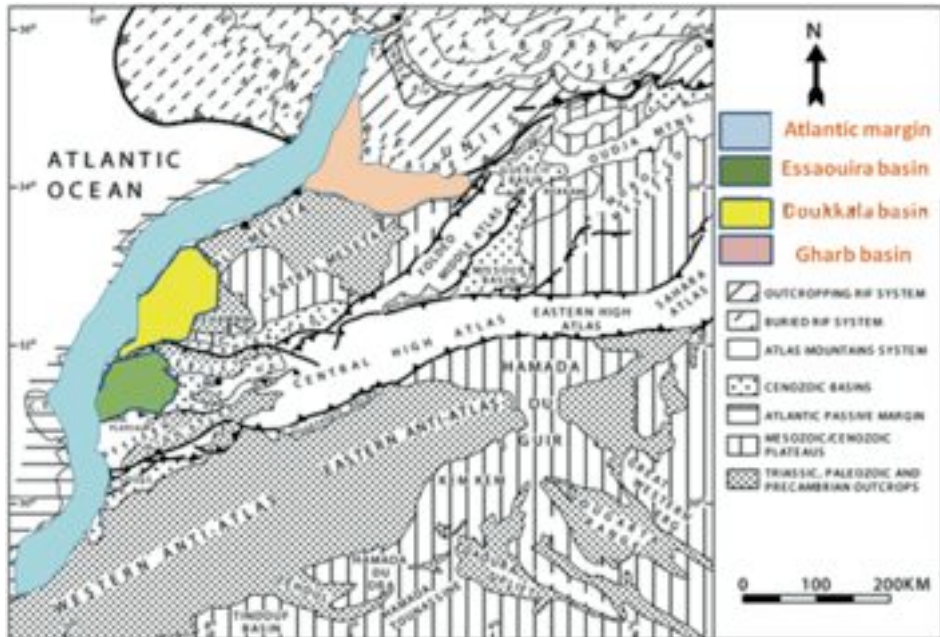


Figure 10 : Potential basins for storing CO₂ in northern Morocco, hydrocarbon fields and saline formations along the Atlantic coastline axis, from southward Safi to Kenitra northward (Rimi et al. 2011).

Concluding remarks

Geophysics has been so far mostly used for exploration of natural resources and environment. However still much work to be done in environment :

For example in some cases, such as household wastes, abandoned mines, theirs effect on groundwater around the project should be studied before construction and geophysical methods (Self potential, ERT, seismic...) can provide a three-dimensional permeability image through interpretation of physical parameters such as resistivity and velocity.

In the future, geophysics must be requested to contribute to constructing and maintaining the safe and easy human life. Most of the work is done by universities without necessarily national policies in term of environment, requiring more education and training in geophysics, to promote jobs by encouraging public and private stakeholders to use geophysical methods.

References

- [1] Lahcen Asebriy, Taj-Eddine Cherkaoui, Iz-Eddine El Amrani El Hassani, Roberto Franchi, Francesco Guerrera, Manuel Martin-Martin Claudia Guerrera Patami A, Giuliana Raffaelli, Pedro Robles-Mari´N, Julian Tejera De Leon & Francisco J. Alcala. 2009. Deterioration processes on archaeological sites of *Chellah and Oudayas (world cultural heritage, Rabat, Morocco)* : restoration test and recommendations, *Ital. J. Geosci. (Boll. Soc. Geol. It.)*, Vol. 128, No. 1, pp. 157-171.
- [1] Saïd Badrane, Lahcen Bahi, Nacer Jabour and Aomar Iben Brahim. 2006. Seismic site effect estimation in the city of Rabat (Morocco), *J. Geophys. Eng.* 3 207–211 doi:10.1088/1742-2132/3/3/001.
- [1] Barkaoui A. E., A. Correia, Y. Zarhloule, A. Rimi, J. Carneiro, M. Boughriba & M. Verdoya, 2012. Reconstruction of remote climate change from borehole temperature measurement in the eastern part of Morocco. *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-012-0638-7, pages 1-11.
- [1] El Alami, S. O., Rimi, A., et Cressier, P., 1988. Un exemple de prospection géophysique appliquée à l'archéologie: la zone de production céramique médiévale de Targha (Maroc). *Bulletin d'Archéologie Marocaine*, Tome XVII, pp. 265-271.
- [1] Lachenbruch, A. H., and Marshall, B. V. 1986, Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan ArcUc, *Science* 234, 689-696.
- [1] Rimi A., Y. Zarhloule, D. Boavida, J.F.Carneiro and R. Martinez, 2011. Integrated infrastructure for CO₂ transport and storage in the west Mediterranean, *miscellanea INGV Anno 2011*, Numero 12, pp. 76-77.

Session Parallèle 6 :

***Utilisation des techniques physiques
dans l'ingénierie verte pour l'industrie***

Modérateur : Pr. Philippe Tanguy

Rapporteur : Pr. Mahfoud Ziyad

PRINCIPES ET APPLICATIONS DE L'INTENSIFICATION EN GÉNIE DES PROCÉDÉS

Pr. Laurent FALK

*Directeur du Laboratoire Réactions et
Génie des Procédés, Nancy, France*



Résumé

L'intensification des procédés consiste, par le développement de méthodes, de techniques et d'appareils adaptés, à concevoir des procédés plus compacts et plus économiques dont la capacité de production est de plusieurs fois supérieure à celle d'un procédé conventionnel. Cette définition se résume de manière très synthétique par «faire plus avec moins». L'intensification s'inscrit dans un contexte de développement durable et répond donc à des enjeux :

- Environnementaux par la mise au point de procédés plus sûrs, moins consommateurs d'énergie, de matières premières et de solvants, et moins polluants;
- Economiques grâce essentiellement à la miniaturisation qui permet de réduire l'intensité capitalistique des procédés (volume des installations et des bâtiments), de diminuer la durée et donc le coût des phases de conception et d'extrapolation. L'intensification est génératrice de nouveaux modèles de coûts (production sur place et à la demande, diminution des stocks, flexibilité par l'assemblage de modules);
- Sociétaux provenant des avantages techniques et économiques qui contribuent à la compétitivité de l'industrie chimique. La diminution des étapes de conception et d'industrialisation accélère la mise sur le marché de nouvelles molécules et nouveaux produits. Les technologies intensifiées permettent de réaliser des produits de meilleure qualité ou même de nouveaux produits plus techniques.

Les objectifs applicatifs ci-dessus ne sont pas fondamentalement différents de ceux du génie des procédés en général, mais ils se présentent dans un contexte qui lui a évolué. Ainsi ces objectifs répondent à des enjeux sociétaux nouveaux et intégratifs liés au développement durable. Le chercheur et l'ingénieur de génie des procédés ne peuvent plus dissocier les performances techniques des impacts environnementaux, ni oublier les aspects économiques des procédés. Ces travaux s'inscrivent également dans un contexte

sociologique nouveau dans lequel les notions de rapidité et de flexibilité sont synonymes de performance (traiter plus d'information, développer plus rapidement un procédé, produire plus, accéder plus vite au marché). L'idée d'intensification des procédés est également fortement liée à la technologie de systèmes microstructurés qui ouvre parallèlement de nombreuses perspectives pour la élaboration de nouveaux produits (en particulier particules, capsules, etc) dont la taille et la morphologie peuvent être contrôlée grâce à la micro- fluidique.

La conférence présente les principes généraux de l'intensification, et en particulier de l'intensification par microstructuration, illustrés par différentes applications dans le domaine de la chimie et de l'énergie.

Compte rendu de la conférence du Pr. Laurent FALK par le Collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique

L'intensification des procédés industriels consiste à concevoir des procédés compacts et économiques, de capacité de production beaucoup plus importante que celle des procédés conventionnels et cela en développant des méthodes, des techniques et des dispositifs innovants.

L'intensification est un principe de développement durable. Il a pour but essentiel de répondre à une demande et à nos besoins actuels sans pour autant compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs (rapport Bruntland 1987). La chimie, dans sa signification large, est une composante indispensable du développement durable. C'est à elle que revient le devoir de rendre les procédés industriels plus durables, c'est-à-dire qui obéissent au principe des 3 P, qui est une optimisation entre les trois paramètres fondamentaux : People, Profit and Planet. En d'autres termes lorsqu'une installation industrielle réalise des bénéfices (profit), cela n'est pas sans impact sur l'environnement et par suite sur la planète (planet). Du point de vue sociétal, il y a un bénéfice parce que l'industrie a créé des richesses (des emplois pour les jeunes = People).

En comparaison avec les procédés existants, l'intensification introduit:

- une amélioration significative de la qualité et du coût de production par une diminution de l'espace de production, par des investissements moindres et une meilleure sélectivité au niveau réactionnel;
- une diminution importante du rapport taille/capacité;
- une nette diminution de la consommation énergétique;
- une diminution de la quantité de déchets produits;
- une amélioration de la sécurité dans les installations en comparaison avec les usines qui ont conduit à la catastrophe historique de Bhopal (Inde) survenue le 3 décembre 1984 dans une usine de la firme Union Carbide qui produisait des insecticides et qui a dégagé 40 tonnes d'isocyanate de méthyle ($\text{CH}_3\text{-N=C=O}$) dans l'atmosphère. On peut aussi citer les catastrophes de Seveso (nuage contenant de la dioxine, Meda, Italie) et l'explosion qui s'est produite dans l'usine AZF à Toulouse (2001).

Dans la pratique pour maîtriser les risques inhérents à toute installation, il convient d'adopter les démarches suivantes :

- identifier les dangers associés aux produits et appareillages utilisés;

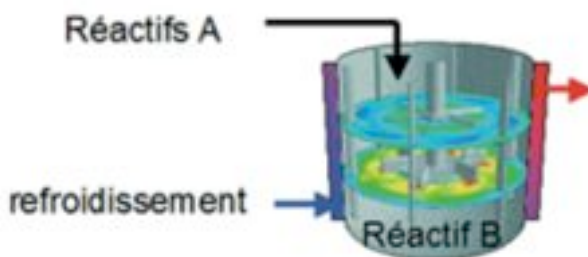
- répertorier les risques découlant des technologies mises en œuvre;
- analyser les causes des dangers;
- définir les dispositions préventives à mettre en œuvre.

Il y a lieu de noter que l'intensification est un changement d'approche dans la pratique du génie industriel. Elle vise la conception de nouveaux réacteurs chimiques ayant des tailles adaptées aux phénomènes physico-chimiques mis en œuvre et non l'adaptation du phénomène étudié au type de réacteur que l'on sait fabriquer. Les principes fondamentaux de l'intensification des procédés ont été définis par Stankiewicz et Moulijn (2000) et se basent sur la devise : *Smaller, cheaper and safer* qu'on peut résumer par : utiliser moins pour produire plus, en agissant sur la miniaturisation des équipements (hardware) et sur les méthodes (software). L'intensification est un concept d'usines du futur qui mettent en œuvre des procédés de transformation efficaces dans toute la chaîne de fabrication d'un produit. C'est des procédés industriels propres, sûrs et sobres qui accroissent le retour sur investissement et l'image de marque des compagnies.

En ce qui concerne les équipements utilisés, il est important qu'on puisse :

- contourner les limitations qui peuvent être induites par les divers transferts;
- trouver un moyen d'accroître les surfaces de contact;
- augmenter au maximum le rapport puissance/volume;
- contrôler l'hydrodynamique dans les installations.

A titre d'illustration de ces exigences, considérons une réaction chimique exothermique qui se déroule dans un réacteur batch ou semi-batch (cuve agitée ouverte ou fermée sur figure suivante) :



Les contraintes à respecter dans ce cas de figure sont :

- une évacuation correcte de la chaleur;
- le maintien du facteur $\Delta T_{ad} \frac{t_{ech}}{t_{réa}} \sim \frac{kC_A D}{h_{éch}}$ constant; (D est un coefficient d'échange, et $h_{éch}$ dépend du réacteur et de la puissance dissipée).

Intensifier ce système reviendrait, par exemple, à multiplier par deux la production, ce qui nécessiterait de multiplier la concentration en réactif par deux ainsi que celle du coefficient $h_{éch}$. Le réacteur doit être suffisamment miniaturisé pour qu'on puisse éliminer efficacement les excédants de chaleur dus à la réaction. Il doit aussi pouvoir fonctionner à haute température, avec une bonne cinétique et sans danger. Il est évidemment plus avantageux d'opter, quand c'est possible, pour des réacteurs dynamiques dans lesquels les évacuations de chaleur de réaction sont plus aisées.

Le Professeur L. Falk a aussi développé le principe d'intensification par microstructuration et ses avantages. Les procédés miniaturisés sont caractérisés par des surfaces fonctionnelles structurées importantes et des volumes opérationnels faibles ce qui leur donne un grand rapport surface/volume qui permet d'obtenir de bien meilleurs mélanges et des transferts de chaleur et de matière optimisés (les poumons constituent l'un des meilleures systèmes du vivant où le rapport surface/volume est optimisé). Un autre exemple de procédé optimisé est la séparation sur colonne à distiller conventionnelle. L'orientation verticale de la colonne fait que l'effet de la gravitation est dominant par rapport aux effets de mouillabilité des supports ou des forces de capillarité. Dans les procédés miniaturisés, comportant des micropores ou des micro-canaux, c'est les forces capillaires qui jouent le rôle déterminant dans les processus de transfert (la gravité est négligeable)

Parmi les exemples cités par le conférencier figure la synthèse de l'acétate de méthyle (éthanoate de méthyle). Ce procédé a été développé par Eastman Chemicals Inc. La réaction chimique s'écrit : ACIDE + ALCOOL = ESTER + EAU

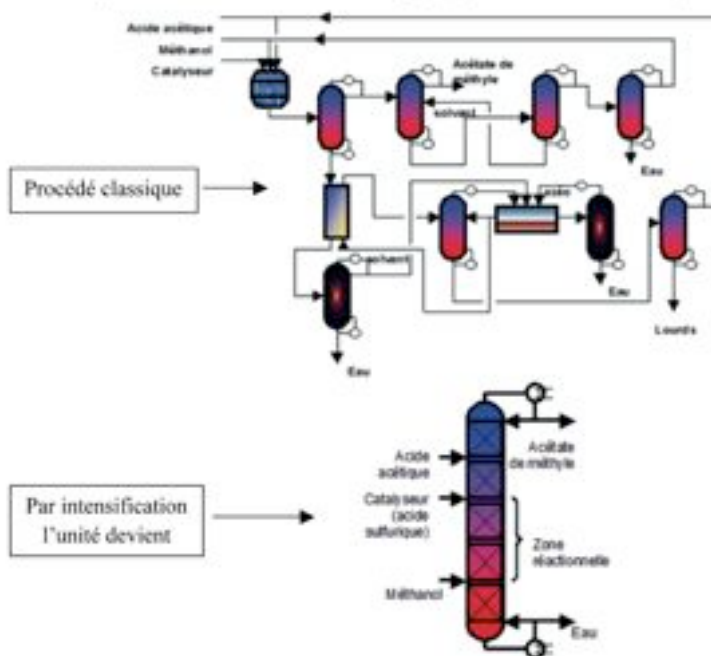
Soit : $\text{CH}_3\text{-COOH} + \text{CH}_3\text{-OH} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{-COOCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

La réaction se fait en présence d'un acide qui joue le rôle de catalyseur. Le procédé classique de fabrication de ce composé est relativement complexe et onéreux. Son intensification, comme le montre le schéma suivant, simplifie le procédé :

Le procédé intensifié ne comprend plus qu'une seule colonne qui concentre aussi bien la réaction chimique que la séparation des produits. En conséquence, on réalise des gains en énergie en équipement et en espace. Le coût global y compris celui de l'entretien est divisé par 5 environ.

Toutes ces améliorations sont le fruit de couplages judicieux qui accroissent les performances et l'efficacité globale du procédé.

Synthèse de l'acétate de méthyle (Eastman Chemicals)



DISCUSSION

- **Dr. Ismail AKALAY** (ITIT)

Que se passe-t-il quand la réaction principale donne lieu à des réactions secondaires?

- **Pr. L. FALK** (l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Nancy, France)

L'intensification demande alors un changement des conditions opératoires.

- **Dr. Mohamed SMANI** (R&D Maroc)

Baisser les coûts, réduire les risques c'est des voies d'amélioration?

- **Pr. L. FALK** (l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Nancy, France)

Oui, ce qui manque c'est le matériel (hardware). Le marché des équipements est encore relativement pauvre.

- **Pr. Philippe TANGUY** (ITIT)

Est-ce que l'intensification a des limites? Qu'en est-il de la généralisation?

- **Pr. L. FALK** (l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Nancy, France)

L'intensification marche, elle marche même très bien sur les faibles productions mais le concept est bien plus général.

LE TRAITEMENT DES DÉCHETS MINIERES POUR L'OBTENTION DE PRODUITS À HAUTE VALEUR AJOUTÉE

Pr. Mohamed BARAKATE

Directeur projet «acide sulfurique et oxyde de fer»



Résumé

Managem est un groupe minier intégré gérant un portefeuille de ressources minérales diversifié au Maroc et à l'international.

Ses activités génèrent une quantité importante de résidus minéraux ou de stériles. Conscient de l'impact de ces activités sur l'environnement, le groupe Managem a entamé une démarche volontariste en créant son centre de recherche en 1986, avec comme un des objectifs, la valorisation des rejets miniers en des produits à forte valeur ajoutée.

Le premier et grand exemple fût la valorisation des rejets miniers de la mine de Bou Azzer cumulés depuis le démarrage de l'activité en 1928. Le centre de recherche de REMINEX a ainsi développé un procédé industriel produisant du Cobalt métal et devint ainsi l'origine de la création d'un deuxième métier au sein de Managem, celui de l'hydrométallurgie.

D'autres projets sont venus couronner le succès des efforts de recherche menés par les équipes R&D du centre de recherche en collaboration avec les équipes opérationnelles: la valorisation de la calamine faible teneur, la récupération du sulfate de sodium à partir des effluents liquides ou encore le projet de mine urbaine portant sur la valorisation des Déchets d'Equipements Electriques et Electronique (DEEE).

Le Groupe renforce son appui sur la capacité de R&D et d'innovation de son centre, comme fer de lance et levier de croissance, pour transformer les menaces environnementales en opportunités de développement économique-social créatrice de richesses et de valeurs pour l'ensemble des parties prenantes.

LE COMPOSTAGE : UNE TECHNOLOGIE VERTE DE VALORISATION DES GISEMENTS DE DÉCHETS ORGANIQUES

Pr. Brahim SOUDI

***Département des Ressources Naturelles
et de l'Environnement
IAV Hassan II, Rabat, Maroc***



Résumé

L'intensification des activités socio-économiques et de consommation au Maroc s'accompagne d'une génération de gisements importants de déchets organiques : la fraction organique des déchets ménagers (plus de 4 Millions de tonnes), les boues des stations d'épuration dont le gisement atteindra avec le rythme de réalisation du Plan national d'assainissement près de 450 000 tonnes /an, les déchets d'élevage bovin (près de 100 millions de tonnes), les fientes de volailles (près de 1 million de tonnes), les déchets verts urbains, les déchets agricoles et horticoles (plus de 1 million de tonnes : an). Ces trois dernières catégories sont candidates à un accroissement soutenu tout au long de la mise en œuvre du Plan Maroc Vert. Ces déchets sont à la fois source de nuisances et d'impacts négatifs potentiels mais peuvent, en grande partie, faire l'objet d'une valorisation «matière» et/ou énergétique. Cette approche de recyclage – valorisation s'inscrit parfaitement dans l'esprit d'une économie circulaire et constitue une alternative parmi d'autres à la problématique de raréfaction des matières premières.

La présente communication traitera de la valorisation «matière» ou biologique des déchets organiques par la technologie de compostage. Ce procédé biologique de conversion de la matière organique brute, est internationalement reconnu en tant qu'option écologiquement durable de gestion intégrée des déchets en comparaison à d'autres voies d'élimination (mise en décharge, incinération, etc.).

Il sera ainsi procédé, lors de cette communication, à **i)** la position du problème associé aux différentes catégories de déchets organiques au Maroc, **ii)** proposer, à la lumière des résultats de recherche obtenus et testés au Maroc, les technologies de compostage adaptées au contexte socio-économique et climatique marocain et à la nature du déchet, **iii)** étayer

les gains économiques, agro-environnementaux et sanitaires susceptibles d'être générés par cette option de recyclage – valorisation du compost. Parmi les avantages qui seront présentés, on peut dire que le compostage est à la fois un procédé d'élimination mais aussi une option de valorisation. En effet, le processus de biodégradation qui s'opère au cours du compostage permet une réduction de la quantité de déchets (matières premières à composter) d'environ 40 à 50%. La matière restante «compost» a une valeur nutritive très significative pour les plantes et une valeur organique extrêmement noble qui qualifie le compost d'excellent produit d'amendement organique et de conditionneur des sols. Le passage du processus par une phase thermophile permet une suppression de la plupart des pathogènes et donc un assainissement naturel des déchets.

La valorisation de la valeur nutritive et organique du compost sera étayée par des résultats de recherche effectués par l'IAV Hassan II. Les résultats obtenus constituent un argument fort pour l'adoption de cette option de compostage. En effet, les sols marocains sont relativement pauvres en matière organique (dont la plupart ont une teneur nettement inférieure à 1%) comparativement aux sols des zones tempérées. Ceci est attribué aux conditions thermiques favorables à la forte minéralisation de la matière organique aux pratiques souvent inadéquates de gestion des restes de cultures. Il sera rappelé que le patrimoine humique des sols marocains se perd mais se renouvelle très peu. Ceci risque de porter préjudice à la durabilité des fonctions écologiques et nourricières du sol eu égard à l'importance de la matière organique dans le conditionnement de la qualité des sols.

Enfin, le contexte actuel oblige : étant donné que la thématique s'inscrit en entier dans les cycles biogéochimiques de carbone et de l'azote, des interrelations avec le changement climatique seront abordés.

La dynamique de développement durable à laquelle aspire notre pays demeure tributaire des efforts déployés pour la maîtrise des facteurs qui inhibent ce processus. La gestion des déchets solides municipaux constitue un des challenges qu'il faut aborder si on veut atteindre cet objectif.

Il s'avère inutile et redondant de se livrer dans la description détaillée de la situation actuelle des déchets municipaux au Maroc. Cela peut se résumer en quelques constats majeurs : une production importante et croissante des déchets, une forte pression sur l'environnement qui se solde par des impacts négatifs sur les ressources naturelles et sur le cadre de vie et les conditions sanitaires des populations, une démarche de planification insuffisante, une gestion non intégrée et non durable, une multitude d'intervenants, une faible capacité financière des acteurs et une insuffisance en éducation et information.



La quasi-totalité des déchets s'acheminent vers les décharges sauvages sans aucun traitement préalable et sans aménagement des sites réceptacles. En effet, on compte plus de 300 décharges sauvages contre quelques décharges contrôlées.

Actuellement, la volonté des pouvoirs publics et du gouvernement et le contexte général ménagent des conditions favorables pour rehausser le secteur : (i) la loi sur les déchets 28-00, (ii) l'adoption de la charte communale en Juillet 2008, et (iii) le Programme National de gestion des Déchets Ménagers et assimilés (PNDM) initié et piloté par le Ministère de l'Intérieur et le Département de l'Environnement.

Ce programme vise la mise à niveau de ce secteur et vint appuyer les communes pour palier aux différentes difficultés qu'elles rencontrent en matière de gestion des déchets. Il vise essentiellement un appui financier au processus de gestion déléguée de la collecte et du nettoyage, un cofinancement de la réalisation des décharges contrôlées et un cofinancement de la réhabilitation des décharges non contrôlées.

Les interventions relatives aux options de tri, recyclage et valorisation sont prévues mais les objectifs à atteindre et actions de leur mise en œuvre ne semblent pas être clairement définis. En effet, en dehors de quelques initiatives et des déclarations d'intention, un tour d'horizons permet de se rendre compte que les efforts les plus importants sont actuellement déployés pour le passage des décharges sauvages à des décharges contrôlées. Les initiatives de valorisation «matière» et énergétique sont ponctuelles.

La voie unique de mise en décharge contrôlée n'est pas une option durable

Pour sortir de la situation actuelle de mise en décharge sauvage qui domine au Maroc et dans les pays en développement de manière générale, la mise en décharge contrôlée demeure manifestement et relativement une bonne alternative. Toutefois, cette option est loin d'être écologiquement durable et particulièrement dans nos pays où les déchets sont plus humides et plus riches en matière organique fermentescible que dans les pays industrialisés (Figure 1) et génèrent de grands volumes de lixiviats et des émissions quantitativement importantes de méthane. Les risques d'incendies qui peuvent survenir dans les décharges représentent aussi un grand impact environnemental.

Il est évident que les impacts des ces émissions liquides et gazeux peuvent être significativement anéantis (isolation hydrogéologique partielle ou totale, planification du placement et de la couverture des déchets, réseaux de récupération des biogaz et des lixiviats etc.) mais les coûts des aménagements et d'exploitation requis sont très élevés.

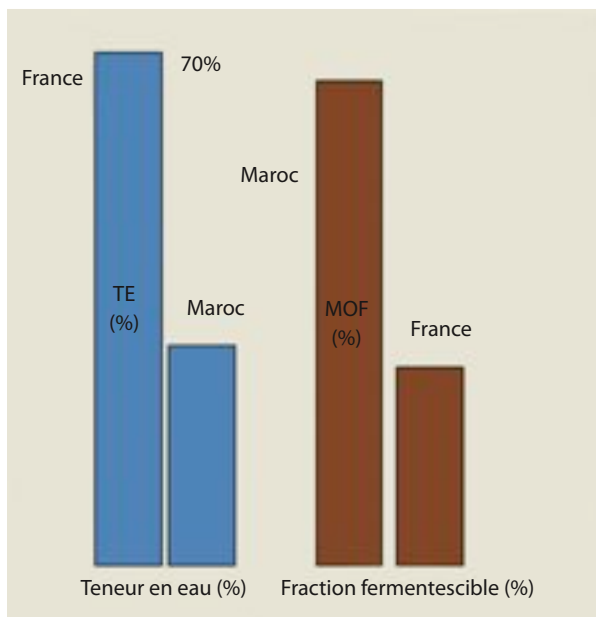


Figure 1. Illustration des différences des caractéristiques fondamentales : Teneur en eau (TE) et Matière organique fermentescible (MOF) des déchets au Maroc et dans des pays industrialisés (cas de la France)

L'incinération est une option écartée

En dehors du coût de l'option d'incinération, cette option ne peut être adoptée étant donnée le faible pouvoir calorifique des déchets conditionné par les valeurs élevées d'humidité (Figure 2).

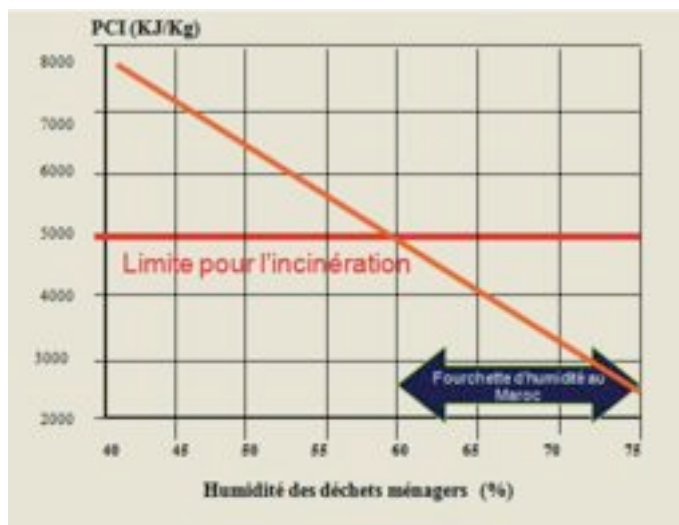


Figure 2. Pouvoir calorifique inférieur (PCI) en fonction de l'humidité des déchets.

Lorsqu'on met les déchets organiques dans une décharge, les matières biodégradables sont biochimiquement converties en méthane au lieu du CO₂, produit ultime de la biodégradation des matières organiques en compostage aérobie. Il est connu que le méthane (CH₄) a un effet en tant que gaz à effet de serre (GES) 21 fois supérieur à celui du CO₂.

La mise en décharge présente plusieurs autres handicaps rarement pris en compte. L'un des plus cruciaux est le foncier qui se décline en plusieurs contraintes dont les plus importantes sont : la difficulté de trouver un site adéquat qui répond aux critères environnementaux et qui se situe à une distance économiquement justifiable, la durée de vie de la décharge peut être aussi relativement faible ce qui complique davantage la première contrainte, la disponibilité de terrain et son coût qui peut être assez élevé, le statut foncier qui présente encore au Maroc un handicap majeur pour le développement de tous les secteurs économiques.

Tirons les leçons des autres pays avec adaptation au contexte

Il est temps de penser à l'instauration de la gestion intégrée et durable des déchets solides (GIDDS) qui se base sur une approche intégrant les dimensions environnementale, technique, sociale, socio - culturelle, politico - légale, économique et institutionnelle et impliquant, à tous les niveaux de la filière, les acteurs et les institutions directement ou indirectement concernés. Cette approche s'aligne parfaitement avec les fondements de la Charte Nationale de l'Environnement et de Développement Durable lancée par sa Majesté le Roi Mohamed VI et qui est en cours d'être érigé en Loi cadre de l'environnement et de développement durable.

Acôté de ce concept de GIDDS, un concept parallèle assez adopté dans des pays développés réside dans la Gestion du Cycle de la Vie de la matière (Life Cycle Management). En se basant sur une hiérarchisation des modes de gestion des déchets, ce concept favorise l'approche de prévention et de réduction des déchets à la source ainsi que les options de recyclage, de réutilisation et de valorisation (Figure 3).

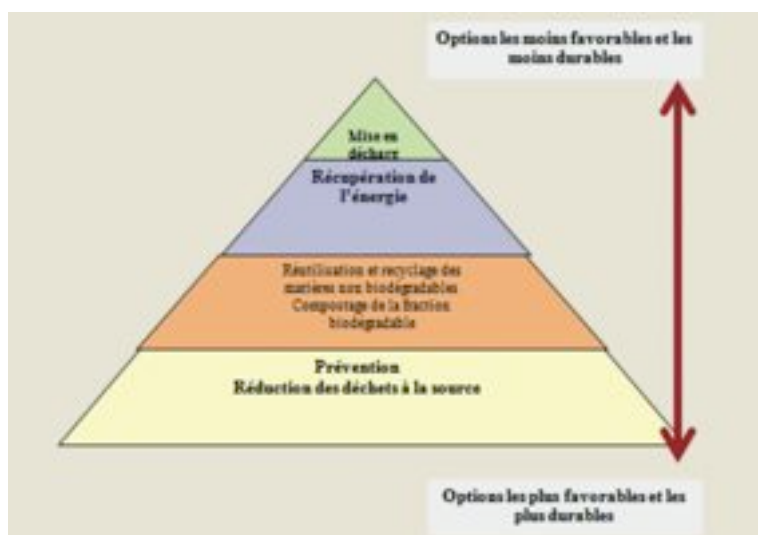


Figure 3. Le triangle des options de gestion des déchets : des options défavorables aux options favorables de réutilisation, valorisation et de recyclage.

Aussi bien en Europe qu'aux États-Unis d'Amérique, la filière dominante de gestion des déchets consiste en la mise en décharge contrôlée. Pour changer cette tendance, la Directive Européenne 999/31/CE relative à la mise des déchets en décharge contrôlée a mis progressivement en place des limites pour la proportion de la fraction organique des matières destinées à la décharge et a stipulé une interdiction formelle de mise en décharge de certaines catégories de déchets. Cette directive a fixé les objectifs suivants :

- en 2006 : Réduction de la fraction biodégradable des déchets destinés à la décharge à raison de 75%;
- en 2009 : Réduction de 50% sur base de la quantité produite en 1995;
- en 2016 : Réduction de cette fraction à 35% sur base de la quantité produite en 1995.

L'élément moteur de cette restriction de la législation est la volonté d'éviter les dommages environnementaux causés par les substances de décomposition (gaz des décharges y compris le méthane et les lixiviats).

D'autres pays ont instauré des limites plus sévères en imposant des taxes supplémentaires pour la mise en décharge notamment des matières putrescibles et en mettant en place des mesures incitatives des techniques de récupération de déchets. Les interdictions sont plus prononcées en Allemagne, au Danemark, aux Pays-Bas, en Suède et en Suisse.

Les réglementations relatives à la mise en décharge des déchets aux USA ont tendance à converger vers la Directive Européenne de 1999. En effet, on note une diminution progressive de la mise en décharge avec 67% en 1990 et 55% en 2000 (EPA, 2002a) et une réglementation de plus en plus stricte en matière d'émissions atmosphériques et de contamination des nappes phréatiques.

On peut déduire que l'adoption du concept GIDDS est en bonne voie de développement dans les pays à économie avancée.

En Afrique du Sud, le plan national de gestion des déchets municipaux, élaboré par le Département des affaires environnementales et touristiques, vise «zéro» déchet dans les décharges en 2022. Il s'agit encore ici d'un défi plus ambitieux.

Alors, si on a accumulé une trentaine d'années de retard par rapport aux pays d'Europe en matière de gestion de déchets, ne mettons pas tout le paquet sur une seule option et réaliser trente années après que nous sommes encore en retard.

Le développement durable incite à considérer les externalités dans la comparaison des coûts des options de gestion

Actuellement, les recommandations des instances internationales et nationales en matière de développement durable et de protection de l'environnement, et les restrictions réglementaires qui en résultent, imposent des options de gestion qui versent vers une logique de minimisation de la production des déchets, *une minimisation de la mise en décharge des déchets organiques biodégradables et vers le recyclage et le traitement biologique aérobique (compostage) et anaérobique (production de biogaz)*. Toutefois, ces options occasionnent manifestement des coûts internes additionnels.

Il est clair que l'analyse des coûts internes (investissement et fonctionnement) des options de gestion des déchets solides municipaux fassent ressortir que la mise en décharge se démarque en tant qu'option globalement la moins coûteuse.

Toutefois, ces coûts n'intègrent pas les externalités qui se traduisent par des impacts positifs et négatifs générés par les différentes alternatives. On retrouve ici la toile de fond de la définition d'un développement durable qui place la notion de durabilité en intersection entre les sphères sociale, économique et environnementale.

Ainsi, il est nécessaire pour une évaluation globale des coûts de tenir compte des coûts environnementaux et sociaux. Toutefois, une question demeure posée et mérite un débat, des mécanismes et des issues : Qui prendra en charge les coûts externes?

L'option de compostage est une option écologiquement durable alignée au concept d'économie circulaire

Le Maroc est appelé d'adhérer à la tendance internationale de minimisation des déchets organiques dans les décharges d'une part, et d'autre part, de promotion des options de recyclage, de compostage et dévalorisation énergétique. Ce choix est inéluctable dans le souci de protection de l'environnement et la valorisation de la matière par le biais de sa réinsertion dans le cycle de vie des produits souvent «interrompu» comme il est illustré par la figure 4.

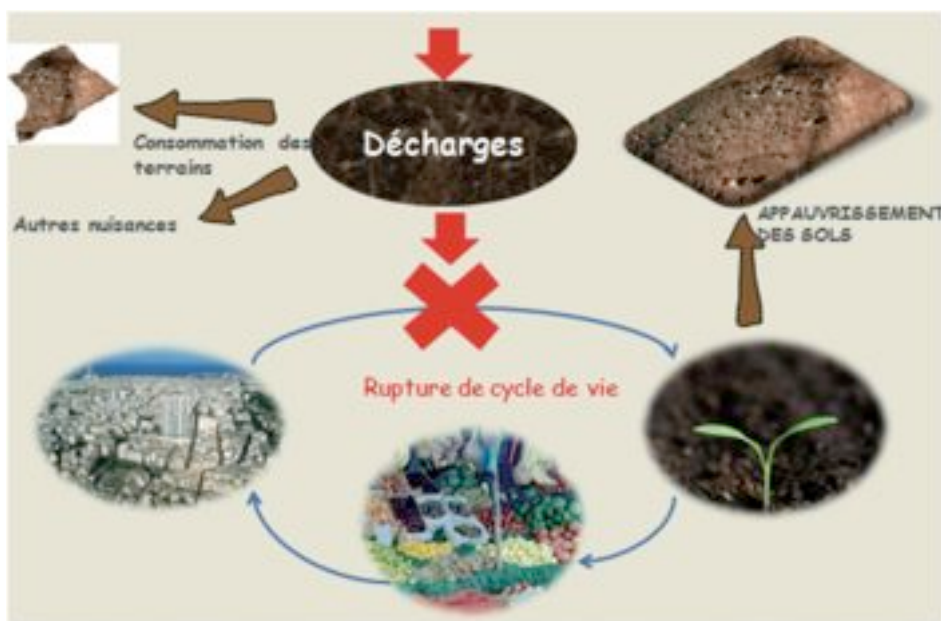


Figure 4. Rupture du cycle de vie de la matière organique et ses conséquences.

Le compostage permet de valoriser la fraction organique (soit près de 4 millions de tonnes sur un peu plus de 6 millions de tonnes de matière organique dans le gisement actuel de déchets ménagers) pour améliorer la qualité de nos sols en appauvrissement continu. Le compost, résultant du processus de compostage ou de fermentation aérobie (Figure 5) est dotée d'une valeur organique qui améliore les propriétés physiques et physico-chimiques

du sol et une valeur minérale qui consiste à la fourniture progressive des éléments nutritifs par voie de minéralisation aux plantes cultivées et aux végétaux de manière générale.

Rappelons aussi que le compostage est à la fois une option de valorisation et une voie d'élimination; En effet, le processus biochimique de biodégradations de la matière organique se solde, en fin du processus, par la perte de près de 40% du tonnage initial.

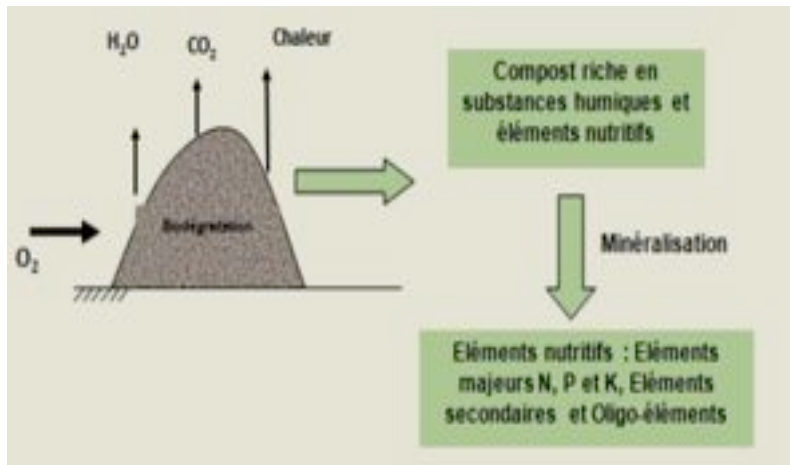


Figure 5. Principe simplifié de compostage.

Au Maroc, ces options se justifient davantage par la composition des déchets (riches en matière organique et très humides) et des besoins en amendement organique des sols notamment dégradés. Aussi, comme il a été mentionné auparavant, le recyclage est une option en développement mais mérite d'être réglementée, normalisée et organisée.

Il est recommandé de ventiler les options de gestion des déchets à moyen et à long terme au Maroc en adoptant une réduction progressive de la fraction organique mise en décharge à raison d'une proportion annuelle à déterminer (? 10%) dans les petites et moyennes communes et d'une autre proportion (x%, 5%) dans les grandes agglomérations. Et ce, en renforçant, selon le contexte, les options de recyclage, de compostage et de production de biogaz. Ces options peuvent être combinées à des proportions variables selon le contexte géographique et socio-économique de la localité. Il est clair que l'option de mise en place des décharges contrôlées continuera, en intégrant les projections de réduction des déchets organiques et recyclables dans le dimensionnement.

Quelques lacunes à combler pour passer à l'opérationnalisation

Parmi les actions d'opérationnalisation, il y a lieu de lister en priorité l'achèvement du cadre réglementaire et de normalisation des déchets (normes d'élimination et traitement et normes de qualité des produits issus de recyclage et/ou de valorisation des déchets (compost, produits de recyclage, boues de stations d'épuration compostées ou séchées etc.), l'introduction de mécanismes efficaces de recouvrement de coûts, la mise en place des décrets réglementaires pour clarifier les rôles et les responsabilisations institutionnelles, et l'élaboration de certaines directives relatives aux boues des stations d'épuration qui vont connaître une accumulation importante suite au programme de grande envergure d'assainissement (Programme National d'Assignement Liquide).

Plusieurs questions se posent à ce niveau :

- Est-ce que les boues sont acceptées dans la décharge (pour une mise en décharge baptisée décharge mixte)?
- A quelle siccité (Teneur en matière sèche) les boues des stations d'épuration seront acceptées dans une décharge municipale?
- Quelle est la proportion des boues par rapport aux DSM dans la décharge dite mixte?
- Quel mécanisme de coordination entre les producteurs de boues (ONEP, régies et concessionnaires) et les municipalités en ce qui concerne l'élimination des boues?
- Peut-on considérer les boues comme déchets solides une fois séchées ou déshydratées jusqu'à 30% de matière sèche?
- Si oui, il s'agira d'un tonnage très important à prévoir pour les années à venir dans le dimensionnement des décharges contrôlées qui peuvent accueillir aussi bien les DSM que les boues.

Des mesures d'accompagnement des recommandations

Un certain nombre d'actions préalables et de mesures d'accompagnement sont nécessaires pour assurer la durabilité de la gestion des déchets solides municipaux dont les plus importants sont : (i) l'information et la sensibilisation des citoyens pour contribuer à l'efficacité des opérations de collecte et de nettoyage, (ii) l'information, la formation et la sensibilisation des élus, (iii) le renforcement de la formation des agents, techniciens et cadres chargés de la gestion des déchets dans les domaines de gestion des déchets (collecte nettoyage, exploitation des décharges, etc.) et de suivi et de contrôle de la gestion déléguée, et (iv) la finalisation de la loi 28-00 par des textes par des dispositions spécifiques concernant les options de tri, de recyclage et de compostage et les normes de recyclage et de qualité des sous-produits de recyclage et de compostage.

Aussi, il est devenu nécessaire d'identifier et d'évaluer des mécanismes et créneaux permettant d'assurer l'inclusion sociale des récupérateurs informels suite à la fermeture des décharges. À ce propos, il semble que des actions sont en cours d'initiation par le Ministère de l'Intérieur et des bailleurs de fond.

L'organisation du recyclage est inéluctablement une action à grande valeur ajoutée sur le plan social et économique. Une étude complète réalisée par le groupement ADS Maroc-EDIC (2005) a diagnostiqué le secteur de recyclage au Maroc et a évalué près de 400 Millions de Dirhams le potentiel annuel de recyclage au Maroc.

Il est aussi urgent de faire un bilan des opportunités MDP pour évaluer, identifier les contraintes et les potentialités.

Sur le plan stratégique, il est recommandé de privilégier les politiques qui convergent vers la promotion du principe des 3R (Réduire, Recycler, Réutiliser).

Un triplet de messages, valables pour d'autres domaines, versent dans l'appel à la capitalisation des acquis et le benchmark. Pour le faire, l'effort est minime et très peu coûteux mais on le fait pas, on tente de réinventer la roue ! Il est important de promouvoir le partage des expériences entre les communes dans des ateliers et dans des portails électroniques et disséminer les supports qui documentent les projets de gestion des déchets et des services publics de manière générale.

VALORISATION DES DÉCHETS URBAINS: CAS DE LA TECHNOLOGIE BIOGAZ

Pr. Hassan EL BARI

Université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc

***Président de l'Association
Marocaine des Déchets Solides***



Résumé

Au Maroc, la fraction organique des déchets urbains constitue une part importante de la totalité des déchets solides générés annuellement. Ainsi au niveau des ordures ménagères, elle représente plus de 65% avec un taux d'humidité de 70%, soit une quantité de plus de 4 millions de tonnes par an.

Etant donné cette composition et ce taux d'humidité, il apparaît évident que l'incinération des déchets, qui nécessite un apport d'énergie considérable dans le cas d'une combustion propre, n'est pas une option appropriée pour le cas du Maroc. En outre, la mise en décharge n'est pas une option convenable puisque la forte proportion des déchets biodégradables (déchets organiques), engendre un lixiviat (polluant potentiel des ressources en eau) qui est difficile à gérer. Aussi La mise en décharge entraîne une émission considérable du méthane qui est un gaz à effet de serre.

Vue la composition des déchets solides du Maroc, il est donc impératif de focaliser les efforts sur la proportion organique biodégradable. Sachant qu'une tonne de déchets organiques peut générer jusqu'au 300m³ de biogaz dont 50 à 60% est constitué de méthane, il est logique de s'intéresser à la valorisation énergétique de ces déchets, à l'aide de la digestion anaérobie, en exploitant le méthane généré qui peut être utilisé pour générer de l'électricité ou de la chaleur. En plus, le résidu stable engendré peut être utilisé comme un compost pour la fertilisation agricole.

En effet, dans les pays relativement chauds comme le Maroc, il est facile d'appliquer la technologie de digestion anaérobie ou méthanisation pour récupérer le biogaz méthane et l'utiliser comme source d'énergie renouvelable puisque cela ne nécessite pas un apport d'énergie considérable pour sa maintenance. Cette opération permet aussi de

réduire la facture énergétique qui devient de plus en plus importante avec l'augmentation spectaculaire du prix du baril de pétrole.

En outre, cette technologie peut contribuer efficacement à la réduction de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (le méthane est 21 fois plus absorbant de radiation que le dioxyde de carbone). En plus de l'impact global, ce biogaz a aussi un impact néfaste à l'échelle locale : le méthane peut causer des incendies ou des explosions si sa concentration en volume dans l'air dépasse 5% (limite inférieure d'explosion), aussi il peut détériorer la végétation.

Dans cette conférence on présentera l'essentiel de la technologie du biogaz avec un état de l'art de la recherche & développement dans ce secteur. En particulier, on s'intéressera aux nouvelles techniques de co-digestion anaérobie de la fraction organique des déchets ménagers avec d'autres résidus organiques comme les déchets agricoles, industriels et les boues des stations d'épuration avec une approche territoriale qui permettra une optimisation du transport de ces déchets organiques.

Au Maroc, la fraction organique des déchets urbains constitue une part importante de la totalité des déchets solides générés annuellement. Ainsi au niveau des ordures ménagères, elle représente plus de 65% avec un taux d'humidité de 70%, soit une quantité de plus de 4 millions de tonnes par an.

Etant donné cette composition et ce taux d'humidité, il apparaît évident que l'incinération des déchets, qui nécessite un apport d'énergie considérable dans le cas d'une combustion propre, n'est pas une option appropriée pour le cas du Maroc. En outre, la mise en décharge n'est pas une option convenable puisque la forte proportion des déchets biodégradables (déchets organiques), engendre un lixiviat (polluant potentiel des ressources en eau) qui est difficile à gérer. Aussi la mise en décharge entraîne une émission considérable du méthane qui est un gaz à effet de serre.

Vue la composition des déchets solides du Maroc, il est donc impératif de focaliser les efforts sur la proportion organique biodégradable. Sachant qu'une tonne de déchets organiques peut générer jusqu'à 300m³ de biogaz dont 50 à 60% est constitué de méthane, il est logique de s'intéresser à la valorisation énergétique de ces déchets, à l'aide de la digestion anaérobie, en exploitant le méthane généré qui peut être utilisé pour générer de l'électricité ou de la chaleur. En plus, le résidu stable engendré peut être utilisé comme un compost pour la fertilisation agricole.

En effet, dans les pays relativement chauds comme le Maroc, il est facile d'appliquer la technologie de digestion anaérobie ou méthanisation pour récupérer le biogaz méthane et l'utiliser comme source d'énergie renouvelable puisque cela ne nécessite pas un apport d'énergie considérable pour sa maintenance. Cette opération permet aussi de réduire la facture énergétique qui devient de plus en plus importante avec l'augmentation spectaculaire du prix du baril de pétrole.

En outre, cette technologie peut contribuer efficacement à la réduction de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (le méthane est 21 fois plus absorbant de radiation que le dioxyde de carbone). En plus de l'impact global, ce biogaz a aussi un impact néfaste à l'échelle locale : le méthane peut causer des incendies ou des explosions si sa concentration en volume dans l'air dépasse 5% (limite inférieure d'explosion), aussi il peut détériorer la végétation.

Dans cette conférence on présentera l'essentiel de la technologie du biogaz avec un état de l'art de la recherche & développement dans ce secteur. En particulier, on s'intéressera aux nouvelles techniques de co-digestion anaérobie de la fraction organique des déchets ménagers avec d'autres résidus organiques comme les déchets agricoles, industriels et les boues des stations d'épuration avec une approche territoriale qui permettra une optimisation du transport de ces déchets organiques.

INTRODUCTION

In Morocco, organic waste is an important part of all solid waste generated annually. Thus, in the field of municipal waste, organic waste accounts for over 60%, with a humidity level of 70% and a total of 4 million tons annually.

Considering the composition of solid waste in Morocco, it seems appropriate to focus efforts on its biodegradable organic fraction. The disposal landfill as a method of dealing with the organic fraction is not sustainable. In fact, the biodegradable waste becomes an important source of greenhouse gas emissions when deposited in landfill without stabilization. The best practice of dealing with the organic waste are the composting and the anaerobic digestion (AD). The AD method is set to become increasingly important as it is considered as an energy positive process since it produces more energy that it requires.

The biogas sector has never before aroused so much attention as it does today. Biogas production has the advantage of reconciling two European Union policies. Firstly it falls in line with the main objective of the Renewable Energy Directive (2009/28/CE) that is aiming for a 20% renewable energy share in gross final energy consumption by 2020.

It also meets the European organic waste management objectives (Directive 1999/31/CE on the landfill of waste that require Member States to reduce the amount of biodegradable waste disposed of in landfills and to implement laws encouraging waste recycling and recovery (Directive 2008/98/EC on waste) [Euroobserver – Biogas Barometer].

Solid Waste Management in Morocco

- * 6.6 million ton year
- * 0.7kg/day (urban) and 0.5 en rural area
- * MSW generation growth :2%
- * MSW collection average : 72 to 100%
- * MSW final destination : (1% composted - 10% recycled - 30% to 53 controled landfilled - 60% open dumped)

Anaerobic Digestion Technology

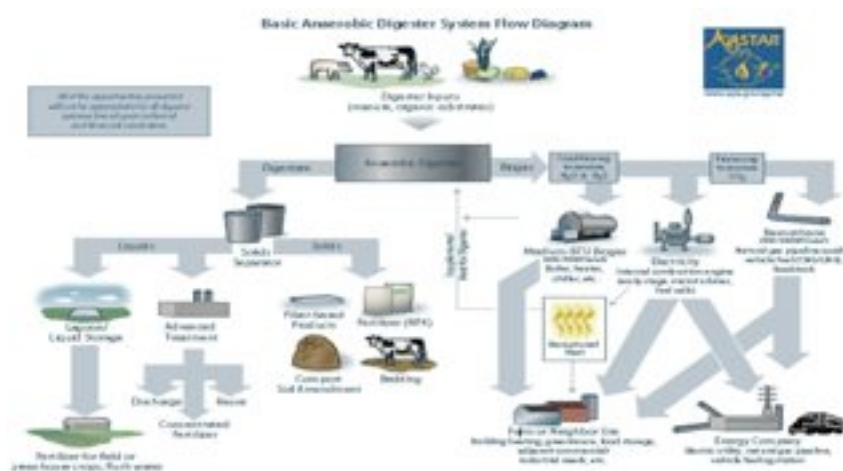
Digestion is an energy producing process

- Up to 75% conversion of substrate into biogas
- Biogas has a methane content of 50-60% (but depends on substrate)
- Biogas typically has a thermal value of about 22 MJ m-3



Source : Charles Banks University of Southampton

Basic Anaerobic Digester System Flow Diagram



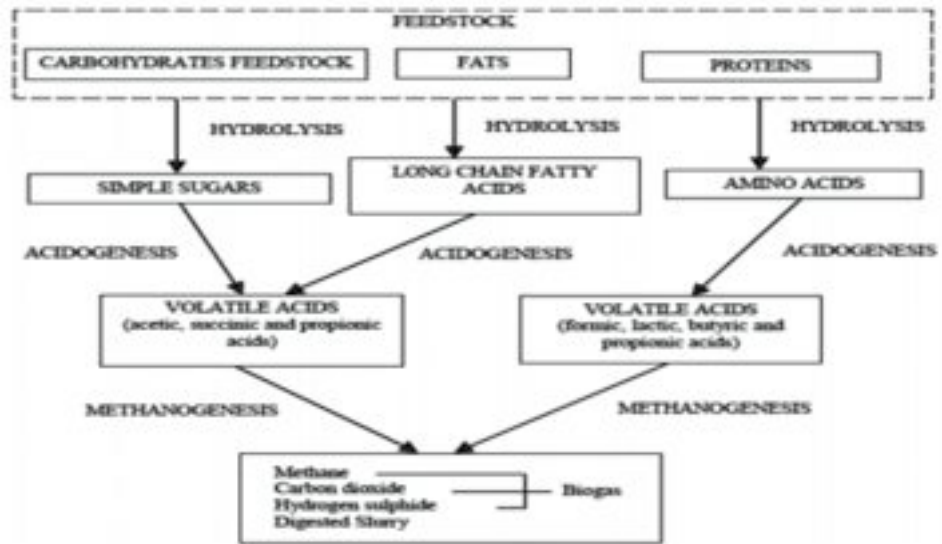
AD of Organic Fraction of Municipal Solid Waste

Source : Hinrich Hartmann, Technical University of Denmark , 2002



Anaerobic Digestion Process and Technology

Source : Krich and al, USDA Rural Development Report, 2005.



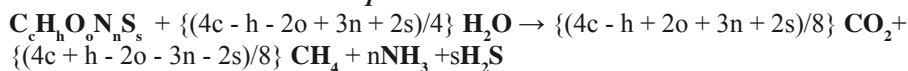
Biogas production Calculations

- The volume of biogas produced depends on substrate composition of the used in biogas.
- The main substrate composition are : Fats, Protein and Carbohydrates (Fats/ lipids generate more biogas than carbohydrates).
- Also the concentration of methane in the produced biogas will be dependent on the composition of the substrate.

Some definitions

Source : TE0009, TN0307, TN 0280 Nov 2010

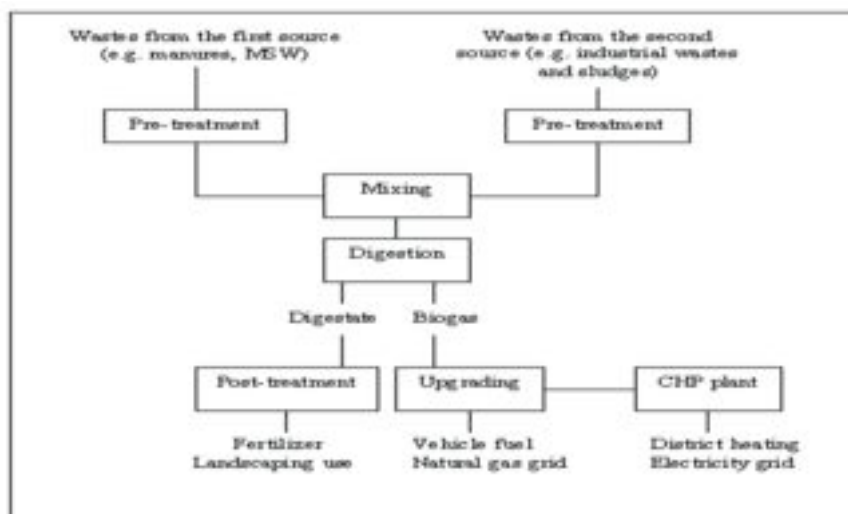
- TS = Total solids: % of substrate wet weight
- VS = Volatile solids (same as organic matter, OM): % of TS or % of substrate wet weight
- OLR = Organic Loading Rate: kg VS/m³r/d i.e. kg VS/m³ digester volume/d (the daily mass of organic matter applied to a given digester volume).
- Typical values: 3-6 kg VS/m³/d.
- HRT_i = Hydraulic Retention Time: d (theoretical average residence time of a liquid volume in a digester). $HRT_i = V/Q_i$, where V = active digester volume (m³) and Q_i = volume flow into the digester (m³/d).
- Typical values: 20-50 d.
- Biogas yield = nm³ biogas/kg VS in substrate or nm³ biogas/kg wet weight.
- NH₄-N (ammonia-nitrogen).
- Should be below 3 g/L.
- Net-mineralisation of nitrogen = The proportion (%) of the organic nitrogen in the substrate, which has mineralized to ammonia-nitrogen during anaerobic digestion.

Theoretical calculations : Buswell Equation

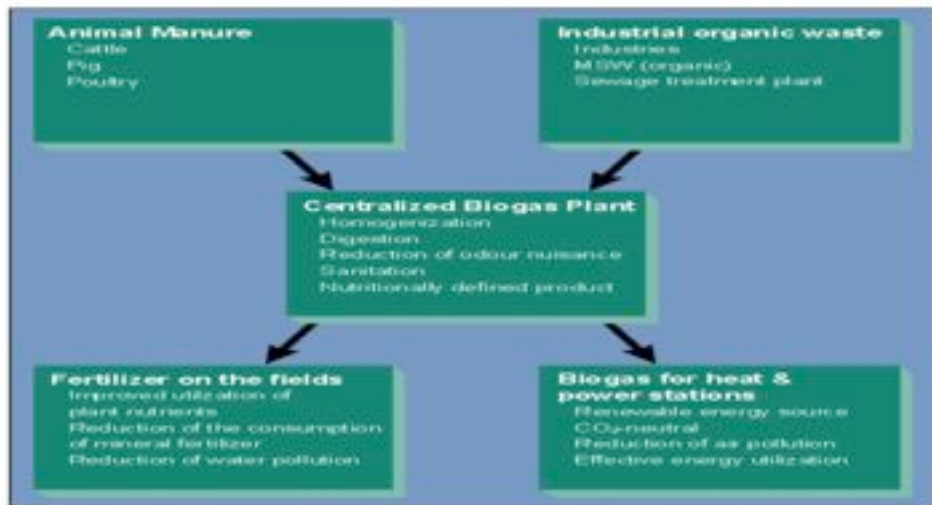
SUBSTRATE Component	Biogas (nm ³ /kg)*	Methane (%)
Fat/Lipid (C57H104O6)	1.4	70
Protein (C5H7O2N)	1.0	50
Carbohydrate (C6H12O6)	0.8	50

Table 1 : Biogas Yield for substrate component

Wet weight	1000 kg
TS(total solids)	33 % of wet weight
VS(volatile solids)	90% of TS
Fat/Lipid	19% of VS
Protein	20% of VS
Carbohydrate	61% of VS

Table 2 : OFSWM composition (Source : www.bt.slu.se)**Biogas Production from Co-digestion****Figure 1.** General process for an AD codigestion plant.**Centralised Biogas Plant integrated concept**

Source : Bioenergy Department-University of Southern Denmark -2000



The centralised anaerobic co-digestion plant concept

(Source : PROBIOGAS Project-2007)

- 1- In the model CAD plant, the biomass is pasteurized and processed in digesting tanks for 15 days. During this period the biogas emerges and is collected.
- 2- After the digester, the digested manure is returned to storage tanks situated at the farms or near the fields where it is to be used as a fertiliser.
- 3- The biogas is converted into heat and electricity in a combined heat and power producing facility.
- 4- Electricity is sold to the grid, and heat is used to provide process heat and the surplus sold for heating purposes in housing or industry.

The CAD advantages

- 5- Centralised co-digestion is seen as a multifunctional technology as it serves interests in the fields of energy, agriculture and environment.
- 6- The energy production is used to substitute fossil fuels and thereby increases security of energy supplies, and reduces dependence on imported fossil fuels.
- 7- The fertiliser value of the feedstock is improved by the anaerobic digestion process.
- 8- Implementation of CAD plants will also lead to creation of new local jobs and assist in maintaining rural economies.
- 9- The central location of the biogas plant aims to reduce costs, time and manpower for the transport of biomass to and from the biogas plant.

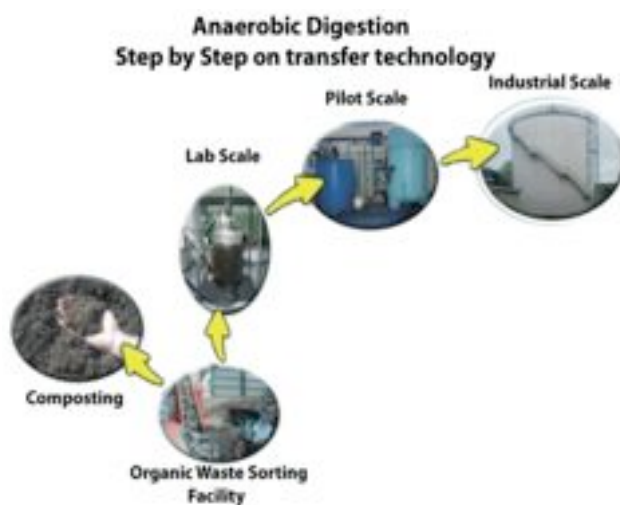
Biogas Moroccan Situation

Wastewater Plant	YES	Marrakech, Fes...
Industrial Scale Digester	YES	Agro-Industry
OFSMW Digester	NO	
University Lab Scale Digester	YES	Univ Oujda and Univ Kenitra
Solid Waste NGO	YES	AMADES-Morocco
Biogas Network	National & Mediteranean	Since 2010
Co-Digestion Plant	NO	

LAB SCALE DIGESTER IN IBN TOFAIL UNIVERSITY LAB



How to success the anaerobic digestion technology transfer in Morocco : Step by Step Approach From Lab Scale to Industrial Scale



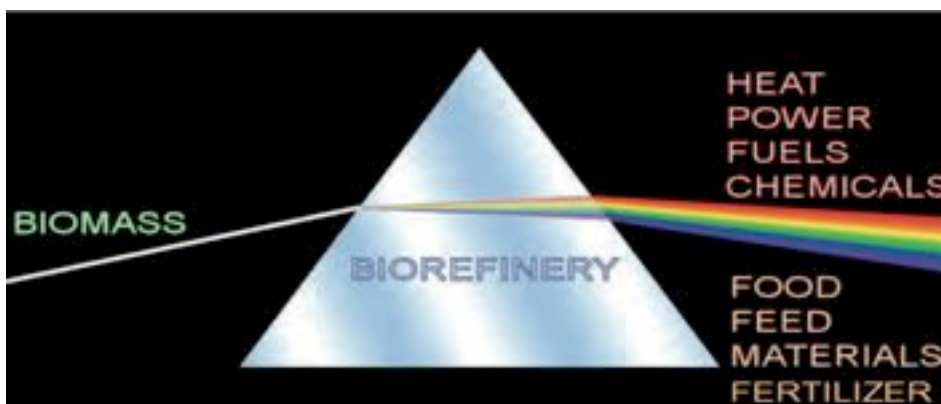
Biogas Research Team of Ibn Tofail University & AMADES-Morocco

Project Title	Context	Partners	Budget	Period
Strengthening the “Laboratory of Biotechnology, Environment and Quality”, in the treatment of organic waste recovery	Morocco-Spain Research Cooperation	University of Cordoba (Spain)	300 000 Euros	2010 - 2013
Turning biowaste into sustainable products: development of appropriate conversion technologies applicable in developing countries	BIOWASTE 4SP FP 7 – Euroean Project	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 16 project partners in 10 countries from Europe, Asia, Africa ▪ 5 African countries (Morocco, Egypt, Kenya, Ghana, S.Africa) 	3 000 000 Euros	2012 - 2015
Possibilities of implementing Biogas Producing Technology in Morocco	Morocco-Germany Research Cooperation	ISWA- Stuttgart University – Germany	---	2013 - 2015

Bio-refinery

Definition of bio-refinery (BIOWASTE4SP project)

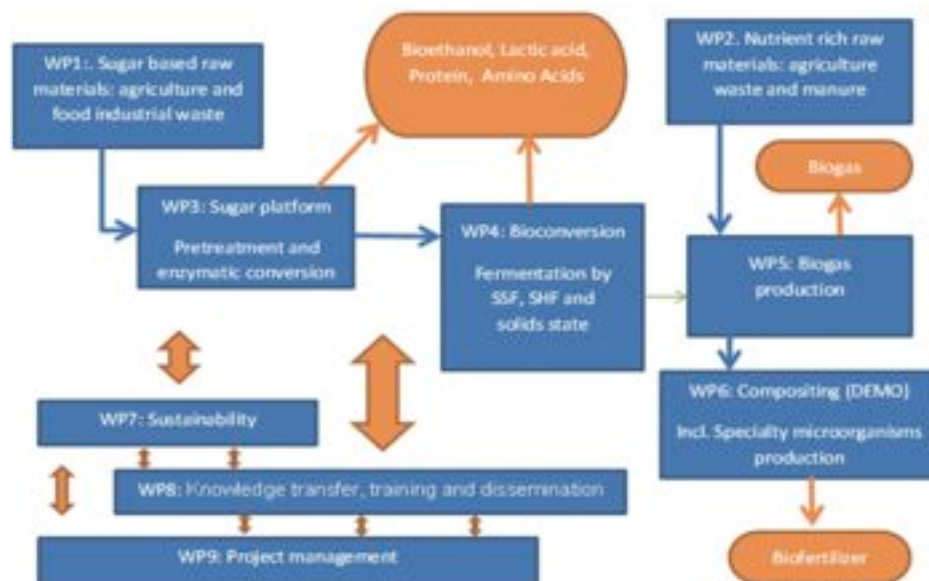
Integrated and combined processes for the conversion of biomass into a variety of food, feed, chemicals, biomaterials, and energy – at the same time maximizing the value of the biomass and minimizing the waste



Biowaste recovery output

Source : BIOWASTE4SP Project (www.biowaste4sp.eu)

Biowaste4SP project – Organization : 9 Workpackages



Relations between project workpackages Source : BIOWASTE4SP Project (www.biowaste4sp.eu)

Development of processes for whole crop biowaste biorefinery (WP3, 4, 5 and 6)

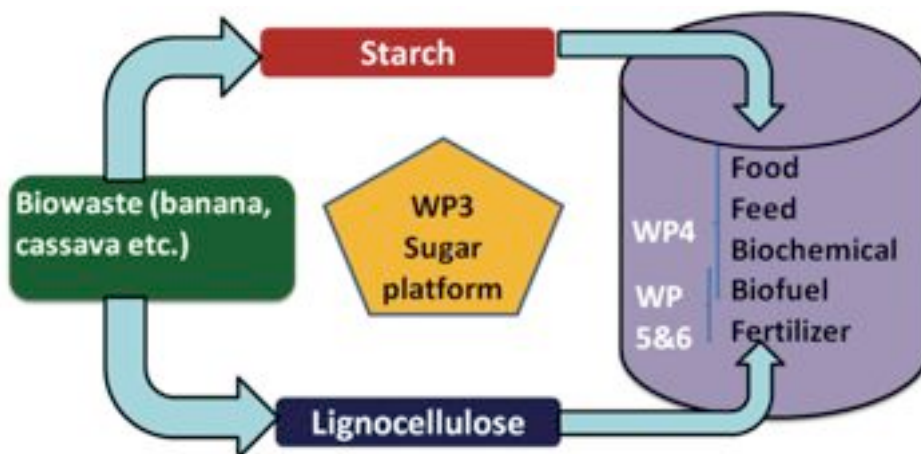


Figure : Sustainable products as output of biowaste recovery
Source : BIOWASTE4SP Project (www.biowaste4sp.eu)

Moroccan Network on Biomass and Biogas Energy

In Morocco we have identified the following findings:

- The production of biogas and its energy value is still very low compared favorite vastness of the field of biomass in Morocco.
- Studies by Moroccan researchers in this field are not sufficiently developed.
- Biogas technology is not yet a priority in the national strategy for renewable energy development. A considerable effort in terms of communication is needed.
- Need to develop appropriate prototypes adapted to the socio-economic realities of the country

CONCLUSION

- In terms of social acceptance anaerobic digestion generally has a good reputation. This is due to the successful application in many sectors all over the world.
- In developing countries AD is predominantly applied in rural areas (slurry based dung digesters), where biogas has several benefits :
- Biogas is a renewable energy source that can also be produced on household level.
- Biogas reduces deforestation in many rural areas by replacing firewood (at least partly).
- Biogas improves living conditions for rural poor, mainly for women responsible for cooking and fire wood collection. Biogas generates less air pollution by the combustion instead of wood or animal dung. By the usage of biogas less firewood needs to be collected, hence time is saved.
- Digested material is a nutrient rich fertilizer and willingly applied by farmers.

RAPPORT D'ACTIVITÉ
2012 - 2013

RAPPORT D'ACTIVITÉS 2012-2013

Pr. Omar FASSI-FEHRI

*Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*



Introduction

*Au cours de l'année 2012-2013, l'Académie a poursuivi la mise en œuvre de son plan d'action en réalisant ses différentes missions que lui confère le Dahir de sa création, et en tendant vers son objectif qui lui a été défini par Sa Majesté le Roi Mohammed VI – que Dieu Le Glorifie – le 18 mai 2006 «**Servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale**».*

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

2

Principales missions de l'Académie



I- Promotion et développement de la recherche scientifique et technologique et financement des programmes de recherche

En matière de promotion et de développement de la recherche scientifique et technique, l'Académie a pour mission de: donner à la science et à la recherche scientifique et technique une place majeure dans l'échelle des valeurs nationales; proposer aux autorités concernées les voies et les moyens capables de développer l'esprit scientifique au sein de la société marocaine; Offrir aux chercheurs scientifiques nationaux une tribune scientifique particulière d'expression et de communication; assurer une communication de haut niveau entre la communauté scientifique nationale et l'élite scientifique mondiale...» (Loi, Art. 2)

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

4

Activité I.1 : Préparation de la session plénière solennelle 2013

- Sessions ordinaires
- Commission des travaux
- Collèges scientifiques
- Thème général de la session :
«La physique aujourd'hui et ses applications»

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

5

Retombées de l'ensemble des projets de recherche financés dans le cadre de l'appel d'offres 2007-2008

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences	Brevet	7 Distinctions/ Prix
288	08	Docteurs	92	63	63	Docteurs et associés aux projets	88	112 Internationales	63 Manifestations scientifiques
		Élèves ingénieurs	86			Associés aux projets	177	34 Nationales	23 Collaborations internationales
		Master	62						Construction d'une station de traitement
		Licence	22						5 Financement de nouveaux projets
		Total	176			Total	263	148	

Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2012 - Rapport d'activité

6

Activité 1.2 : Financement des projets retenus dans le cadre de l'appel d'offres 2010-2011

Projet	Partenaires	2011	2012	2013	2014
1- Valorisation et gestion intégrée des ressources en eau	UW	800 000,00	791 800	812600	595400
2- Caractéristiques génétiques et multiplication-microbouturage	U. Ibn Zohr - Cadi Ayad	219 781,00	729 689	960009	479943
3- Combustion des schistes bitumineux en lit fluidisé	U. Cadi Ayad	680 700,00	654500	222500	51000
4- Contribution au Développement Réalisation cellules photovoltaïques	U. Ibn Tofail	731 000,00	771000	851000	431000
4-Contribution Développement Réalisation cellules photovoltaïques	U. Hassan II - Mohammadia	51 000,00	51000	51000	51000
5- Extraction par solvant de la matière organique des schistes bitumineux	U. Hassan II - Mohammadia	400 000,00	410000	248000	442500
5- Extraction par solvant de la matière organique des schistes bitumineux	U. Moham. V - Agdal	400 000,00	369000	554000	157500
6- Études épidémiologiques	U. Hassan II - Casablanca	734 500,00	263500	60000	0
7- Modélisation et simulation pour cancer	U. Cadi Ayad	525 500,00	577500	396500	0
8- Changements globaux	U. Cadi Ayad	800 000,00	527950	569650	395900
9- Patrimoine géologique des provinces sahariennes	U. Cadi Ayad	77 600,00	72600	60100	15000
9- Patrimoine géologique des provinces sahariennes	U. Ibn Zohr	87 600,00	72600	95100	15000
9- Patrimoine géologique des provinces sahariennes	U. Hassan II - Casablanca	503 500,00	480400	170700	89800
10- Approximation et sous espaces invariants	U. Moham. V - Agdal	59 900,00	402000	424000	448000
11- Industrialisation et Développement	U. Moham. V - Agdal	448 500,00	427000	372000	334500
12- Syssoirfat	U. Cadi Ayad	776 000,00	1001000	800000	328000
12- Syssoirfat	U. Hassan II - Casablanca	24 000,00	39000	20000	12000
13- Recherche pluridisciplinaire sur les géomatériaux	U. Moham. V - Agdal	414 600,00	414800	266000	211000
13- Recherche pluridisciplinaire sur les géomatériaux	U. Hassan II - Casablanca	236 000,00	236000	140000	108900
13- Recherche pluridisciplinaire sur les géomatériaux	U. Hassan II - Mohammadia	149 400,00	149400	94000	80100
Totaux		9 188 679,00	8468219,00	6930158	4248543
Total général sur 4 ans		27 825 598,90 DH			

Etat consolidé des livrables attendus

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	229	56	30	11	326
Chercheurs/Médecins	162				162
Postdoctorants	3	2	2		7
Etudiants en doctorat	27	23	3		53
Etudiants en Master	21	15	14	7	57
Élève-Ingénieurs	3	3	3	3	12
Etudiants en Licence	8	9	7	1	25
Autres (technicien, assistant de recherche, etc.)	5	4	1		10
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues scientifiques internationales avec comité de lecture	11	26	36	29	102
Publications dans des revues scientifiques nationales avec comité de lecture			2	2	4
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques	3	3	5	6	17
Publications dans des Proceedings	4	15	18	8	45
Autres (publication de manuel, guide, base de données, etc.)		1		6	7

Livrables attendus par projet

Projet : Systèmes solaires passifs de rafraîchissement des bâtiments (RafriBat)

Équipe responsable : BENHAMOU Brahim (Faculté des Sciences Semlalia), CHEHOUANI Hassan (Faculté des Sciences et Techniques Guéliz) et MANDI Laila (Centre National d'Etudes et de Recherches sur l'Eau et l'Energie), Université Cadi Ayyad, Marrakech, EL ALAMI Mustapha, Université Hassan II-Ain Chock, Faculté des Sciences Ain Chock, Casablanca.

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	12	5	2	2	21
Chercheurs	7				7
Ingénieurs					0
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat	3	2			5
Etudiants en Master	2	2	2	2	8
Élève-Ingénieurs					0
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)		1			1
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture		2	2	4	8
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences					0
Communications orales dans des manifestations scientifiques		4	4	4	12
Dépôt de Brevets					0
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques				1	1
Publications dans des Proceedings		4	4	4	12

Projet : Extraction par solvant de la matière organique des schistes bitumineux - Etude et valorisation des huiles produites

Equipe responsable : HANNACHE Hassan, Université Hassan II-Mohammeda, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Casablanca
SAOULI Ahmed, Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, Rabat

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	36	18	11	0	65
Chercheurs	16				16
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat	5	4			9
Etudiants en Master	8	6	4		18
Elève-Ingénieurs					0
Etudiants en Licence	6	6	6		18
Autres (technicien, assistant de recherche...)	1	2	1		4
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture		4	4	4	12
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences				1	1
Communications orales dans des manifestations scientifiques	4	11	10		25
Dépôt de Brevets		1	1	1	3
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques					0
Publications dans des Proceedings		2	2		4

10

Projet : Combustion des schistes bitumineux en lit fluidisé

Responsable : BOUHAFID Abdelmounaim, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	7	5	4	3	19
Chercheurs	3				3
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat		1	1		2
Etudiants en Master	2	2	2	2	8
Elève-Ingénieurs					0
Etudiants en Licence	1	2	1	1	5
Autres (technicien, assistant de recherche...)	1				1
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture		1	1	2	4
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences					0
Communications orales dans des manifestations scientifiques		1	1	2	4
Dépôt de Brevets					0
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques				1	1
Publications dans des Proceedings			2		2

11

Projet : Etude épidémiologique et génétique des leucémies myéloïdes aiguës

Responsable : NADIFI Sellama, Université Hassan II - Ain Chock, Faculté de médecine et de pharmacie de Casablanca, Casablanca

	Année 1	Année 2	Année 3	Total
Personnel impliqué:	18	4	0	22
Chercheurs	13			13
Postdoctorants	1			1
Etudiants en doctorat	1	1		2
Etudiants en Master	1	2		3
Élève-Ingénieurs				0
Etudiants en Licence	1	1		2
Autres (technicien, assistant de recherche...)	1			1
Production scientifique et technologique				
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture	1	2	3	6
Publication de livres ou chapitres de livres		1		1
Présentation de conférences	1	1	2	4
Communications orales dans des manifestations scientifiques	2	2	3	7
Dépôt de Brevets				0
Autres livrables				
Organisation de manifestations scientifiques	1	1	1	3
Publications dans des Proceedings				0

12

Projet : Méthodes mathématiques et outils de modélisation et simulation pour le cancer

Responsable : BELLOUQUID Abdelghani, Université Cadi Ayyad, Ecole Nationale des Sciences Appliquées (ENSA), Safi

	Année 1	Année 2	Année 3	Total
Personnel impliqué:	16	0	0	16
Chercheurs	13			13
Postdoctorants	1			1
Etudiants en doctorat	1			1
Etudiants en Master				0
Élève-Ingénieurs				0
Etudiants en Licence				0
Autres (technicien, assistant de recherche...)	1			1
Production scientifique et technologique				
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture	8	8	8	24
Publication de livres ou chapitres de livres				0
Présentation de conférences	2			2
Communications orales dans des manifestations scientifiques				0
Dépôt de Brevets				0
Autres livrables				
Organisation de manifestations scientifiques	1		1	2
Publications dans des Proceedings	4	6	6	16

13

Projet : Approximation et sous espaces invariants

Responsable : EL-FALLAH Omar, Université Mohammed V-Agda, Faculté des Sciences, Rabat

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	13	7	1	0	21
Chercheurs	8				8
Postdoctorants		1	1		2
Etudiants en doctorat	1	6			7
Etudiants en Master	4				4
Elève-Ingénieurs					0
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)					0
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture		4	5	5	14
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences		2	2	2	6
Communications orales dans des manifestations scientifiques	3	3	3	3	12
Dépôt de Brevets					0
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques			1		1
Publications dans des Proceedings					0

14

Projet : Recherche pluridisciplinaire sur les géomatériaux et les géosites volcaniques du Maroc :
Nécessité de leur valorisation et de leur exploitation dans les perspectives d'un développement durable

Equipe responsable : EL AMRANI Izeddine, Institut Scientifique, Rabat, REMMAL Toufik, Faculté des Sciences Ain Chock, Casablanca, ALBUZANE Abderrahman, Faculté des Sciences et Techniques de Mohammeda

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	34	2	2	0	38
Chercheurs	29				29
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat	2	1			3
Etudiants en Master	2		2		4
Elève-Ingénieurs					0
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)	1	1			2
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture			2	2	4
Publication de livres ou chapitres de livres			2	2	4
Présentation de conférences			1	1	2
Communications orales dans des manifestations scientifiques			1	1	2
Dépôt de Brevets		1	1	2	4
Autres livrables			1	1	2
Organisation de manifestations scientifiques					
Publications dans des Proceedings				1	1
Inventaire des sites-phares et des géomatériaux			1	1	2
Base de données numérique sur les caractéristiques et les intérêts de différents géosites étudiés ainsi que sur les géomatériaux volcaniques du Maroc				1	1

15

**Projet : Impact des changements globaux sur les vertébrés semi-aquatiques
le long d'un gradient méditerranéen à pré-Saharien**

Responsable : SLIMANI Tahar, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech.

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	16	6	2	2	26
Chercheurs	14				14
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat		4			4
Etudiants en Master	2	2	2	2	8
Élève-ingénieurs					0
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)					0
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture			6	6	12
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences			2	2	4
Communications orales dans des manifestations scientifiques	4	4	6	6	20
Dépôt de brevets					0
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques					0
Publications dans des Proceedings					0
Édition d'un guide sonore des amphibiens du Maroc				1	1
Édition de l'Atlas biogéographique des vertébrés semi-aquatiques du Maroc				1	1

16

**Projet : Le patrimoine géologique des provinces sahariennes et régions limitrophes (Bas Draa, Ifni).
Inventaire, SIG et bases de données et valorisation des géomatériaux**

Équipe responsable : SADDIQI Omar, Université Hassan II-Aln Chock, Casablanca, IKENNE Moha, Université Ibn Zohr,
Faculté polydisciplinaire de Taroudant, YOUBI Nasreddine, Université Cadi Ayyad, Marrakech

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	25	1	1	0	27
Chercheurs	22				22
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat	3				3
Etudiants en Master		1	1		2
Élève-ingénieurs					0
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)					0
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture		1	1	2	4
Publication de livres ou chapitres de livres				1	1
Présentation de conférences		1	2	2	5
Communications orales dans des manifestations scientifiques		2	3	3	8
Dépôt de brevets					0
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques			1	1	2
Publications dans des Proceedings					0
Publication d'un guide géotouristique des provinces sahariennes		1			1
Édition d'un ouvrage sur la géologie des provinces sahariennes				1	1

17

Projet Contribution au développement et à la réalisation des cellules photovoltaïques organiques

Responsables : ADDOU Mohammed, Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Kénitra, ZAZOUI Mimoun, Université Hassan II-Mohammedia, Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia, Mohammedia

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	16	3	4	1	24
Chercheurs	13				13
Postdoctorants	1	1	1		3
Etudiants en doctorat	2	2	2		6
Etudiants en Master			1	1	2
Élève-Ingénieurs					0
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)					0
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture	2	2	2	2	8
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences		1	2	2	5
Communications orales dans des manifestations scientifiques	2	2	3	3	10
Dépôt de Brevets				1	1
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques		1		1	2
Publications dans des Proceedings		2	2	2	6

18

Projet Valorisation et gestion économique intégrée de l'eau d'irrigation au niveau du bassin versant

Responsable : DOUKKALI Mohammed Rachid, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département des Sciences Humaines, Rabat

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	14	5	3	3	25
Chercheurs	9				9
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat	2	2			4
Etudiants en Master					0
Élève-Ingénieurs	3	3	3	3	12
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)					0
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture		2	2	2	6
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences					0
Communications orales dans des manifestations scientifiques					0
Dépôt de Brevets					0
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques	1	1	1	1	4
Publications dans des Proceedings		1	1	1	3
Publication d'un manuel sur la gestion intégrée de l'eau				1	1

Projet : Made in Morocco: Industrialisation et développement					
Responsable : EL AOUFI Noureddine, Université Mohammed V - Agdal, Faculté des sciences juridiques, économiques et sociales, Rabat					
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Total
Personnel impliqué:	22	0	0	0	22
Chercheurs	15				15
Postdoctorants					0
Etudiants en doctorat	7				7
Etudiants en Master					0
Élève-Ingénieurs					0
Etudiants en Licence					0
Autres (technicien, assistant de recherche...)					0
Production scientifique et technologique					
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture					0
Publication de livres ou chapitres de livres					0
Présentation de conférences					0
Communications orales dans des manifestations scientifiques					0
Dépôt de Brevets					0
Autres livrables					
Organisation de manifestations scientifiques					0
Publications dans des Proceedings					0
Analyse longitudinale de la politique industrielle	1				1
Protocole méthodologique (hypothèses, méthode d'échantillonnage, questionnaire)	1				1

Livrables par projet									
Projet : Contribution au développement et à la réalisation des cellules photovoltaïques organiques									
Mohammed ADDOU, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Kenitra									
Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences données	Brevet	
14	00	10 en Doctorat	00	00	02	Associés au projet 05	Internationales 12	00	- Etablissement de 8 collaborations internationales (Inde, Chili, France, Roumanie et Algérie) - Organisation de 4 manifestations scientifiques
		03 en Master				Associés au thème du projet 00	Nationales 02		

Auditeuse Hassan El des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité

Projet : Combustion des schistes bitumineux en lit fluidisé
 Abdelmounaim BOUHAFID, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences données	Brevet	
04	00	02 en Doctorat	00	00	02	Associés au projet 00	Internationales 00	00	
		00 en Master				Associés au thème du projet 00	Nationales 00		
		02 en Licence							

*Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
 Session plénière 2013 - Rapport d'activité*

22

*Projet : Impact des changements globaux sur les vertébrés semi-aquatiques
 le long d'un gradient méditerranéen à pré-Saharien*

Responsable : SLIMANI Tohar, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences données	Brevet	
19	00	05 en Doctorat	00	00	03	Associés au projet 00	Internationales 02	00	- Participation du Pr. Slimani Tohar au tournage d'un film documentaire «la tortue après l'adern» par Ecomedia Production
		03 en Master				Associés au thème du projet 00	Nationales 01		

*Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
 Session plénière 2013 - Rapport d'activité*

23

Projet : Recherche pluridisciplinaire sur les géomatériaux et les géosites volcaniques du Maroc : nécessité de leur valorisation et de leur exploitation dans les perspectives d'un développement durable

Responsable : Iz-Eddine EL AMRANI EL HASSAN, Institut scientifique, Université Mohammed V-Agdal, Rabat
 Toufik REMMAL, Faculté des Sciences, Université Hassan II-Ain Chock, Casablanca
 Abderrahman ALBIZANE, Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia, Université Hassan II-Mohammedia

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences données	Brevet	
20	00	09 en Doctorat 04 en Master	00	00	03	Associés au projet 01 Associés au thème du projet 00	Internationales 03 Nationales 01	00	-03 coopérations avec le secteur privé (entreprises: ALIA, EuroMortars, GEOMEX) -Organisation de 01 manifestation scientifique

Arsalim Hassan II des Sciences et Techniques -
 Session plénière 2013 - Rapport d'activité

24

Projet : Extraction par solvant de la matière organique des schistes bitumineux – Etude et valorisation des huiles produites

Responsables : Hassan HANNACHE, Faculté des Sciences Ben M' Sik, Université Hassan II-Mohammedia, Casablanca
 Ahmed SOIABI, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Agdal, Rabat

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences données	Brevet	
15	00	07 en Doctorat 03 en Master	00	00	01	Associés au projet 03 Associés au thème du projet 00	Internationales 04 Nationales 07	00	

Arsalim Hassan II des Sciences et Techniques -
 Session plénière 2013 - Rapport d'activité

25

Projet : Méthodes mathématiques et outils de modélisation et simulation pour le cancer

Responsable : Abdelghani BELLOUQUID
Ecole Nationale des Sciences Appliquées (ENSA), Université Cadi Ayyad, Safi

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences données	Brevet	
16	00	02 en Doctorat	00	00	01	Associés au projet 05	Internationales 03	00	Organisation de 01 manifestation scientifique
		01 en Master				Associés au thème du projet 02	Nationales 01		

*Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité*

26

*Projet : Le patrimoine géologique des provinces sahariennes et régions limitrophes (Bas Drâa, Ifni),
inventaire, SIG et bases de données et valorisation des géomatériaux*

Responsable : Omar SADDIQI, Ecole Faculté des Sciences, Université Hassan II-Aïn Chock, Casablanca

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants	Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés	Conférences données	Brevet	
29	00	07 en Doctorat	00	00	03	Associés au projet 03	Internationales 06	00	
		01 en Master				Associés au thème du projet 00	Nationales 04		

*Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité*

27

Activité 1.3 : Financement des projets de recherche dans le cadre de collaborations internationales (1/2)

Sciences et Techniques du vivant						
Titre du projet	Responsable du projet/Domiciliation et partenaires marocains	Durée du projet	Montant accordé	Versements	Partenaire étranger	Rapport d'activité
Sélection et utilisation de microorganismes rhizosphériques pour l'optimisation de l'olivier au Maroc	-Abdelkarim Filali/Matoufi Univ. Moh. V – Agdal - Cherkaoui El Modafar/ Univ. Cadi Ayad -Alal Douira/Univ. Ibn Tofail - Ahmed Oukbali/ CRRA Meknes - Abdelmajid Moukhlil/ CRRA, Marrakech	2 ans	100 K Euro	1 ^{er} virement de 50 K Euros 2 ^{ème} virement de 50 K Euro	Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique en Espagne (CSIC)	Rapport A1 prévu pour le 26 mai 2012
Mise au point et production de biofertilisants bactériens pour l'inoculation et l'amélioration de la productivité des légumineuses alimentaires au Maroc	-Jamal Aougl/Univ. Mohammed V – Agdal - Imane Thami Aami/ INRA	4 ans	3 841,6 KDH	Total versé : 1 540,4 KDH Reste à verser : 2 251,2 KDH	L'Entreprise Brésilienne de la Recherche Agricole (EMBRAPA)	Rapport A1 prévu pour le 19 septembre 2012

28

Activité 1.3 : Financement des projets de recherche dans le cadre de collaborations internationales (2/2)

Sciences Physiques et Chimiques						
Titre du projet	Responsable du projet/Domiciliation et partenaires marocains	Durée du projet	Montant accordé	Versements	Partenaire étranger	Rapport d'activité
Nanocomposites écologiques à partir de ressources naturelles espagnoles et marocaines	-Mohammed Lahcini/ Univ. Cadi Ayad, Marrakech - Khalid Draoui/Univ. Abdelmalek Essaadi, Tétouan	2 ans	100 K Euro	1 ^{er} virement de 50 K Euros 2 ^{ème} virement de 50 K Euro	Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique en Espagne (CSIC)	Rapport A1 prévu pour le 21 octobre 2012

29

Activités I.4 : Soutien aux manifestations scientifiques (1/2)

Thème de la manifestation	Date et lieu	Nombre de doctorants soutenus
International Conference on Complex Systems (ICCS' 12)	05-06 novembre 2012, Agadir	6
Rencontre internationale sur «le Dessalement et le Développement Durable»	1-2 mars 2012, Casablanca	1
Valorisation de la recherche académique, transfert de technologie et création d'entreprises innovantes	09 mars 2012, Rabat	Contribution financière
Colloque International sur «Innovations technologiques et valorisations de biomolécules»	15-17 mars 2012, Tanger	6
Championnat International des Jeux mathématiques et logiques	14 avril 2012, Casablanca	1
Quatrième Rencontre sur «la valorisation et la préservation du patrimoine paléontologiques»	3-5 mai 2012, Agadir	2
International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS' 12)	10-12 mai 2012, Tanger	3
27 ^{ème} édition de «Schell Eco-marathon 2012 »	17-19 mai 2012, Rotterdam	Contribution financière
Conférence internationale sur «la Biosécurité et la Biosûreté»	24-26 mai 2012, Rabat	Contribution financière
Symposium International sur «Security and Safety of Complex Systems»	25-26 mai 2012, Agadir	2

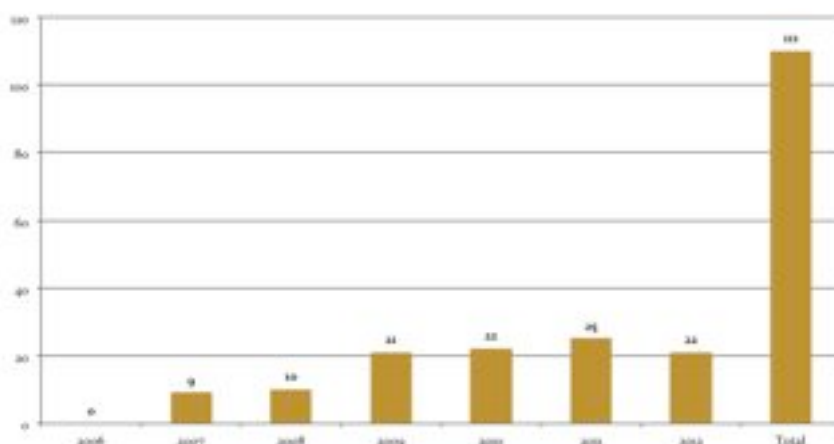
30

Activités I.4 : Soutien aux manifestations scientifiques (2/2)

Thème de la manifestation	Date et lieu	Nombre de doctorants soutenus
2 ^{ème} Colloque International de Céramique	06-07 juin 2012, Safi	3
Journées Internationales sur «Substances Naturelles et Développement Durable»	22-23 juin 2012, Rabat	20
1 ^{ère} Ecole d'été sur «Modélisation et Simulation Numérique, Ondelettes et Traitement du Signal et de l'Image "MNOTSI 2012" »	25-28 juin 2012, Kenitra	10
Conférence internationale sur « Traitement d'Image et de Signal (ICISP) »	28-30 juin 2012, Agadir	2
Congrès International sur «Biotechnologie Microbienne au service du Développement (MICROBIOD 2)»	02-04 octobre 2012, Marrakech	3
2 ^{ème} Rencontre internationale sur la Chimétrie	08-09 octobre 2012, Marrakech	3
Conférence internationale sur «Advanced Materials for photonics, Sensing and Energy Conversion Applications (AMPSECA)»	08-09 octobre 2012, Marrakech	Contribution financière
9 ^{ème} Conférence sur «Earth observation & geoinformation sciences for environment and development in Africa : Global vision and action synergy»	29 octobre-02 novembre 2012, El Jadida	2
7 ^{ème} Rencontre Nationale d' Electrochimie	14-15 décembre 2012, Kenitra	2
7 ^{ème} Rencontre Nationale des Jeunes chercheurs en Physique	20-21 décembre 2012, Casablanca	Contribution financière
Congrès International du Laboratoire Euro Maghrébin de Mathématiques et leurs Interactions	12-15 février 2013 - Rabat	5

31

Évolution du nombre de manifestations scientifiques soutenues par l'Académie



Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité

32

Activité I.5 : Autres actions de promotion de la recherche scientifique

Action	Résultat
Concours général des sciences et techniques (Allocations d'excellence)	Allocations d'excellence (édition 2012) attribuées aux lauréats du concours général en sciences et techniques, organisé pour les meilleurs bacheliers des disciplines scientifiques et techniques, dans le cadre de la convention de partenariat signée avec le Ministère de l'Éducation Nationale. Parmi les lauréats de la première promotion, l'un d'entre eux a été reçu à l'Ecole Polytechnique de Paris et un autre a réussi en juillet dernier le concours d'entrée à l'Ecole Normale Supérieure (Rue d'Ulm).
Prix de thèse aux jeunes diplômés en sciences économiques	L'Académie apporte son appui à l'Association marocaine de sciences économiques et accorde des prix de thèse aux jeunes diplômés en sciences économiques. Résultat : éditions d'ouvrages sur l'économie marocaine

Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013
Rapport d'activité

33

II. Contribution à la définition des politiques de la recherche scientifique et technologique

«En matière de politique nationale de recherche scientifique et technique : l'Académie a pour mission d'émettre des recommandations sur les priorités et sur les moyens susceptibles d'assurer la réalisation des objectifs nationaux en matière de recherche.» (Loi, Art. 2)

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

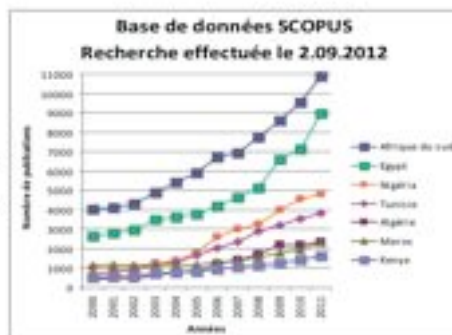
34

Activité II.1 : Elaboration d'indicateurs de sciences et technologies

En matière d'évaluation et de financement des programmes de recherche scientifique : l'Académie est chargée de réaliser des études, des analyses et des enquêtes sur le secteur de la recherche.

(Loi, Art. 2)

Suite à la publication par l'Académie, en mars 2009, du Document intitulé «*Pour une relance de la recherche scientifique et technique au service du développement du Maroc*»; document ayant exploité les données de sciences et technologies relatives à l'année 2006, l'Académie a procédé, en 2011-2012, en collaboration avec ses partenaires, à l'actualisation de ces données. Les données produites pour cet exercice sont celles de l'année 2010 et suite à leur agrégation et à leur mise en forme, elles ont été analysées par un comité restreint composé d'Académiciens, présidé par le Secrétaire perpétuel, qui a abouti à l'édition d'un document intitulé «*Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité*».



Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité

35

Activité II.2 : Elaboration d'un nouveau document sur la recherche scientifique au Maroc.

En novembre 2012, un nouveau rapport intitulé « *développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité* » a été édité par l'Académie. Ce rapport présente un état des lieux du système national de recherche et d'innovation et montre les évolutions entre 2006 et 2010 sur le plan des ressources humaines et financières et sur le plan de la production scientifique et technologique ainsi qu'une série de propositions et de recommandations susceptibles de renforcer l'efficacité des efforts entrepris et donner un nouvel élan à la politique nationale en la matière pour relancer la recherche scientifique et l'innovation dans notre pays ; ces recommandations portent sur trois axes-clés : la formation et la mobilisation des compétences, la dynamisation du système national de recherche et le développement de l'enseignement de la science et de la culture scientifique.

36

Activité II.2 : Quelques données actualisées

Données	2006	2010	Évolution en %
Personnel total de la recherche scientifique et technique	32 273	36 809	14,05
Personnel de la recherche dans le secteur public en %	92,4	91,46	-1,01
Personnel de la recherche dans le secteur privé en %	7,6	8,54	12,36
Effectifs des enseignants-chercheurs	12 225	12 601	3,07
Les Inscrits dans l'enseignement supérieur	385 953	447 035 et 512 090 en 2012	15,82
Les Inscrits dans le doctorat	11 604	17 685	52,40
Effectifs des diplômés de l'enseignement supérieur	43 724 (2005)	48 333	10,54
Nombre de doctorats délivrés	826	676	-18,16
Dépenses intérieures de la recherche & développement (DIRD)	3 693,98 (millions DH)	5 703,12 (millions DH)	54,38
Contribution du secteur privé dans la DIRD en %	21,45	29,43	37,20
Part de la DIRD en % du PIB	0,64	0,74	15,62
Nombre de publications scientifiques/an (base WOS)	960	1300	35,41
Nombre de pu			
Nombre de brevets déposés/an	910	1007	10,66

Activité II.3 : Participation de l'Académie aux travaux d'instances nationales

- Conseil Supérieur de l'Enseignement (CSE)
- Commission Nationale de Coordination de l'Enseignement Supérieur (CNACES)
- Conseil d'Administration du CNRST



Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

38

III. Développement de l'enseignement des sciences et promotion de la culture scientifique

«L'Académie est chargée de :

- proposer aux autorités concernées les voies et les moyens capables de développer l'esprit scientifique au sein de la société marocaine,
- entreprendre des actions de diffusion de la science par des colloques, des manifestations scientifiques, des publications et par la création des bibliothèques scientifiques» (Loi, art. 2)

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

39

Activité III.1 : Développement de l'enseignement des sciences

En 2012, l'Académie a poursuivi ses actions visant la promotion et le développement de l'enseignement des sciences aux collèges et aux lycées :

- Séminaire organisé au siège de l'Académie, avec la participation de responsables du Ministère de l'Education Nationale et des Académies Régionales de l'Education et de Formation des régions de Rabat, Kenitra et Guelmim, de Directeurs de lycées et de membres de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.
- Ce séminaire a été organisé de manière conjointe avec l'Académie des Sciences de la Malaisie. Il a permis aux participants (marocains et malais) de prendre connaissance de l'expérience Malaisienne en matière d'enseignement des sciences et d'autre part de s'informer du Plan d'action du Ministère de l'Education Nationale et de l'action de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques en matière d'enseignement des sciences et diffusion de la culture scientifique.

40

Activité III.2 : 7ème édition des journées « les jeunes et la science au service du développement » (1/4)

- l'Académie a organisé du 26 novembre au 02 décembre 2012, la 7ème édition des journées «les jeunes et la science» en partenariat avec le Ministère de l'Education Nationale. La thématique principale retenue pour cette édition s'inscrit dans le cadre de la décision prise par l'ONU et l'UNESCO de faire de l'Année 2012 «l'année internationale de l'énergie durable pour tous»



41

Activité III.2: 7^{ème} édition des journées « les jeunes et la science au service du développement » (2/4)

- Pour illustrer cette thématique et sensibiliser les jeunes à l'importance de l'énergie durable, comme pour les éditions précédentes, des conférences, des ateliers, des visites de laboratoires, des sorties sur le terrain, des projections de films et de documentaires, des rencontres avec des élèves ont été organisés dans plusieurs établissements scolaires de par le Royaume et animés par les collègues scientifiques qui ont mobilisé plusieurs de leurs membres et invité également quelques-uns de leurs collègues marocains ou étrangers.
- Environ 11400 élèves et 278 enseignants ont participé à ces journées.

Activité III.2 : 7^{ème} édition des journées «les jeunes et la science au service du développement» (3/4)

Deux conférences inaugurales ont été données respectivement par :

- le Pr. H. Boyé, Président du Projet National de recherche EMACOP, membre permanent du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable sur le thème «Energies renouvelables : Nouveaux défis de demain, rêve ou réalité»,
- le Pr. D.Gentile, Directeur National de la Formation au Conservatoire des Arts et Métiers, France sur le thème «Les enjeux énergétiques du XXIème siècle»,
- Le Pr. Mostafa Bousmina, Chancelier de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a donné une conférence de clôture sur le thème «La poly fonctionnalité du graphène : propriétés et applications».



Activité III.2 : 7^{ème} édition des journées «les jeunes et la science au service du développement» (4/4)

Conférences, rencontres, ateliers etc. ...animés par les collèges scientifiques

Collège scientifique	Activité
Sciences physiques et chimiques	20 conférences scientifiques dans des lycées de plusieurs villes du Royaume 5 rencontres de sensibilisation 11 ateliers de vulgarisation et « la main à la pâte » 1 visite de la station de l'énergie solaire d'Assa Zag
Sciences de la Modélisation & de l'information	22 conférences scientifiques dans des lycées de plusieurs villes du Royaume 4 ateliers 4 rencontres 1 visite de la centrale thermo solaire de Ain Beni Mthar
Études Stratégiques & Développement Économique	4 conférences dans des lycées de Rabat, 2 ateliers et 1 visite d'entreprise MAScIR
Ingénierie, Transfert & Innovation Technologique	10 conférences dans la région du Gharb, 1 visite des sites des énergies renouvelables et 1 exposition
Sciences et techniques du vivant	2 conférences et 2 visites aux laboratoires de recherche
Sciences et techniques de l'environnement, de la terre et de la mer	13 conférences et 5 visites (musée, station de traitement, laboratoire, nature, barrage)

44

Activité III.3 : Organisation d'un cycle de conférences à l'Académie

« L'Académie est chargée d'assurer une communication de haut niveau entre la communauté scientifique nationale et l'élite scientifique mondiale » (Loi, art.2)

Conférence	Présentée par	Date	
«Quelle université pour demain dans les pays en développement»	Pr. Rethy Chhem	14 avril 2012	
«Que peut-on espérer au 21 ^{ème} siècle?» Cellule de réflexion sur le thème «Sciences et humanités»	Pr. Edgar Morin	27 avril 2012	
«Conférence journalisme et communication scientifiques»	M. Yves Sciama	18 mai 2012	
«The role of science, technology and innovation in Nation Building»	Pr. Abdul Hamid Zakri	18 mai 2012	
«L'Université dans son environnement socioéconomique : quelques exemples de partenariats et recommandations»	Pr. Mohamed Najim	28 mai 2012	

Activité III.4 : Collaboration à l'organisation de colloques, ateliers, séminaires, journées d'étude...

Activités

Colloque International sur les rapports sciences et société, organisé à Rabat le 25 juin 2012 en collaboration avec le Centre National pour la Recherche Scientifique, l'Université Mohammed V-Agdal et le British Council.

Atelier sur la rédaction scientifique, organisé les 5 et 6 avril 2012 par l'Académie en collaboration avec l'Académie Nationale de Médecine de Paris pour discuter de la mise en place d'un programme d'aide à la rédaction et à la communication scientifique des jeunes chercheurs marocains et africains francophones ---->> **création d'un centre de formation à la rédaction d'articles scientifiques avec l'aide de l'IAP.**

Rencontre sur «science for peace & security», organisée le 22 mai 2012 à Rabat en collaboration avec l'OTAN.

Journée d'études sur l'état d'avancement de la physique des particules et ses applications, organisée le 06 décembre 2012 à Rabat en collaboration avec l'ANRT/INPT.

Activité III.5: Publications de l'Académie durant 2011-2012

- Actes de la session plénière 2012
- Bulletin d'information de l'Académie (N° 11, 12 et 13)
- Lettres de l'Académie (N° 16, 17 et 18)
- Volumes 2 et 3 du Journal scientifique de l'Académie «Frontiers in Science and Engineering».



Activité III.6: Bibliothèque de l'Académie

- Acquisition et traitement de plus de 500 titres (ouvrages par l'Académie pour un budget de plus 1 million de DH couvrant les disciplines de sciences physiques et chimiques, sciences biologiques, sciences de l'ingénieur, sciences de la terre et de la mer, histoire des sciences ...)
- Réunions du Comité d'orientation et de suivi de la Bibliothèque (gestion, commande, achat, abonnement, échange)
- Au cours de l'année 2012-2013, des documents précieux ont été offerts à la Bibliothèque :
 - Edition en lithographie des *Eléments* d'Euclide (19^{ème} siècle). Traduction en arabe par Khaouja Attaoui; offert par la Bibliothèque Royale,
 - Edition en fac-similé du manuscrit d'un carnet de Léonard de Vinci (15^{ème} siècle); offert par l'Académie des Sciences – France,
 - Edition en fac-similé de l'Atlas de Lázaro Luís (16^{ème} siècle); offert par l'Académie des Sciences – Portugal.
- Dons offerts par l'Académie des Sciences – France
 - Publications diverses de l'Académie,
 - Abonnement électronique aux 7 revues thématiques « Comptes Rendus de l'Académie »,
 - Abonnement au Canal Académie

Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité

45

IV- Coopération, partenariat et présence de l'Académie à l'échelle internationale



Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité

49

Activité IV.1 : Coopération bilatérale



Signature d'un projet et des actions de coopération avec l'Académie des Sciences du Portugal



Signature d'un projet de coopération avec l'Académie des Sciences de Chine



Signature d'une convention de coopération et de partenariat avec le Haut Commissariat aux Eaux et aux Forêts et à la lutte contre la Désertification



Signature d'une convention de coopération et de partenariat avec l'Académie de Technologie de France



Signature d'un mémorandum de partenariat Avec Académie Nationale des Sciences de l'Inde

Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2013 - Rapport d'activité

50

Activité IV.2 : Coopération multilatérale

Lieu	Date	Manifestation	Participant
Washington - USA	27 - 29 février 2012	Réunion préparatoire du G-Sciences qui a adopté le document sur l'environnement soumis à la réunion du G20 au Mexique	Pr. Mostafa Bousmina, Chancelier de l'Académie
Paris - France	20 - 21 mars 2012	5 ^{ème} Conférence scientifique PARMENIDES V du GID sur la thématique « vers une vision intégrée du développement scientifique méditerranéen »	Pr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel, Pr. Mohamed Alt-Kadi, membre résident et Pr. Rajaa Cherkaoui Moursil, membre correspondant de l'Académie
Kuala Lumpur- Malaisie	1-5 octobre 2012	8 ^{ème} session de formation sur le management de l'innovation pour la science et la technologie	Pr. Driss Aboutajeddine, membre résident de l'Académie
Nancy - France	2 - 7 Septembre 2012	Rencontre internationale de la Culture Scientifique, Technique et Industrielle	Pr. Mohamed Belaiche, membre correspondant de l'Académie

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

51

Activité IV.3 : Participation de l'Académie aux manifestations scientifiques internationales

Manifestation scientifique	Lieu	Date
Rencontre internationale sur « sciences, technologies, innovation et développement solidaire : quelle contribution des compétences marocaines du monde ? »	Rabat - Maroc	18 et 19 mars 2012
Conférence sur « l'innovation stratégique et entrepreneuriale dans l'ingénierie des systèmes complexes : vers un ingénieur plus entrepreneur »	Agadir - Maroc	10 mai 2012
1 ^{ère} Conférence Internationale sur la Biosécurité et la biosûreté	Rabat - Maroc	24 et 25 mai 2012
Symposium national sur les AGRO biotechnologies : Biotechnologies microbiennes et végétales	Rabat	29 octobre 2012
Séminaire de formation en électricité thermo-solaire	Séville - Espagne	19 novembre 2012
École des nouvelles technologies 2012 sur le thème « les énergies renouvelables : nouvelles technologies pour le développement durable »	Rabat	03 décembre 2012
مؤتمرات فاس حول : "التربية والتعلم والتوعية المجتمعية"	فاس	7 ديسمبر
Consortium Asiatique sur la nanophotonique	Taiwan	Décembre 2012
Journée de travail sur l'enseignement des sciences (alias IAP SE programme in Europe)	Rome - Italie	10 décembre 2013
Second Séminaire sur l'enseignement des sciences et les énergies renouvelables	Kuala Lumpur - Malaisie	14-18 janvier 2013

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Session plénière 2013
Rapport d'activité

52

Activité IV.3 : Visites à l'Académie

- Dans le cadre de renforcement des liens de coopération entre l'Académie et les différents partenaires et institutions scientifiques, l'Académie reçoit la visite de responsables, de personnalités et des délégations scientifiques, appartenant à différentes institutions nationales ou étrangères. Au cours de l'année 2012-2013, l'Académie a reçu la visite de :

Délégation	Date
Président, Vice-président et Secrétaire exécutif de l'Académie Nationale des Sciences de l'Inde	21 mai 2012
Délégation de l'OTAN	22 mai 2012
Président de la Bibliothèque Nationale de France	30 mai 2012
Représentants de l'Académie Nationale de Médecine de France	14 janvier 2013
Délégation du Parlement de la Finlande	15 janvier 2013

Académie Hassan II des Sciences et Techniques -
Session plénière 2011 - Rapport d'activité

53

V- Organisation administrative de l'Académie



54

V.1.- Les ressources humaines

- *Le personnel de l'Académie s'élève aujourd'hui à 34 personnes dont 16 cadres supérieurs (docteurs d'Etat ou ingénieurs). Il est composé du personnel statutaire, du personnel détaché, du personnel mis à disposition et de contractuels et chargé de différentes tâches et activités de l'Académies au sein des différents organes directeurs et administratifs de l'Académie précédemment décrits.*
- *Achèvement de l'équipement et de l'aménagement du siège de l'Académie (informatique, bureautique, mobilier...)*

55

Activité V.2. Le budget de l'Académie en DH

Dépenses	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Fonctionnement	7 452 000,00	8 775 000,00	5 294 222,05	6 374 613,60	7 949 527,04	10 149 426,29	10 700 000,00
Equipement	2 469 000,00	8 500 500,00	39 789 068,75	38 562 434,96	20 526 429,31	64 829 628,31	56 961 159,13
TOTAL	9 921 000,00	17 275 500,00	45 083 068,75	44 937 048,56	28 475 956,35	70 979 090,60	67 661 159,13
Coût Session inaugurale mai 2006	2 238 000,00	-	-	-	-	-	-
Coût Session plénière	-	1 810 000,00	1 705 969,00	1 062 229,86	1 260 354,35	1 263 087,48	1 880 388,36

56

Conclusion

L'Académie Hassan II des Sciences et Technique essaye donc inlassablement de s'acquitter de sa mission avec le souci de promouvoir la recherche scientifique et le rayonnement des sciences et du savoir, de mener ses actions de façon progressive dans le cadre d'une programmation réaliste, mais aussi d'une vision prospective, privilégiant certes les secteurs prioritaires, définis par les autorités publiques et tendant toujours vers son objectif qui lui a été défini par Sa Majesté le Roi Mohammed VI –que Dieu Le Glorifie–, le 18 mai 2006 **«servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale» dont elle a fait sa devise.**

Merci pour votre attention

57

COMPTE RENDU DE LA SESSION PLÉNIÈRE SOLENNELLE 2013

La session plénière solennelle annuelle 2013 de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, s'est tenue à Rabat, les 20,21 et 22 février 2013, sous le thème scientifique général «la physique aujourd'hui et ses applications». Le présent compte rendu synthétise les travaux et activités de cette session.

Mercredi 20 février 2013 (matin)

Cérémonie d'ouverture

Séance plénière I :

«Physique des hautes énergies et sciences de l'univers»

Le mercredi 20 février 2013, à 09h, dans la grande salle de Conférences de l'Académie du Royaume à Rabat, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a procédé à l'ouverture solennelle de sa session plénière solennelle 2013, en présence de plusieurs personnalités invitées.

Dans son discours d'ouverture, le Secrétaire perpétuel de l'Académie, le Pr. Omar Fassi-Fehri, a rappelé que la session plénière solennelle est toujours un moment privilégié pour s'acquitter d'une des activités phares de l'Académie, celle, comme précisé dans la loi de sa création, de réunir de façon régulière l'ensemble de ses membres dans l'objectif de développer la concertation et l'échange entre la communauté scientifique nationale, et l'élite scientifique mondiale sur des questions majeures, qui préoccupent notre société et pour apporter un éclairage accru sur le progrès incessant des sciences, et s'interroger sur les conditions qui permettent à celles-ci d'évoluer et de se développer.

Il a également rappelé que la tenue de cette session s'inscrit dans le cadre des Hautes Orientations de son Tuteur Sa Majesté le Roi Mohammed VI que Dieu Le protège qui, dans Son Discours d'installation de l'Académie, avait insisté sur «l'importance du rôle que devront jouer nos scientifiques en général et les membres de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques en particulier, afin de contribuer à relever les défis du développement et principalement ceux du développement humain». A cette occasion, il a réaffirmé les sentiments de gratitude et de reconnaissance de tous les membres de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques à SM le Roi Mohammed VI pour Sa Protection Tutélaire, Sa sollicitude et Ses encouragements. Il a aussi rendu un vibrant hommage à Feu SM le Roi Hassan II, à qui revient le mérite d'avoir créé l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Il a souligné aussi que cette session est marquée par la présence de plusieurs éminentes personnalités scientifiques venant de (France, USA, Royaume-Uni, Suède, Chine, Espagne, Sénégal, Chili, Brésil, Portugal, Suisse). Parmi les personnalités invitées on trouve notamment Mme Catherine Bréchnac, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des

Sciences de l'Institut de France, Pr. Serge Haroche, membre de l'Académie des Sciences de France, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure et au Collège de France et lauréat du Prix Nobel de Physique 2012, Pr. Cédric Villani, mathématicien, lauréat de la médaille Fields et Pr. Jonathan R. Ellis, membre de la Société Royale de Londres et de l'Institut de Physique, Royaume Uni, Conseiller du Directeur général du CERN.

Dans son discours, le Pr. Omar Fassi-Fehri a passé en revue les principales activités menées durant l'année écoulée par l'Académie. Quelques unes des actions phares auxquelles l'Académie accorde la plus grande importance ont été rappelées comme :

1. la promotion de la recherche scientifique par le financement de projets de recherche,
2. l'intérêt apporté à l'enseignement des sciences et à la diffusion de la culture scientifique, notamment par l'organisation des journées «les jeunes et la science au service du développement» et la création de clubs scientifiques dans certains établissements scolaires (une quinzaine);
3. la diffusion régulière depuis l'installation de l'Académie de quatre publications de l'Académie dont un journal scientifique «Frontiers in Science and engineering»;
4. le développement de la communication scientifique;
5. l'encouragement de l'excellence, notamment par l'octroi de bourses d'excellence aux meilleurs élèves au baccalauréat (filières scientifiques et techniques);
6. une présence sur le plan international de l'Académie et le développement de la coopération scientifique internationale;
7. la réalisation d'études et d'enquêtes sur la recherche scientifique au Maroc par la publication du document intitulé «Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité : un état des lieux et des recommandations clés» :

Concernant les travaux de cette session, Il a rappelé que le thème scientifique général choisi porte sur «la physique aujourd'hui et ses applications», et que le choix de ce thème s'explique par le rôle essentiel que joue aujourd'hui la physique dans la compréhension de la nature et de l'univers, et dans la génération de nouvelles connaissances, et l'avancement du savoir et bien entendu dans les importantes et multiples applications de la physique dans la vie courante, et enfin dans les sollicitations provenant des sciences voisines comme la chimie, la biologie, les sciences de la terre, de l'environnement, la météorologie...

Après l'allocation du Secrétaire perpétuel, la parole fut donnée à Mme le Pr. Catherine Bréchignac, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences de l'Institut de France, qui a présenté un exposé introductif sur le sujet *«Où en est-on dans la compréhension des mécanismes qui régissent la matière?»*.

Dans le cadre de cette cérémonie d'ouverture, la parole a été donnée par la suite à Mr. le Pr. Serge Haroche, invité d'honneur de la session plénière et Prix Nobel de Physique 2012, qui a présenté un exposé sur le sujet *«Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des « chat de Schrödinger » de lumière»*.

Un troisième exposé fut présenté à la cérémonie d'ouverture par le Pr. Cédric Villani, lauréat de la médaille Fields sur le thème «*Les mathématiques et la physique : un mariage heureux. Quelques réflexions sur les tribulations de l'entropie, allant et venant entre mathématique et physique*».

A l'issue de la cérémonie d'ouverture, l'Académie a procédé à l'élection de Mr. Driss Ouazar comme Directeur des séances, en remplacement de Mme. Rajae El Aouad dont le mandat est venu à expiration.

Après la pause-café, l'Académie a poursuivi ses travaux par une première séance plénière sur «**Physique des hautes énergies et sciences de l'univers**», au cours de laquelle trois exposés furent présentés par :

- Pr. Jean-Michel Alimi, Laboratoire Univers et Théorie, Observatoire de Paris, France, sur «*Origine de la structuration de l'univers et nature de l'énergie noire*»;
- Pr. Jonathan R. Ellis, membre de la Société Royale de Londres et de l'Institut de Physique, Royaume Uni, Conseiller du Directeur général du CERN, Suisse, sur «*A la recherche du boson de Higgs et au-delà*»;
- Pr. El Hassan Saidi, Université Mohammed V Agdal, Rabat, Maroc, Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*L'univers supersymétrique*».

Une discussion a suivi ces exposés, animée principalement par Mr. Driss Ouazar, Directeur des séances et membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Mercredi 20 février 2013 (fin de la matinée)

Visite au Mausolée Mohammed V

La date du 20 février 2013 correspondant au 09 Rabii II 1434 et coïncidant avec le 14ème anniversaire, dans le calendrier de l'Hégire, du décès du regretté Souverain Feu Sa Majesté le Roi Hassan II, dont l'Académie s'enorgueillit de porter le nom, une visite au Mausolée Mohammed V a été programmée. Pour célébrer cet anniversaire, une délégation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, composée d'académiciens membres du Conseil de l'Académie et de la Commission des travaux, et de quelques cadres de l'Administration, conduite par Mr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel de l'Académie, a effectué mercredi 20 février 2013, en fin de matinée, une visite au Mausolée Mohammed V à Rabat. La délégation de l'Académie s'est recueillie sur les tombes des regrettés Souverains feu S.M le Roi Mohammed V et feu Sa Majesté le Roi Hassan II, disant des prières pour la paix de Leur âme et implorant le Tout-puissant de Les agréer en Sa sainte miséricorde, tout en rappelant les sacrifices du Père de la Nation Feu Sa Majesté Le Roi Mohamed V pour la liberté et l'indépendance du Maroc et les Grandes réalisations de Feu Sa Majesté le Roi Hassan II, le Réunificateur du Pays et le Fondateur de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Mercredi 20 février 2013 (après midi)**Séance plénière II : Physique quantique, matière condensée et matière molle.****Séance parallèle 1 : Physique en Sciences de la vie****Séance parallèle 2 : Physique et agronomie****Séance parallèle 3 : Physique et sciences économiques**

Le mercredi après midi, l'Académie a poursuivi ses travaux par une deuxième séance plénière sur «**Physique quantique, matière condensée et matière molle**», au cours de laquelle quatre communications furent présentées par :

- Pr. Gerald G. Fuller, Université de Stanford, Etats Unis d'Amérique, Membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Dynamics of soft biological interfaces*»;
- Pr. Mohamed Daoud, Université Ibn Zohr, Agadir, sur «*Les corrélations quantiques en théorie quantique de l'information*»;
- Pr. Hans Hermann, Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich, sur «*Packing of wires in cavities and growing surfaces*»;
- Pr. Abdelilah Benyoussef, Université Mohammed V Agdal, Rabat, Maroc, Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Nouveaux matériaux pour spintronique*».

Une discussion a suivi ces exposés, dirigée par Mr. Driss Ouazar, Directeur des séances.

Après la pause-café, l'Académie a poursuivi ses travaux par trois séances parallèles. La séance parallèle n°1 a porté sur le thème «**Physique en sciences de la vie**», et a donné lieu à trois communications présentées par :

- Pr. Nezha Ben Raiss, Université Mohammed V Souissi, Rabat, Maroc, et Pr. Rajaa Cherkaoui, Université Mohammed V Agdal, Rabat, Maroc, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Tomographie par émission de positrons (TEP)*» ;
- Pr. Abdesslam El Khamlichi, Université Mohammed V Souissi, Rabat, Maroc, sur «*Radiochirurgie gamma knife : méthode thérapeutique neurochirurgicale de pointe et domaine privilégié des applications de la physique médicale*»;
- Pr. Abdellatif Benider, Université Hassan II Aïn Chock, Casablanca, Association Lalla Salma de Lutte contre le cancer, sur «*Radiothérapie au Maroc : passé, présent et futur*».

Une discussion a suivi ces exposés, animée principalement par Mme. Rajae El Aouad, membre résidente de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, modératrice de cette séance.

La séance parallèle n°2 sur le thème «**Physique et agronomie**» a été animée et modérée par le Pr. Albert Sasson, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Trois exposés furent présentés au cours de cette séance par :

- Pr. Silvio Crestana, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, EMBRAPA, Brésil, Membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Agriculture instrumentation as one of the opportunities for international cooperation in science and technology, specifically between Brazil and Morocco*»;
- Pr. Mohamed Ettarid, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, sur «*La télédétection en agriculture*»;
- Pr. Riad Belghiti et Mohamed Badraoui, Institut National de la Recherche Agronomique, INRA, Rabat, sur «*La prédiction agrométéorologique des rendements céréaliers au Maroc*».

La séance parallèle n°3 a été consacrée au thème «Physique et sciences économiques». Deux exposés furent présentés par :

- Pr. Guillaume Hollard, Centre d'Economie de la Sorbonne, Paris, France, «*L'économie expérimentale : quel rapport à la physique?*»;
- Pr. Yu Yongding, Membre de l'Académie des Sciences Sociales de Chine, Membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*China's economic development*».

Une discussion a suivi ces deux exposés, animée par le modérateur de cette séance, le Pr. Nouredine El Aoufi, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Judi 21 février 2013 (matin)
Séance plénière III : Physique et sciences de l'ingénieur
Présentation de nouveaux membres de l'Académie

La matinée du jeudi 21 février 2013 fut consacrée à la séance plénière III sur le thème «**Physique et sciences de l'ingénieur**», au cours de laquelle quatre exposés furent présentés, respectivement, par :

- Pr. Daniel Kaplan, Membre de l'Académie des Sciences (France) et Président de la société Fastile, sur «*Instrumentation pour les lasers à impulsions ultra-courtes*»;
- Pr. Mostapha Bousmina, Chancelier de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et Président de l'Université Euro-Méditerranéenne de Fès, sur «*Matériaux cellulaires pour des applications piézoélectrique*»;
- Pr. André Zaoui, Membre de l'Académie des Sciences (France) et membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*L'expérimentation a-t-elle (encore) sa place en mécanique des matériaux?*»;

- Pr. Juan Carlos Castilla, Pontificia Universidad Catolica de Chili Casilla, Chili, membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Revisiter le quadrant de Pasteur : Rôle de la science post moderne par rapport aux besoins de la société et catastrophes naturelles*».

Une discussion a suivi ces exposés, dirigée par le Pr. Driss Ouazar, Directeur des séances.

A la fin de cette séance, la parole fut donnée à Mr. le Secrétaire Perpétuel de l'Académie pour présenter les nouvelles nominations à la dignité d'académiciens à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, qui ont été agréées par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu L'assiste, et ce après examen par le conseil d'Académie, conformément aux dispositions du Dahir portant loi instituant l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Ainsi ont été nommés en qualité de membres associés, les professeurs :

- Yves Coppens, titulaire de la chaire de paléontologie et préhistoire au Collège de France, membre du Haut Conseil de la Science et de la Technologie (France), membre de l'Académie des Sciences de l'Institut de France;
- Ahmadou Lamine NDIAYE, agrégé et Docteur de l'enseignement vétérinaire, Recteur honoraire de l'université Gaston Berger (Saint-Louis du Sénégal), Président de l'Académie des Sciences et Techniques du Sénégal, Président de l'Académie Africaine des Sciences,

en qualité de membres résidents, les professeurs :

- Ali Boukhari, nommé en 2006, par SM le Roi, membre correspondant, Doyen de la Faculté des Sciences de Kenitra;
- Mahfoud Ziad, nommé en 2006, par SM le Roi, membre correspondant, ancien Vice Doyen de la Faculté des Sciences de Rabat.

en qualité de membres correspondants, les professeurs et messieurs :

- Abdeljabbar El Manira, professeur au département de nanoscience à l'Institut de Karolinska (Suède);
- El Maati Ouhabaz, professeur de mathématiques à l'Université de Bordeaux;
- Abdelghani Bellouquid, professeur de mathématiques à l'Université Cadi Ayyad (ENSA de Safi);
- Abdelkrim Filali Maltouf, professeur de microbiologie et biologie moléculaire à l'Université Mohamed V Agdal;
- Abdallah Mokssit, Ingénieur Ecole Supérieure d'Electricité de Paris, Ingénieur Civil Météorologie, Directeur de la Météorologie Nationale (depuis 2009);
- Mohamed Smani, Docteur d'Etat en Sciences physiques, lauréat de l'Ecole Nationale supérieure de géologie de Nancy (France), Directeur de R&D Maroc.

Après cette présentation, les nouveaux membres ont pris la parole respectivement pour présenter leurs remerciements et leur gratitude à Sa Majesté le Roi Mohammed VI – que Dieu L’assiste – pour Sa Haute Sollicitude et les encouragements dont Il entoure l’ensemble de la communauté scientifique du Maroc.

Jeudi 21 février 2013 (après-midi)

Séance parallèle 4 : Physique et Physique-Chimie

Séance parallèle 5 : Physique et Sciences de la Terre et de l’Environnement

Séance parallèle 6 : Utilisation de la Physique dans l’Ingénierie

Après le déjeuner, l’Académie a poursuivi ses travaux par trois séances parallèles. La séance parallèle n°4 a été consacrée au thème «**Physique et physique-chimie**», au cours de laquelle trois communications furent présentées par :

- Pr. Yahia Boughaleb, Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc, membre correspondant de l’Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*La récupération d’énergie mécanique en utilisant l’hybridation des polymères électrostrictifs et électrets*»;
- Pr. Mohammed Addou, Université Ibn Tofail, Kenitra, Maroc, sur «*Les cellules photovoltaïques organiques*»;
- Pr. Mossadek Talby, Université Aix Marseille, Directeur de l’Ecole Doctorale, Marseille, France, sur «*Ecole Doctorale de Marseille*».

Une discussion a suivi ces exposés, animée principalement par le le modérateur de séance, le Pr. Jean-Pierre Majoral, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Après la pause-café, l’Académie a poursuivi ses travaux de la session parallèle n°4 par trois autres communications présentées par :

- Pr. Hassan Lassri, Université Hassan II Aïn Chock, Casablanca, sur «*Nanomatériaux magnétiques à base de métal de transition et de terre rare*»;
- Pr. Zouheir Sekkat, Université Mohammed V, Agdal, Rabat, membre correspondant de l’Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Photo-génération de travail avec des polymères : mouvement moléculaire photo-induit et nano-structuration*»;
- Pr. Mohamed Belaiche, Ecole Normale Supérieure, Rabat, membre correspondant de l’Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Propriétés magnétiques de quelques systèmes exotiques mono et tridimensionnels*».

Une discussion a suivi ces exposés, animée principalement par le modérateur de séance, le Pr. Jean-Pierre Majoral, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

La séance parallèle n°5 sur «**Physique et Sciences de la Terre et de l’Environnement**» a fait l’objet de cinq communications présentées par :

- Pr. Ramon Carbonell, Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique (CSIC), Institut des Sciences de la Terre, Barcelone, Espagne, sur «*The crustal lithosphere across the atlas and Rif orogenic belts : Wide-Angle seismic reflection studies*»;
- Pr. Omar Seddiqui, Université Hassan II Ain Chock, Casablanca, Maroc, sur «*Thermo-chronologie par traces de fission : applications aux orogènes marocaines*»;
- Pr. Robert Reilinger, Massachusetts Institute of Technology, Etats Unis d'Amérique, sur «*Space geodesic research for geodynamics and atmospheric studies*»;
- Pr. Brooks B. Ellwood, Louisiana State University, Etats Unis d'Amérique, sur «*A climate-driven model and development of a floating point time scale for the middle Devonian eifelian stage: based on time series analysis magnetostratigraphic susceptibility data*»;
- Pr. Abdelkrim Rimi, Institut scientifique, Université Mohammed V, Agdal, Rabat, Maroc, sur «*Geophysical investigations for enviromental application*».

Une discussion a suivi ces exposés, animée principalement par le modérateur de séance, le Pr. Ahmed El Hassani, Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

La séance parallèle n°6 sur «**Utilisation des techniques physiques dans l'ingénierie**» a fait l'objet de quatre communications présentées par :

- Pr. Laurent Falk, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Nancy, France, sur «*Principes et applications de l'intensification*»;
- Mr. Mohamed Barakate, Directeur des grands projets, MANAGEM, Maroc, sur «*Le traitement des déchets miniers pour l'obtention de produits à haute valeur ajoutée*»;
- Pr. Brahim Soudi, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, sur «*Compostage des déchets organiques urbains*»;
- Pr. Hassan El Bari, Université Ibn Tofail, Kenitra, Maroc, sur «*Valorisation des déchets urbains : cas de la technologie biogaz*».

Une discussion a suivi ces exposés, animée principalement par le modérateur de séance, le Pr. Mafoud Ziyad, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Vendredi 22 février 2013 (matin)
Présentation du rapport d'activité 2012-2013
&
Réunions des collèges scientifiques

La première partie de la séance du vendredi matin 22 février 2013 fut consacrée à la présentation et à la discussion du rapport d'activité 2012-2013 et à la réunion des collèges scientifiques.

Au début de cette séance, la parole fut donnée au Secrétaire Perpétuel de l'Académie pour présenter le rapport d'activité de l'Académie durant l'année 2012-2013.

Dans le cadre de ses différentes missions qui lui confère le Dahir de sa création, l'Académie a poursuivi la mise en œuvre de son plan d'action au cours de l'année écoulée :

- *en matière de promotion, développement et financement de la recherche scientifique et technologique par :*
 - *la préparation de la session plénière 2013 ;*
 - *le financement des projets dans le cadre de l'appel d'offres 2010-2011;*
 - *le financement des projets dans le cadre de coopération internationale;*
 - *le suivi des projets de recherche financés dans le cadre de l'appel d'offres 2007 qui ont donné lieu à 263 publications dans des revues internationales, 1 brevet, 55 doctorats et 53 Masters ainsi qu'à 7 distinctions de prix;*
 - *le soutien aux manifestations scientifiques; jusqu'à fin février 2012, l'Académie a soutenu 22 manifestations scientifiques;*
 - *l'attribution des allocations d'excellence (édition 2012) aux lauréats du concours général en sciences et techniques. Parmi les lauréats de la première promotion, l'un d'entre eux a été reçu à l'Ecole Polytechnique de Paris et un autre a réussi en juillet dernier le concours d'entrée à l'Ecole Normale Supérieure (Rue d'Ulm);*
 - *l'appui à l'Association marocaine de sciences économiques par l'organisation d'une école académique ouverte aux étudiants doctorants en sciences économiques et par l'octroi de prix de thèse aux jeunes diplômés en sciences économiques;*
 - *la participation à 5 manifestations scientifiques au Maroc et à 7 manifestations à l'étranger.*
- *en matière de politique nationale de la recherche scientifique et technologique par :*
 - *la réalisation des études et enquêtes sur le secteur de la recherche scientifique et l'édition d'un nouveau document sur l'état de la recherche au Maroc intitulé «développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité : état des lieux et recommandations clés»;*
 - *la participation de l'Académie aux travaux d'instances nationales (CSE, CNACES, CA du CNRST...).*
- *en matière de développement de l'enseignement des sciences et promotion de la culture scientifique par :*
 - *la promotion et le développement de l'enseignement des sciences dans les écoles, collèges et lycées (expérience la main à la pâte, sciences à l'école...);*
 - *l'organisation de la 7^{ème} édition des journées «les jeunes et la science au service du développement», sous la thématique principale «énergie durable pour tous», environ 11400 élèves et 278 enseignants ont participé à ces journées;*
 - *l'organisation d'un cycle de conférences (Pr. Rethy Chhem, Pr. Edgar Morin, Pr. Abdul Hamid Zakri, Pr. Mohamed Najim, Yves Sciama, Pr. H. Boyé, Pr. D. Gentile...);*

- *la contribution à l'organisation de séminaires, ateliers, journées d'étude;*
- *la diffusion des publications de l'Académie (Actes de la session plénière 2012, Bulletin d'information de l'Académie (N°11, 12 et 13), Lettre de l'Académie (N°16, 17 et 18) et Volumes 2 et 3 du Journal de l'Académie «Frontiers in Science and Engineering».*
- *en matière de promotion de la coopération scientifique et du renforcement de la présence de l'Académie sur le plan international par :*
 - *la signature d'un projet de coopération avec l'Académie des Sciences de Chine;*
 - *la signature d'un mémorandum de partenariat avec Académie Nationale des Sciences de l'Inde;*
 - *la signature d'un projet et des actions de coopération avec l'Académie des Sciences du Portugal;*
 - *la participation à la réunion du G-Sciences qui a adopté le document sur l'environnement soumis à la réunion du G20 au Mexique;*
 - *la participation à la 5^{ème} Conférence scientifique PARMENIDES V du GID sur la thématique «vers une vision intégrée du développement scientifique méditerranéen» et l'organisation des séminaire de GID à Rabat, Séville et Dakar,*
 - *la participation de l'Académie à plusieurs manifestations scientifiques internationales au Maroc et à l'étranger.*

Après cette présentation, les académiciens purent entamer une large discussion qui a permis de dégager un certain nombre de recommandations :

- organiser à l'avenir des sessions plénières solennelles sur des questions en rapport avec les préoccupations liées par exemple aux thèmes «sciences et société» et «incidences éthiques et avancées scientifiques»;
- organiser une session ordinaire sur la question «gestion des connaissances»;
- faire des propositions pour renforcer le quota des femmes comme membres de l'Académie;
- revoir l'idée des séances parallèles et résoudre le problème de la traduction simultanée dans ces séances parallèles;
- alléger et aérer la session plénière au niveau de la programmation;
- considérer l'année 2013 comme année charnière pour faire l'évaluation des activités de l'Académie et du travail effectué et établir le bilan des décisions et des critères choisis ainsi que les résultats obtenus dans le cadre des projets soutenus par l'Académie;
- élaborer et afficher la procédure de renouvellement des membres de l'Académie en assurant à la fois transparence et nécessité de confidentialité;
- organiser des sessions plénières qui aient un impact direct sur la société, exemple: l'énergie, sciences et société, risques naturels...
- favoriser les relations entre les sciences et les médias;

- organiser un débat sur le financement de la recherche publique et privée;
- renforcer les relations de coopération avec les scientifiques des pays comme l'Espagne, le Portugal et les pays de l'Amérique du Sud et faire des propositions pour les associer comme membres de l'Académie;
- soutenir l'activité de l'Académie qui consiste à élaborer des indicateurs de sciences et technologies et distribuer largement le document édité par l'Académie intitulé «développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité : état des lieux et recommandations clés».

Suite à cette discussion, le Secrétaire perpétuel a pris la parole pour apporter les informations et les précisions supplémentaires suivantes :

- engagement de plus en plus important des académiciens dans les activités de l'Académie;
- la préparation de la session plénière solennelle se fait d'une manière collégiale;
- toutes les propositions des académiciens sont prises en compte;
- félicitation pour l'implication plus particulière des académiciens associés;
- les critères utilisés pour choisir les nouveaux membres sont indiqués dans la Loi instituant l'Académie;
- les thèmes proposés pour les prochaines sessions sont enregistrés et on reviendra sur ces propositions au moment de la préparation de la prochaine session;
- le projet du centre de formation à la rédaction scientifique a été présenté à l'IAP qui l'a retenu et lui a accordé un budget de 50 000 Euros. C'est un centre sans murs, domicilié à l'Académie et on envisage d'organiser en partenariat avec l'Académie Nationale de Médecine (France) 3 activités respectivement à Rabat, Dakar et Libreville;
- se féliciter de la réussite de cette session plénière 2013.

Vendredi 22 février 2013 (après-midi)
Renouvellement des instances de l'Académie
&
Séance de clôture

Après le déjeuner et suite à la réunion des collèges scientifiques, chaque directeur a passé en revue le bilan des activités de l'année 2012, le plan d'action 2013 et les résultats de l'élection du directeur et du co-directeur suivants :

- ***Collège des Sciences et techniques du vivant***
 - *Directeur* : Albert Sasson (reconduit)
 - *co-directeur* : M^{me} Rajae El Aouad (reconduite)
- ***Collège des Sciences et Techniques de l'environnement, de la terre et de la mer***
 - *Directeur* : Mr. Ahmed El Hassani (reconduit)
 - *co-directeur* : Mr. Driss Ouazar (reconduit)

- **Collège des Sciences physiques et chimiques**
 - Directeur : Mr. Mostapha Bousmina (élu)
 - co-directeur : Mr. Abdelilah Benyoussef (élu)
- **Collège des Sciences de la modélisation et de l'information**
 - Directeur : Mr. Abdelhak El Jai (élu)
 - co-directeur : Mr. Abdelmalek Azizi (reconduit)
- **Collège des Ingénierie, Transfert et Innovation technologiques**
 - Directeur : Mr Mahfoud Zyad (reconduit)
 - co-directeur : Mr Ali Boukhari (reconduit)
- **Collège des Etudes stratégiques et Développement économique**
 - Directeur : Mr. Rachid Ben Mokhtar (reconduit)
 - co-directeur : Mr. Mohammed Berriane (reconduit)

Après, la parole a été donnée au Secrétaire perpétuel qui fait lecture de l'élection des membres du Conseil de l'Académie et des membres de la Commission des travaux :

Membres du Conseil d'Académie :

- Mr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel
- Mr. Mostapha Bousmina, Chancelier
- Mr. Albert Sasson
- Mr. Ahmed El Hassani
- Mr. Abdelhak El Jai

Membres de la Commission des travaux :

- Mr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel
- Mr. Mostapha Bousmina, Chancelier
- Mr. Nouredine El Aoufi
- Mr. Youssef Ouknine
- Mr. Ali Boukhari,
- Mr. Taïeb Chkili
- Mr. Driss Ouazar
- Mr. Philippe Tanguy

A la fin de cette séance, Monsieur le Secrétaire perpétuel a pris la parole et dégagé les principales conclusions que l'on peut tirer de la session, en insistant sur sa richesse scientifique et sur la qualité des invités, des interventions et débats ; il a également exprimé ses vifs remerciements à ses confrères et consœurs et ses félicitations pour la réussite de cette session.

La clôture des travaux est intervenue à l'issue de cette séance, au cours de laquelle l'ensemble des académiciens ont adopté un message de loyauté, de gratitude et de déférence adressé à Sa Majesté le Roi Mohammed VI – que Dieu L'assiste et Le protège – pour la Haute Sollicitude dont Il entoure l'ensemble de la communauté scientifique du Maroc, et Ses bienveillants encouragements, que Dieu perpétue Ses bienfaits.

LISTE DES PARTICIPANTS

LISTE DES PARTICIPANTS à la session plénière (20-22 février 2013)

Membres de l'Académie

Prénom et NOM	PROFESSION	FONCTION	COLLEGE
Driss ABOUTAJDINE	Professeur STIC Faculté des Sciences, Rabat	Membre résident	SMI
Daoud AIT-KADI	Professeur Productique-génie industriel Université Laval, Canada	Membre résident	SMI
Mohamed AIT-KADI	Professeur Président du Conseil Général du Développement Agricole	Membre résident	STETM
Ismail AKALAY	Directeur Général de l'Hydrométallurgie MANAGEM (ONA)	Membre correspondant	ITIT
Omar ASSOBBHEI	Professeur Sciences de la mer Faculté des Sciences El Jadida	Membre correspondant	STETM
Abdelmalek AZIZI	Professeur Mathématiques Faculté des Sciences, Oujda	Membre correspondant	SMI
Mohammed BELAICHE	Professeur de Physique ENS, Rabat	Membre correspondant	SPC
Abdelghani BELLOUQUID	Professeur Mathématiques (ENSA, Safi) Université Cadi Ayyad	Membre correspondant	SMI
Rachid BENMOKHTAR BENABDELLAH	Président de l'Observatoire National du Développement Humain, Rabat	Membre résident	ESDE

Collèges (abréviations) :

- SPC : Sciences Physique et Chimiques
- STV : Sciences et Techniques du Vivant
- SMI : Sciences de la Modélisation et de l'Information
- ESDE : Etudes Stratégique et Développement Economique
- ITIT : Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique
- STETM : Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	PROFESSION	FONCTION	COLLEGE
Abdelilah BENYOUSSEF	Professeur de Physique Faculté des Sciences, Rabat	Membre résident	SPC
Mohamed BERRIANE	Doyen, Faculté des Lettres	Membre correspondant	ESDE
Mohamed BESRI	Professeur Protection des Plantes	Membre correspondant	STV
Jean-Jacques BONNET (France)	Professeur Université Paul Sabatier Directeur du Laboratoire de Chimie de Coordination	Membre associé	SPC
Badia BOUAB	Professeur Paléontologie Faculté des Sciences de Rabat	Membre correspondant	STETM
Yahia BOUGHALEB	Professeur de Physique Faculté des Sciences, El Jadida	Membre correspondant	SPC
Ali BOUKHARI	Professeur de Chimie Faculté des Sciences, Kénitra	Membre résident	ITIT
Tijani BOUNAHMIDI	Vice-Président Université Mohamed V Agdal - Rabat	Membre correspondant	ITIT
Mostapha BOUSMINA	Professeur Physique des polymères et nanotechnologies	Chancelier Membre résident	SPC
Juan Carlos CASTILLA ZENOBÍ (Chili)	Professeur Facultad des Ciencias Biologicas. Chili	Membre associé	STETM
Mohammed CHERKAOUÍ	Professeur de Physique Université du Metz - France	Membre correspondant	SPC
Rajaa CHERKAOUÍ EL MOURSÍ	Professeur de Physique Faculté des sciences de Rabat	Membre correspondant	SPC
Taïeb CHKILI	Professeur de Neurologie Président de l'Université Mohammed V-Souissi	Membre résident	STV

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	PROFESSION	FONCTION	COLLEGE
Yves COPPENS (France)	Collège de France, Haut Conseil de la Science et de la Technologie Académie des Sciences, France	Membre associé	STETM
Jean DERCOURT (France)	Professeur de Géologie Université Pierre et Marie Curie (Paris) Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences (France)	Membre associé	STETM
Rajae EL AOUAD	Professeur de Génétique Directrice Institut National d'Hygiène	Membre résident	STV
Noureddine EL AOUI	Professeur d'économie Faculté de Droit - Rabat	Membre résident	ESTE
Ahmed EL HASSANI	Directeur l'Institut Scientifique Université Mohamed V	Membre résident	STETM
Abdelhaq EL JAI	Professeur - Mathématiques Laboratoire de Théories des Systèmes Université Perpignan, France	Membre résident	SMI
Abdeljabbar EL MANIRA	Professeur de nanoscience Karolinska Institute, Suède	Membre correspondant	STV
El Mokhtar ESSASSI	Professeur - Chimie Faculté des Sciences - Rabat	Membre résident	SPC
Omar FASSI-FEHRI	Professeur de Mécanique Faculté des Sciences de Rabat	Membre résident Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques	SPC
Abdelkrim FILALI MALTOUF	Professeur de Microbiologie, Faculté des Sciences de Rabat Université Mohamed V-Agdal	Membre correspondant	STV
Gerald G. FULLER (USA)	Fellow of the Academy of Engineering Department of Chemical Engineering (Stanford University)	Membre associé	SPC

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	PROFESSION	FONCTION	COLLEGE
Francisco GARCIA-GARCIA (Mexique)	Director General de Gestión Forestal y Suelos Secretario de Medio Ambiente	Membre associé	STV
Malik GHALLAB	Délégué à la recherche et au Transfert pour l'innovation France	Membre résident	SMI
Nadia GHAZZALI	Professeur Titulaire de la Chaire de recherche CRSNG-Industrielle Alliance sur les femmes en sciences et génie Départ. Maths et de Statistique Université Laval (Québec)	Membre correspondant	SMI
Claude GRISCELLI (France)	Institut Necker Faculté de Médecine - Université René Descartes - France	Membre associé	STV
Moustapha KASS (Sénégal)	Doyen Honoraire Faculté des Sciences Economiques, et de Gestion	Membre associé	ESDE
Abderrahim MAAZOUZ	Professeur – INSA Départ. de Génie Mécanique Conception Lyon - France	Membre résident	ITIT
Carlos MARTINEZ-ALONSO (Espagne)	Professeur d'immunologie Président - Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique (CSIC – Madrid)	Membre associé	STV
Abdallah MOKSSIT	Directeur de la Météologie Nationale (Maroc)	Membre correspondant	ITIT
Sellama NADIFI	Professeur de Génétique et immunologie Faculté de Médecine - Casablanca	Membre correspondant	STV
Ahmadou Lamine NDIAYE (Sénégal)	Président de l'Académie des Sciences et Techniques du Sénégal	Membre associé	STV
Driss OUAZAR	Professeur Hydromécanique (EMI) Université Mohamed V Agdal, Rabat	Membre résident	STETM

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	PROFESSION	FONCTION	COLLEGE
El Maati OUHABAZ	Professeur de Mathématiques Université de Bordeaux, France	Membre correspondant	SMI
Youssef OUKNINE	Professeur Faculté des Sciences Université Cadi Ayyad Marrakech	Membre résident	SMI
Valeriano RUIZ HERNANDEZ (Espagne)	Professeur – escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla	Membre associé	ITIT
El Hassan SAIDI	Professeur - Physique Faculté des Sciences, Rabat	Membre résident	SPC
Albert SASSON	Professeur Sciences biologiques Consultant auprès UNESCO	Membre résident	STV
Abdelaziz SEFIANI	Professeur Faculté de Médecine - Rabat Directeur, Département de Génétique médicale (INH)	Membre correspondant	STV
Khalid SEKKAT	Professeur – Economie Université Libre de Bruxelles	Membre correspondant	ESDE
Zouheir SEKKAT	Professeur Faculté des Sciences Université Mohamed V Agdal, Rabat	Membre correspondant	SPC
Mohamed SMANI	Directeur R&D Maroc	Membre correspondant	ITIT
Jean SWINGS (Belgique)	Professeur, Faculté des Sciences, Université de Gand	Membre correspondant	STV
Philippe A. TANGUY (Canada)	Professeur -Département of Chemical Enginnering Ecole Polytechnique de Montréal	Membre associé	ITIT

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	PROFESSION	FONCTION	COLLEGE
Philippe TAQUET (France)	Professeur de Géologie Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris	Membre associé	STETM
Marcelo DE SOUZA VASCONCELOS (Portugal)	Agence Communautaire pour Le Contrôle de la Pêche Commission Européenne Bruxelles	Membre associé	STETM
Yu YONGDING (Chine)	Director , Institute of World Economics and Politics Chinese Academy of Social Sciences	Membre associé	STETM
André ZAOUÏ (France)	Professeur Micromécanique des Matériaux Ecole Polytechnique	Membre associé	SPC
Mahfoud ZIYAD	Professeur de Chimie Vice Doyen, Faculté des Sciences - Rabat	Membre résident	ITIT

LISTE DES INVITES

ayant présenté une communication

Prénom et NOM	Affiliation
Mohammed ADDOU	Université Ibn Tofail - Kénitra, Maroc
Jean-Michel ALIM	Laboratoire Univers et Théories et Dark Energy Universe Simulation, Consortium Observatoire de Paris-Meudon, France
Riad BALAGHI	Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, Maroc
Mohamed BARAKATE	Directeur projet «acide sulfurique et oxyde de fer», Sté. MANAGEM, Maroc
Abdellatif BENIDER	Université Hassan II, Aïn Chock - Casablanca, Association Lalla SALMA de lutte contre le Cancer.
Nezha BEN RAIS-AOUAD	Chef de service de médecine nucléaire, Hôpital Ibn Sina. Directeur de l'Equipe de Recherche en Oncologie Nucléaire Ibn Sina (ERONIS), Faculté de médecine et de Pharmacie, Université Mohamed V - Souissi, Rabat, Maroc
Catherine BRÉCHIGNAC	Secrétaire Perpétuel, Académie des Sciences de France
Ramon CARBONELL	Institute of Earth Sciences, 'Jaume Almera', CSIC, 08028 - Barcelona, Spain
Mohamed DAOUD	Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Ibnou Zohr, Agadir, Maroc
Hassan EL BARI	Université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc Président de l'Association Marocaine des Déchets Solides
Abdessalam EL KHAMLI	Department of Neurosurgery and National Center for Rehabilitation and Neurosciences, Hôpital des Spécialités, Université Mohamed V - Souissi, Rabat, Maroc
Jonathan R. ELLIS	Membre de la Société Royale de Londres et de l'Institut de Physique, Royaume-Uni, Conseiller du Directeur Général de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) au Large Hadron Collider -LHC-, Suisse
Brooks B. ELLWOOD	Louisiana State University, Department of Geology and Geophysics, Baton Rouge, LA-70803, USA

Mohamed ETTARID	Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc
Laurent FALK	Directeur du Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Nancy, France
Serge HAROCHE	Ecole Normale Supérieure et Collège de France, Paris
Hans HERMANN	Swiss Federal Institute of Technology (ETH) - Zurich, Suisse
Guillaume HOLLARD	Centre d'Economie de la Sorbonne, Paris, France
Daniel KAPLAN	Membre de l'Académie des Sciences, France Président de la Société Fastlite
Hassan LASRI	LPMMAT, Université Hassan II - Casablanca, Faculté des Sciences Ain Chock, Casablanca, Maroc
Robert REILINGER	Massachusetts Institute of Technology, Cambridge - MA, USA
Abdelkrim RIMI	Institut scientifique, université Mohammed V Agdal, Rabat, Morocco
Omar SADDIQI	Laboratoire des Géosciences, Université Hassan II, Casablanca, Maroc
Brahim SOUDI	Département des Ressources Naturelles et de l'Environnement IAV Hassan II, Rabat, Maroc
Mossadek TALBY	Directeur de l'Ecole Doctorale - Université Aix-Marseille, Marseille, France
Cédric VILLANI	Professeur à l'Université Claude Bernard - Lyon 1, Directeur de l'Institut Henri-Poincaré, Paris, France



صورة لأعضاء الأكاديمية أثناء دورتها العامة الرسمية لسنة 2013

Photo des membres de l'Académie présents lors de la Session Plénière Solennelle 2013

إن أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات تسعى إلى الدفاع عن هذه المثل العليا كما أكد على ذلك، في ديباجة القانون المحدث لها، مؤسسها المغفور له صاحب الجلالة الملك العظيم الحسن الثاني تغمده الله برحمته، وذلك بوضع من بين أهدافها «إيلاء العلم والبحث العلمي والتقني مكانة رفيعة في سلم القيم الوطنية وتقديم اقتراحات إلى الجهات المعنية تتعلق بالسبل والوسائل الكفيلة بتنمية الفكر العلمي في المجتمع المغربي».

كما أننا نكون أكاديمية لحسن الثاني للعلوم والتقنيات توجد تحت الرعاية السامية لصاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، نعتقد أن في هذه الرعاية يكمن ضمان حريتها واستقلاليتها، ويكون عربونا على عملها وفق الفكر العلمي.

إن أعضاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات يعملون وسيعملون دائما حتى يكونوا أهلا بالثقة الملكية الغالية.

نتمنى النجاح لأشغال هذه الدورة ولأكاديميتنا حتى ترقى إلى ما يطمح له راعيها صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله وأيده، وحتى تساهم «في خدمة تنمية الوطن، وفي تطوير العلوم بأبعادها الكونية».

شكرا على حسن إصغائكم والسلام.

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي،

– إن الدافع الأول الذي جعل علوم الفيزياء تتطور هو بطبيعة الحال الجانب المعرفي، لكونه يستجيب لاهتمامات الفيزيائيين حول الأسئلة المتعلقة بالمادة والكون، وتعتبر هذه الرغبة في معرفة وفهم وشرح الطبيعة والكون من خصوصيات الفيزيائي. إن أنشطتين هو الذي كتب «أن الصراع للعقل المبدع للإنسان من أجل الوصول إلى الفهم المثالي للقوانين التي تتحكم في الظواهر الفيزيائية هو دائم ولاي نتهى»، وهو الذي أضاف أيضا «ما الذي يدفعنا إلى إبداع النظريات الواحدة تلو الأخرى، ولماذا نفكر فيها أصلا؟ الجواب بسيط لأننا نتمتع بالسعادة عند الفهم». وخلال هذه الدورة سنخصص لهذه الأسئلة ثلاث جلسات عامة، الأولى في الافتتاح، والثانية حول فيزياء الطاقات العليا وعلوم الكون، والثالثة حول فيزياء الكونتيك والمادة الصلبة والليونة.

الدافع الثاني والغير أقل أهمية، يتعلق بالتطبيقات المهمة والمتعددة للفيزياء؛ التي هي حاضرة بقوة في بيئتنا، وقد سبق أن أشرنا إلى دور الإلكترونيات، وتطبيقات الفيزياء في الواقع هي كثيرة ومتعددة (الطب – البيئة الراحة المنزلية الاتصالات...) وتساهم في تطوير البحث العلمي في الفيزياء. من كان يتصور أن نظرية الفيزياء الكونية عند اكتشافها كان بإمكانها أن تنجب العديد من التطبيقات العملية والعديد من الاختراعات مثل الليزر، وجهاز الكمبيوتر، والإنترنت، والتصوير بالرنين المغناطيسي R.M.N، والطاقة النووية؛ هل كنا نتصور أن النظرية النسبية الخاصة والنسبية العامة كانتا من شأنهما أن تعرفا تطبيقا عمليا مثل اختراع GPS. وبالنسبة لهذا الجانب سننظم جلسة عامة مخصصة لموضوع الفيزياء وعلوم الهندسة.

وأخيرا، نذكر أن الفيزياء تطورت أيضا بفضل الطلبات الملحة القادمة من العلوم القريبة من الفيزياء مثل الكيمياء، وعلوم الحياة، وعلوم الأرض، وعلوم البيئة، وعلوم الأرصاد الجوية. وفي هذا السياق، سننظم ستة جلسات موازية مخصصة للفيزياء والعلوم الطبية، الفيزياء والزراعة، الفيزياء والكيمياء، الفيزياء وعلوم الاقتصاد، الفيزياء والرياضيات، الفيزياء وعلوم الأرض والبيئة.

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي،

إن القاعدة التي يستند عليها كل هذا النشاط العلمي في ميدان الفيزياء، كغيرها من التخصصات العلمية، هو التحلي بالفكر العلمي الذي يمكن البحث العلمي والباحثين أن يقوموا بدورهم على الشكل الصحيح والمناسب، وسوف أركز على أربعة صفات ضرورية في أي نشاط علمي حقيقي: الصرامة الفكرية، الموضوعية، الحرية، والاستقلالية. في هذا السياق يمكن تذكير مقولة جاستون باشلارد Gaston Bechelard «إن الفكر العلمي يمنعا أن يكون عندنا رأي حول القضايا التي لا نفهمها»، أو مقولة أنشطتين «العلم هم إنتاج عقل الإنسان عن طريق الأفكار والمفاهيم التي يتم إبداعها بكل حرية».

1. إعداد إستراتيجية لتكوين جيل جديد من الباحثين،
2. إصلاح عميق للمنظومة الوطنية للبحث وجعلها قادرة على دعم مخططات القطاعية التي أعطى انطلاقها صاحب الجلالة (المغرب الأخضر، إقلاع في الصناعة émergence، المغرب الأزرق، المغرب الرقمي، الطاقة، أليوتيس...)،
3. تحسين جودة تدريس العلوم على مستوى جميع المراحل الدراسية، وتنمية وتطوير نشر الثقافة العلمية وسط الشباب والرأي العام.

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي،

ابتداء من شهر مارس من السنة الماضية، اقترحت لجنة الأعمال أن يتمحور الموضوع العلمي العام للدورة العامة الرسمية لسنة 2013 حول «الفيزياء».

وبدون الرجوع إلى أصول الفيزياء التي تعود إلى الإغريق، نذكر أن كلمة «الفيزياء» هي أيضا في الأصل كلمة إغريقية وتعني «معرفة الطبيعة»؛ في الحقيقة، إن العلوم الحديثة ولدت مع التجارب في الفيزياء التي أجريت من طرف النابغة جليلي Galilée الذي يعتبر «أب الفيزياء الحديثة»، لكونه جمع بين الفيزياء واستخدام الرياضيات، والذي لا يقبل كمعيار للحقيقة إلا التجربة والتفكير. ومنذ ذلك الحين، عرفت المجالات الرئيسية للفيزياء تطورا مستمرا في الميكانيك، والكهرباء، والبصريات، والديناميك الحرارية، وهيكلة المادة، إلى أن وصلت إلى الثورات الكبرى التي عرفها القرن الماضي مع الفيزياء الكونية ونظرية النسبية. فبالرغم من هذا التطور الحاصل والتقدم الهائل لازالت هناك أسئلة عديدة مطروحة تهم كلا من المجال لا متناهي في الصغر والمكونات النهائية للمادة، والمجال لا متناهي في الكبر على صعيد الكون؛ هل يمكن مثلا أن نوحّد يوما ما في نفس النموذج الجاذبية والفيزياء الكونية؟ ما هي طبيعة الطاقة السوداء المسئلة على تسارع اتساع الكون؟ في مجال الإلكترونيات، وهو المجال الذي يطبع جدا حياتنا اليومية، ونجده حاضرا في جميع أنشطتنا، والذي أدى إلى التطور الهائل للميكروإلكترونيات وتكنولوجيات الاتصال، بفضل نمطة المكونات الإلكترونية (تقسيم قامة micro.processeur على 2 كل 18 أشهر)، هل سنجد نسقا آخر غير الشبه الموصلة semi-conducteurs عندما نصل إلى حدود حجم الذرة؟ ويبدو على هذا المستوى أن علم الأحياء قد تم اللجوء إليه لمساعدة الإلكترونيات باستعمال الخلايا الحية كوسائل اتصال كهربائية منمنمة.

لا شك أن بعض هذه التساؤلات سوف تتضح لنا أكثر خلال هذه الدورة عند استماعنا لضيوفنا الكرام، الذين أشكرهم على قبولهم دعوتنا للمشاركة في أشغال دورتنا، والذين أرحب بهم جميعا وأتمنى لهم مقاما سعيدا بيننا.

1. النهوض بالبحث العلمي من خلال تمويل 12 مشروعا للبحث على المستوى الوطني و3 مشاريع بشراكة مع فرق أجنبية، وذلك باعتماد ميزانية تناهز حوالي 30 مليون درهم،
 2. تشجيع تدريس العلوم ونشر الثقافة العلمية من خلال تنظيم أيام «الشباب والعلم في خدمة التنمية» التي كان موضوعها هذه السنة «الطاقة المستدامة للجميع»، ومن خلال خلق الأندية العلمية داخل المؤسسات التعليمية (حوالي 15 نادي)،
 3. النشر المنتظم لمنشورات الأكاديمية منذ تنصيبها؛ أعمال الدورات، النشرة الإخبارية، رسالة الأكاديمية، ومنذ سنتين المجلة العلمية «حدود في العلوم والهندسة»،
 4. تطوير التواصل العلمي على مستوى تعميم الثقافة العلمية وأيضاً على مستوى التكوين في كتابة المقالات العلمية،
 5. تشجيع الامتياز من خلال توزيع منح الامتياز للفائزين في المباراة العامة للعلوم والتقنيات، التي تنظم بشراكة مع وزارة التربية الوطنية. وتجدر الإشارة هنا، أننا فخورون جداً، لكون أن أحد الفائزين من الفوج الأول قد نجح في اجتياز مباراة الولوج إلى مدرسة البوليتكنيك، وأخيراً استطاع الولوج إلى المدرسة العليا للأساتذة (بزنقة أولم Ulm بباريس)،
 6. حضور متميز للأكاديمية على المستوى الدولي، حيث تميزت السنة الماضية بإعادة انتخاب الأكاديمية نائب الرئيس لشبكة الأكاديميات الإفريقية للعلوم في شخص الأستاذ بوسمينية، وبمشاركة أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات في الاجتماع المنعقد بواشنطن لمجموعة العلوم Sciences G-14 بحضور 14 أكاديمية وطنية أخرى لتحضير اجتماع المجموعة العشرين G 20 في المكسيك حول القضايا المتعلقة بالبيئة. كما تميزت السنة الماضية أيضاً بالتوقيع على اتفاقيتين جديدتين مع كل من أكاديمية العلوم بالهند التي أدت بالفعل إلى تعاون علمي في ميدان الأدوية، وأخرى مع أكاديمية العلوم الصينية التي أدت أيضاً إلى تعاون علمي في ميدان محاربة التصحر، كما أننا نفتخر بكل الأنشطة التي تقوم بها المجموعة بين الأكاديميات للتنمية GID والتي نحیی الحضور بيننا لرئيسها السيد فرنسوا جينو الذي نرحب به.
 7. إجراء الدراسات والخبرات حول قطاع البحث العلمي في المغرب؛ حيث قامت الأكاديمية في هذا الإطار بإنجاز تحت عنوان «تطوير البحث العلمي والابتكار لربح معركة التنافسية: واقع وتوصيات أساسية» وثيقة :
- تشير الانتباه إلى مصير البحث العلمي الوطني وإلى الركود النسبي الذي حصل في السنوات الأخيرة في الإنتاج العلمي وأيضاً على صعيد الموارد البشرية التي تشتغل في ميدان البحث العلمي علينا أن ندرك أن الإنذار الذي أثارته الأكاديمية سنة 2009 حول واقع البحث العلمي بالمغرب في التقرير الذي أنجزته تحت عنوان «من أجل نفس جديد للبحث العلمي والتقني في خدمة التنمية المغرب» لا يزال وارداً،
 - تطمئن، رغم كل هذا، لأنها تسلط الضوء على بعض المكتسبات يجب الاعتراف بها وعلى بعض البؤر ذات الجودة العالية،
 - وأخيراً، تقترح هذه الوثيقة التدابير الواقعية المرجحة لإعطاء نفس جديد للبحث العلمي وتعزيز نتائجه وذلك ب:

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي،

إنه لشرف عظيم أن يحضر معنا في هذه الجلسة الافتتاحية ثلة من الشخصيات التي استجابت لدعوتنا، والتي نتوجه لها بالشكر الجزيل ونرحب بها. كما نتوجه بالشكر الجزيل لممثلي السلك الدبلوماسي الذين شرفونا بحضورهم، فمرحبا بجميع ضيوفنا الكرام.

ويشارك معنا في هذه الدورة عدد من الشخصيات العلمية البارزة، التي أتت من دول مختلفة (فرنسا، الولايات المتحدة الأمريكية، الولاية المتحدة البريطانية، السويد، الصين، إسبانيا، السنغال، الشيلي، البرازيل، البرتغال) والتي ستساهم في تنشيط أشغال الدورة بارتباط مع موضوعها.

إنه كذلك لشرف كبير أن تحضر معنا الأستاذة كاترين بريشينياك Catherine Bréchnac، أمينة السر الدائم لأكاديمية العلوم بفرنسا، والتي أود أن أتوجه إليها مرة أخرى بالشكر الجزيل على مساعدتها القيمة التي تقدمها لأكاديميتنا الفتية، وخاصة في تحضير هذه الدورة.

كما أشكر بالخصوص الضيف الشرفي لهذه الدورة، الأستاذ سرج هاروش Serge Haroche، عضو أكاديمية العلوم الفرنسية، أستاذ بكوليج دو فرانس Collège de France، وأستاذ بالمدرسة العليا للأساتذة بباريس، الحاصل على جائزة نوبل للفيزياء سنة 2012، مع الأمريكي دافيد ويتلندي David Wineland، لتكريم أعمالهما حول القياس ومعالجة الأنظمة الكوانتية الفردية، والحاصل كذلك على الميدالية الذهبية للمركز الوطني للبحث العلمي الفرنسي، والمزداد على أرض وطننا في مدينة الدار البيضاء. كما سيتناول الكلمة خلال هذه الجلسة الافتتاحية الأستاذ سيدريك فيلاني Cédric Villani، الحاصل على ميدالية فيلدس في الرياضيات والذي يوجد هذا الأسبوع بيننا بدعوة من المعهد الفرنسي بالمغرب. بعد قليل، سنستمع إليهم جميعا بمتعة فائقة واهتمام كبير، حيث ستنحور مدخلاتهم حول القضايا التي توجد في قلب موضوع الدورة المتعلق بـ «الفيزياء اليوم وتطبيقاتها».

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي،

على إثر انعقاد الدورة الرسمية العامة، الأخيرة منذ عام، سعت الأكاديمية إلى تطوير وتعزيز مختلف أنشطتها وفقا لمهامها الموكولة إليها بموجب الظهير الشريف المنشئ لها. وستتاح لنا الفرصة، بعد غد، لتقديم التقرير المفصل عن أعمال ونشاط الأكاديمية أثناء السنة المنتهية، وتكون مناسبة لتعميق النقاش وتقييم الحصيلة ودراسة كيفية تحسين وتعزيز عملنا. أود فقط خلال هذه الجلسة التذكير ببعض الأنشطة المتميزة التي نوليها اهتماما خاصا منها :

بسم الله الرحمن الرحيم

أصحاب السعادة،
السيدات والسادة أعضاء الأكاديمية،
أيها الحضور الكريم،
سيداتي سادتي،

إنه من دواعي الاعتزاز أن أتشرف بتناول الكلمة عند افتتاح الدورة العامة الرسمية السنوية للأكاديمية ويعتبر هذا اللقاء مصدر فخر واعتزاز بالنسبة لجميع أعضاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، لكونه، كما ينص على ذلك الظهير المحدث لها، من اللحظات المتميزة في السنة التي يجتمع خلالها كافة أعضاء الأكاديمية بهدف التشاور والتواصل بين المنظومة العلمية الوطنية وشخصيات علمية أجنبية حول أهم القضايا والتساؤلات التي تهم المجتمع، وتسليط الضوء على التقدم المتزايد في العلوم، ودراسة أنجع السبل لتطويرها وازدهارها.

إن هذه الدورة العامة الرسمية للأكاديمية، تنعقد أيضا على غرار سابقتها، في إطار التوجهات السامية لراعيها صاحب الجلالة الملك محمد السادس، حفظه الله، والذي أكد في خطابه السامي عند تنصيب أكاديميتنا «على أهمية الدور الفاعل الذي يقوم به علمائنا بصفة عامة، وأعضاء الأكاديمية بصفة خاصة في الإسهام في رفع ما طرحه التنمية من تحديات، ولاسيما منها تلك المرتبطة بالتنمية البشرية».

نغتني هذه المناسبة المتميزة لنجدد التأكيد لصاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، عن أخلص مشاعر امتناننا وتقديرنا، وعن أبلغ عبارات البر وعظيم الاعتراف على رعايته السامية، وعنايته الكريمة، ودعمه الموصول. كما نعرب لملكنا الهمام عن أذكى مشاعر التوقير والاحترام بعد الموافقة السامية على الاقتراحات المرفوعة إلى أنظار جلالته من قبل مجلس الأكاديمية، رعا لما هو منصوص عليه في القانون المحدث لها، والإفصاح الشريف بإضفاء رضا جلالته على تعيين الأعضاء الجدد للأكاديمية. وبهذه المناسبة نود أن نتقدم إلى جلالة الملك بأسمى آيات الشكر والامتنان على عطفه السامي وتوجيهاته السديدة، راجين من الله سبحانه وتعالى أن نكون أهلا لثقلته الغالية وعطفه الكريم.

كما أن افتتاح هذه الدورة يتزامن مع الذكرى الرابعة عشر من السنة الهجرية لوفاة فقيه المغرب المغفور له صاحب الجلالة الملك العظيم الحسن الثاني طيب الله ثراه، الذي تتشرف وتفتخر مؤسستنا بحمل اسمه الكريم، والذي يعود له الفضل في إنشاء أكاديميتنا، وبمشاعر مشفوعة بالتبجيل والإجلال نكن لفقيه البلاد المجل، أكرم الله مثواه، كل تقدير وامتنان، راجين من الله أن يطره بشآبيب مغفرته وأن يسكنه فسيح جناته، إنه سميع مجيب.

كلمة الأستاذ عمر الفاسي الفهري
أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات
في
الجلسة الافتتاحية الرسمية لأشغال الدورة العامة لسنة 2013
لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات
- الرباط، الأربعاء 20 فبراير 2013 -

العلوم بفرنسا، والأستاذ سيدريك فيلاني Cédric Villani، الحاصل على ميدالية فيلدس (Fields) في الرياضيات سنة 2010، الأستاذ بجامعة كلود برنار بليون بفرنسا.

حفظكم الله، يا مولاي، ورفع بالعز نصركم ولوائكم، وجعلكم ذخرا وملازا لشعبكم الوفي المتشبث بأهداب عرشكم المنيف، وأطال بقائكم لهذه الأمة المستظلة بوارف ظلال الدوحة العلوية العطرة، وأدامكم منارا عاليا وسراج هاديا لمسيرة مغرب الحداثة والتقدم، وحقق على يديكم الكريمتين مزيدا من المجد والنماء والرفعة والسداد، وأقر عينكم بولي عهدكم المحبوب صاحب السمو الملكي الأمير مولاي الحسن، وبشقيقته الجليلة صاحبة السمو الملكي الأميرة للا خديجة، وشد أزركم بشقيقكم السعيد صاحب السمو الملكي الأمير مولاي رشيد، وباقي أفراد أسرتكم الملكية الكريمة، والسلام على المقام العالي بالله. الله يبارك فعمر سيدي.

خديم الأعتاب الشريفة

عمر الفاسي الفهري

حرر بالرباط يوم الجمعة 11 ربيع الثاني 1434 هجرية،
الموافق ل22 فبراير 2013 ميلادية.

جوانب؛ الأول يتعلق بجانب المعرفة وفهم المادة والطبيعة وتطور الكون، والثاني يتعلق بتطبيقات الفيزياء وعلاقتها بعلوم الهندسة، والجانب الثالث يخص استعمال نتائج الفيزياء لفهم العلوم الأخرى مثل علوم الأرض، وعلوم الحياة، وعلم الكيمياء، والعلوم الاقتصادية، وعلوم الرياضيات.

كما استحضر المشاركون في هذه الدورة، خلال مناقشاتهم ومداخلاتهم، توجيهاتكم النيرة، وإرشاداتكم الغالية، منذ تربعكم على عرش أجدادكم الميامين، وخاصة تلك التي جاءت في خطابكم السامي ليوم 20 غشت 2012 بمناسبة ذكرى ثورة الملك والشعب، بخصوص القضايا المتعلقة بالمنظومة التربوية، وقدرتها على تكوين الأجيال الصاعدة، وإعدادها للاندماج الكامل في مسار التنموي الديمقراطي للمجتمع. كما استحضر المشاركون، بكل إكبار وافتخار، نصائحكم السديدة، وعطفكم الغالي، التي ما فتئتم، أعز الله أمركم، تولونهم للنهوض بالبحث العلمي والابتكار التكنولوجي، وهي إرادة ملكية ميمونة تعبر عن رغبة جلالتم الصادقة في أن تصبح أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، التي تحظى برعايتكم السامية وبدعمكم الموصول، مؤسسة مرجعية في مجالات العلم والتكنولوجيا في بلادنا، ورائدة في تحقيق التعاون العلمي، وتوسيع مجال إشعاع العلوم والمعرفة، حتى تساهم في السير قدما بمغربنا العزيز نحو مزيد من التحديث والتطوير، والرقى والازدهار، ليظل منعما بالرخاء والاستقرار، وتتواصل مسيرة نهضته المباركة على طريق العزة والكرامة في ظل عهدكم الزاهر.

وفي ختام أشغال هذه الدورة، تم تقديم التقرير السنوي لأعمال وأنشطة الأكاديمية خلال السنة المنتهية، حيث ناقش أعضاء الأكاديمية مختلف الأنشطة المتعلقة بالمهام المنصوص عليها حسب الظهير الشريف المنشئ للأكاديمية، مع الحرص على أن تقوم الأكاديمية برسم المسالك الملائمة للنهوض برسالتها، وبتعبئة كل الطاقات والوسائل الأكثر نجاعة من أجل تنمية بحث علمي متقدم حتى يساهم في رفع ما تطرحه التنمية من تحديات، وفي امتلاك ناصية المعرفة، لما لها من أثر إيجابي على تقدم بلادنا العزيزة.

وقد تم خلال هذه الدورة، استقبال الأعضاء الجدد بعد ما حظوا بإصفاء رضا صاحب الجلالة حفظه الله على تعيينهم كأعضاء جدد بالأكاديمية. وعلى إثر هذا التعيين المبارك، نجدد لسيدنا المنصور بالله أسمى آيات الشكر والامتنان، راجين من الله سبحانه وتعالى أن نكون أهلاً لثقلته الغالية ورعايته الكريمة.

كما تميزت أشغال هذه الدورة العامة الرسمية بحضور ومشاركة عدة شخصيات علمية رفيعة المستوى، أبرزها الأستاذ سيرج هاروش Serge Haroche، الحاصل على جائزة نوبل للفيزياء سنة 2012، الأستاذ بالمدرسة العليا للأساتذة وكوليج دو فرانس Collège de France، وعضو بأكاديمية العلوم بفرنسا، والذي ازداد ورأى النور على أرضنا العزيزة بمدينة الدار البيضاء سنة 1944، والأستاذة كاترين بريشينيكا Catherine Brechignac، أمين السر الدائم للأكاديمية

بسم الله الرحمن الرحيم، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين

نعم سيدي أعزك الله

مولاي صاحب الجلالة

بعد تقديم ما يليق بمقام سيدنا المنصور بالله من أسمى فروض الطاعة والولاء، وأزكى مشاعر الصدق والوفاء، يتشرف محب وخادم الأعتاب الشريفة، عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، أصالة عن نفسه ونيابة عن أعضاء الأكاديمية وكافة المشاركين في أشغال الدورة العامة الرسمية للأكاديمية لسنة 2013، المنعقدة بمقر أكاديمية المملكة، بعاصمة مملكتكم الشريفة، أيام الأربعاء والخميس والجمعة 09 و10 و11 ربيع الثاني 1434 هجرية، الموافق لـ 20 و21 و22 فبراير 2013، أن يتقدم إلى السدة العالية بالله، صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله وأيده، بأخلص مشاعر التقدير والاحترام، وبأحر عبارات الامتنان والاعتراف، معبرا مولانا أمير المؤمنين عما يغمر المشاركين في هذه الدورة العامة الرسمية من فخر واعتزاز، ومن سعادة وابتهاج لمساهمتهم في أشغالها، مؤكداً لجلالتكم حرصهم التام والتزامهم الراسخ للإسهام في ولوج العلم والبحث العلمي والتقني مكانة رفيعة في سلم القيم الوطنية، وفي إقامة حوار دائم بين عالم البحث والمستجدات التكنولوجية وعالم الأنشطة الاقتصادية والاجتماعية، وفي العمل الصالح لتشجيع تدريس العلوم، ولنشر وترسيخ الثقافة العلمية وسط الشباب المغربي، وتحفيزهم على الاندماج في سياق عصر الانفتاح ومجتمع العلم واقتصاد المعرفة.

وتزامن يوم افتتاح هذه الدورة، مع حلول الذكرى الرابعة عشر لوفاة فقيد الأمة، جلالة المغفور له الملك الحسن الثاني أكرم الله مثواه، الذي يعود له الفضل في إنشاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، والتي تفتخر وتشرف بحمل اسم هذا الملك العظيم. وإحياء لهذه الذكرى الخالدة، قام وفد من أعضاء الأكاديمية بزيارة ضريح الملك محمد الخامس للترحم على الروح الطاهرة لباني المغرب الحديث وحامي الوطن والدكم المبجل جلالة المغفور له الملك الحسن الثاني، ولبطل التحرير وفقيد العروبة والإسلام جدكم جلالة المغفور له الملك محمد الخامس قدس الله روحهما.

مولاي صاحب الجلالة

عاجت الدورة العامة الرسمية لهذه السنة الموضوع العلمي العام المتعلق «بعلوم الفيزياء اليوم وتطبيقاتها». وتمحورت أشغالها حول دراسة ومناقشة التحديات العلمية والتكنولوجية المرتبطة بعلوم الفيزياء وتطبيقاتها، وعلاقتها بشتى مجالات المعرفة العلمية. وقد تم في هذا الصدد، تقديم عروض ذات قيمة علمية عالية، قدمت من طرف عدد من أعضاء الأكاديمية وأقرانهم في العالم، وعلماء باحثين، وشخصيات علمية مدعوة من المغرب وخارجه (فرنسا، السويد، الصين، الولايات المتحدة الأمريكية، البرازيل، البرتغال، الشيلي، إسبانيا). وقد نظمت هذه الدورة على شكل جلسات عمومية وجلسات موازية تمت خلالها معالجة المواضيع المتعلقة بعلوم الفيزياء، شملت ثلاثة

نص البرقية المرفوعة
إلى السدة العالفة بالله
صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله
على إفر اختتام أشغال الدورة العامة الرسمية لسنة 2013

- يوسف أكنين،
- علي البوخاري،
- الطيب الشكلي،
- إدريس وازار،
- محمد آيت قاضي،
- فيليب طانجي Philippe Tanguy

وخلال الجلسة الختامية، تناول الكلمة السيد أمين السر الدائم حيث تطرق لأهم النتائج التي تم استخلاصها من هذه الدورة، وأكد على جودة وغناء المداخلات والمناقشات، كما جدد تشكراته لجميع المساهمين في هذه الدورة وخصوصا للشخصيات التي تقدمت بعروض أو مداخلات في الموضوع العلمي العام لهذه الدورة.

بعد ذلك تم اختتام أشغال هذه الدورة بالمصادقة على نص برقية ولاء وإخلاص مرفوعة إلى السدة العالية بالله صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله والمشفوعة بمشاعر التقدير والعرفان، وبعبارات الشكر والامتنان.

- **هيئة علوم وتقنيات البيئة والأرض والبحر**
 - المدير : إعادة انتخاب السيد أحمد الحسني
 - نائب المدير : إعادة انتخاب السيد إدريس وزار.
 - **هيئة علوم الفيزياء والكيمياء**
 - المدير : انتخاب السيد مصطفى بوسمينة
 - نائب المدير : انتخاب السيد عبد الإله بن يوسف
 - **هيئة علوم التنظير والإعلام**
 - المدير : انتخاب السيد عبد الحق الجاي
 - نائب المدير : إعادة انتخاب السيد عبد المالك عزيزي
 - **هيئة علوم الهندسة، الإبداع والنقل التكنولوجي**
 - المدير : إعادة انتخاب السيد محفوض زياد
 - نائب المدير : إعادة انتخاب السيد علي البخاري
 - **هيئة الدراسات الإستراتيجية والتنمية الاقتصادية**
 - المدير: إعادة انتخاب السيد رشيد بن المختار
 - نائب المدير: إعادة انتخاب السيد محمد بريان
- بعد ذلك، أعطيت الكلمة لأمين السر الدائم لتقديم نتائج انتخاب أعضاء مجلس الأكاديمية، وأعضاء لجنة الأعمال، التي أسفرت على انتخاب :
- أعضاء مجلس الأكاديمية، السادة:
- عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم،
 - مصطفى بوسمينة، نائب أمين السر الدائم،
 - ألبير ساسون،
 - أحمد الحسني،
 - عبد الحق الجاي.
 - أعضاء لجنة الأعمال ، السادة:
 - عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم،
 - مصطفى بوسمينة، نائب أمين السر الدائم،
 - نور الدين العوفي،

للوثيقة التي أعدتها الأكاديمية حول حالة البحث العلمي في المغرب بعنوان «تطوير البحث العلمي والابتكار لكسب معركة التنافسية: الحالة الراهنة والتوصيات الرئيسية».

في ختام هذه المناقشة، تناول الكلمة أمين السر الدائم، لإضافة المعلومات والتوضيحات التالية :

- التزام متزايد واهتمام كبير للأكاديميين في أنشطة الأكاديمية.
 - تهيئ الدورة الرسمية العامة يتم بطريقة جماعية.
 - اعتبار اقتراحات الأكاديميين والنظر في إمكانية تحقيقها.
 - تهانينا للمشاركة الفعالة لأعضاء الأكاديمية المشاركين على الخصوص.
 - المعايير المستخدمة لاختيار الأعضاء الجدد منصوص عليها في القانون المحدث للأكاديمية.
 - المواضيع المقترحة للدورات المقبلة قد تم تسجيلها.
 - مشروع مركز التكوين على التحرير العلمي تم تقديمه إلى IAP التي وافقت عليه، وخصصت له ميزانية قدرها 50 000 يورو. إنه مركز بدون جدران يوجد مقره في الأكاديمية التي تفكر في تنظيم ثلاثة أنشطة بشراكة مع الأكاديمية الوطنية للطب بفرنسا في الرباط (المغرب)، وداكار (السنغال)، وليبر فيل (الغابون).
 - نهئى أنفسنا على نجاح الدورة الرسمية العامة لسنة 2013.
- بعد هذه الإضافات، رفعت الجلسة للسماح للهيئات العلمية بالاجتماع على حدة لعرض حصيلة الأنشطة خلال سنة 2012، وتقديم برنامج عمل لسنة 2013، وأيضاً لانتخاب المدير ونائب المدير لكل هيئة.

الجمعة 11 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 22 فبراير 2013 بعد الزوال

تجديد أجهزة الأكاديمية

الجلسة الختامية

بعد زوال يوم الجمعة 11 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 22 فبراير 2013، واصلت الأكاديمية أشغالها في جلسة مغلقة، قدم فيها مديرو الهيئات العلمية حصيلة الأنشطة لكل هيئة خلال سنة 2012، وبرنامج عمل لسنة 2013. أما بخصوص انتخاب مدير ونائب مدير كل هيئة، فقد أسفرت الانتخابات على النتائج التالية :

• هيئة علوم وتقنيات الأحياء :

- المدير: إعادة انتخاب السيد ألبير ساسون
- نائبة المدير: إعادة انتخاب السيدة رجاء العواد

- التوقيع على معاهدة الشراكة مع الأكاديمية الوطنية للعلوم للهند،
 - التوقيع على مشروع وأنشطة التعاون مع أكاديمية العلوم للبرتغال،
 - المشاركة في اجتماع «مجموعة العلوم» التي أعدت الوثيقة حول البيئة والتي تم اعتمادها في اجتماع المجموعة العشرين في المكسيك،
 - المشاركة في الندوة العلمية (PARAMENDIS V GID) حول موضوع «نحو رؤية متكاملة للتنمية العلمية في دول البحر الأبيض المتوسط» وفي تنظيم ندوات GID في الرباط، واشبيلية، وداكار،
 - مشاركة الأكاديمية في التظاهرات العلمية الدولية داخل وخارج الوطن.
- بعد تقديم هذا التقرير، جرت مناقشة واسعة بين الأكاديميين، أسفرت على التوصيات التالية:
- تنظيم الدورات الرسمية العامة المقبلة حول المواضيع المتعلقة باهتمامات المجتمع. على سبيل المثال موضوع «العلوم والمجتمع» وموضوع «تقدم العلوم وتأثيراته على صعيد الأخلاقيات».
 - تنظيم دورة عادية للأكاديمية حول مسألة «تدبير المعارف».
 - تقديم اقتراحات لتعزيز نسبة النساء كأعضاء في الأكاديمية.
 - إعادة النظر في فكرة الجلسات الموازية وإيجاد الحلول للترجمة الفورية داخلها.
 - تخفيف وتهوية الدورات الرسمية العامة على مستوى البرمجة.
 - اعتبار سنة 2013 سنة محورية للقيام بتقييم أنشطة الأكاديمية والعمل المنجز، وبوضع حصيلة للقرارات والمعايير المحددة والنتائج التي تم الحصول عليها في إطار المشاريع التي دعمتها أو تدعمها الأكاديمية.
 - إعداد وعرض إجراءات تجديد أعضاء الأكاديمية مع ضمان الشفافية وضرورة السرية.
 - تنظيم دورات رسمية عامة حول المواضيع التي لها تأثير مباشر على المجتمع، كموضوع الطاقة مثلا.
 - التفكير في أحسن السبل لتشجيع العلاقات بين العلوم ووسائل الإعلام.
 - تنظيم نقاش حول موضوع «تمويل البحث العلمي العام والخاص».
 - تعزيز علاقات التعاون مع علماء من دول مثل اسبانيا والبرتغال ودول أمريكا الجنوبية وتقديم مقترحات لإشراكهم كأعضاء الأكاديمية.
 - دعم نشاط الأكاديمية في إعداد مؤشرات العلوم والتكنولوجيا، وتوزيع على نطاق واسع

- دعم التظاهرات العلمية؛ حيث تم دعم 21 تظاهرة علمية إلى غاية نهاية فبراير 2013.
- مساهمة الأكاديمية في 5 تظاهرة علمية داخل الوطن و7 تظاهرة خارج الوطن.

- تقديم منح التميز (مباراة 2013) للفائزين في المباراة الوطنية في العلوم والتقنيات التي شارك فيها المتفوقون الأولون الحاصلين على شهادة البكالوريا لسنة 2012 في المسالك العلمية والتقنية، والتي تمكن من خلالها أحد الفائزين على الفوز بالالتحاق بمدرسة بوليتكنيك بباريس، وآخر على ولوج المدرسة العليا للأساتذة Znقة Ulm بباريس،

- تنظيم المدرسة الأكاديمية حول موضوع «النمذجة ومستقبلية الاقتصاد» مفتوحة لطلاب الدكتوراه في الاقتصاد، ومنح جائزة لأحسن أطروحة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية.

• في مجال المساهمة في السياسة الوطنية للبحث العلمي والتقني من خلال:

- إجراء الدراسات والتحقيقات حول قطاع البحث العلمي والتكنولوجي، ونشر الوثيقة الجديدة عن واقع البحث العلمي في المغرب بعنوان «تطوير البحث العلمي والابتكار لكسب معركة التنافسية : الحالة الراهنة والتوصيات الرئيسية» ،

- مساهمة الأكاديمية في أشغال الهيئات الوطنية (المجلس الأعلى للتعليم، اللجنة الوطنية لتنسيق التعليم العالي، المجلس الإداري للمركز الوطني للبحث العلمي والتقني....).

• في مجال تطوير تدريس العلوم، والنهوض بنشر الثقافة العلمية من خلال :

- النهوض وتنمية تدريس العلوم في أقسام الإعدادي والثانوي،

- تنظيم الدورة الثامنة لأيام «الشباب والعلم في خدمة التنمية» تحت الشعار الرئيسي «الطاقة المستدامة للجميع»، والتي شارك فيها حوالي 11400 تلميذ و278 أستاذ،

- تنظيم حلقة المحاضرات،

- المساهمة في تنظيم الندوات، واللقاءات والأيام الدراسية....

- نشر منشورات الأكاديمية (وقائع جلسات الدورة الرسمية 2012، النشرة العلمية رقم 11، 12، و13، رسالة الأكاديمية رقم 16، 17 و18، والمجلد 2 و3 من مجلة الأكاديمية «حدود في العلوم والهندسة».

• في مجال تعزيز حضور الأكاديمية على مستوى الدولي وتقوية التعاون الثنائي والمتعدد الأطراف :

- التوقيع على مشروع التعاون مع أكاديمية العلوم للصين الشعبية،

الأستاذ محمد بركات، مدير المشاريع الكبرى مناخم، المغرب، حول «معالجة النفايات المنجمية والحصول على المواد ذات القيمة المضافة العالية»؛

الأستاذ إبراهيم سودي، معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة، المغرب، حول «سماد النفايات العضوية للمجال الحضري»؛

الأستاذ حسن الباري، جامعة ابن طفيل، القنيطرة، حول «تثمين نفايات المجال الحضري : حالة تكنولوجيا الغاز الحيوي».

في نهاية هذه العروض، جرت مناقشة، سيرها الأستاذ محفوظ زياد، عضو مقيم في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات.

الجمعة 11 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 22 فبراير 2013 صباحا

جلسة مغلقة لتقديم التقرير السنوي حول أعمال ونشاط الأكاديمية

خلال سنة 2012-2013

و

اجتماعات الهيئات العلمية

تابعت الأكاديمية أشغالها في جلسة مغلقة، صباح يوم الجمعة 11 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 22 فبراير 2013. قدم خلالها أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات التقرير عن عمل وأنشطة الأكاديمية خلال سنة 2012-2013.

وفي إطار تفعيل المهام الرئيسية للأكاديمية المنصوص عليها في الظهير الشريف المحدث لها، تابعت الأكاديمية، خلال سنة 2012-2013، القيام بعدة أعمال وأنشطة لاسيما في المجالات التالية :

• في مجال النهوض وتنمية وتمويل البحث العلمي والتكنولوجي من خلال :

- إعداد وتهيئ الدورة الرسمية العامة لسنة 2013،

- تمويل مشاريع البحث التي تم دعمها من طرف الأكاديمية في إطار طلب العروض 2010-2011،

- تمويل مشاريع البحث في إطار التعاون الدولي،

- تتبع مشاريع البحث التي تم دعمها من طرف الأكاديمية في إطار طلب العروض لسنة 2008، والتي مكنت من إعطاء النتائج التالية : 263 منشور علمي في المجلات الدولية، براءة واحدة، و55 دبلوم دكتوراه، و53 ماجستير، وكذلك 7 جوائز،

- الأستاذ محمد بلعش، المدرسة العليا للأساتذة، الرباط، عضو مراسل في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «الخصائص المغناطيسية لبعض النظم الغريبة الأحادية والثلاثية الأبعاد».

بعد هذه العروض، جرت مناقشة، سيرها الأستاذ جون بيير مجورال، جامعة بول ساباتي، تولوز، فرنسا.

الجلسة الموازية الخامسة حول موضوع «الفيزياء وعلوم الأرض والبيئة»، تم الاستماع خلالها إلى خمسة عروض، قدمها على التوالي كل من:

- الأستاذ رامون كاربونيل، المجلس الأعلى للبحث العلمي، معهد علوم الأرض، برشلونة، إسبانيا، حول «غلاف القشرة الأرضية عبر سلسلة جبال الأطلس والريف : دراسة واسعة الزوايا عن طريق الانعكاسات الزلزالية»؛

- الأستاذ عمر صديقي، جامعة الحسن الثاني، الدار البيضاء، حول «التسلسل الزمني الحراري بواسطة انشطار المسار: تطبيقها على السلسلة الجبلية للمغرب»؛

- الأستاذ روبرت رابليانجر، معهد مساشوسيتس للتكنولوجيا، الولايات المتحدة الأمريكية، حول «من أبحاث الفضاء الجيوديزية إلى الجيوديناميك ودراسة الغلاف الجوي»؛

- الأستاذ بروكس ب. إلود، جامعة ولاية لويزيانا، الولايات المتحدة الأمريكية، حول «نموذج مناخ -دريفت وتطوير مقياس الوقت لمرحلة العصر الديفوني المتوسط (أيفليان): بناء على المعطيات الطبقيّة المغناطيسية»؛

- الأستاذ عبد الكريم ريمي، جامعة محمد الخامس أكادال، حول «الأبحاث الجيوفيزائية وتطبيقاتها على البيئة».

بعد هذه العروض، جرت مناقشة، سيرها الأستاذ أحمد الحسني، عضو مقيم في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات.

الجلسة الموازية السادسة حول موضوع «استخدام التقنيات الفيزيائية في الهندسة الخضراء في ميدان الصناعة»، تم الاستماع خلالها إلى أربعة عروض، قدمها على التوالي كل من :

- الأستاذ لوران فالك، مختبر هندسة العمليات، نانسي-فرنسا، حول «مبادئ وتطبيقات التكثيف في هندسة العمليات»؛

- الدكتور محمد سماني، دكتور دولة في علوم الفيزياء، خريج المدرسة الوطنية العليا للجيولوجية بنانسي، فرنسا، مدير جمعية البحث والتنمية.

بعد هذا التقديم، تناول الكلمة على التوالي الأعضاء الجدد لتقديم عبارات الشكر والامتنان لصاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، على إثر الثقة المولوية السامية، وعلى العطف والتشجيع الدائمين الذين يشمل بهما أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، ومجموع المنظومة العلمية المغربية.

الخميس 10 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 21 فبراير 2013 زوالا

الجلسة الموازية الرابعة حول «الفيزياء والفيزياء الكيميائية»

الجلسة الموازية الخامسة حول «الفيزياء وعلوم الأرض والبيئة»

الجلسة الموازية السادسة حول «استخدام التقنيات الفيزيائية

في الهندسة الخضراء للصناعة»

خصصت الجلسة لزوال يوم الخميس 10 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 21 فبراير 2013، لثلاثة جلسات موازية، وهي :

الجلسة الموازية الرابعة حول المحور المتعلق ب «الفيزياء والفيزياء الكيميائية»، الذي تم خلالها الاستماع إلى ستة عروض، قدمها على التوالي كل من :

- الأستاذ يحيى بوغالب، جامعة شعيب الدكالي، الجديدة، ، عضو مراسل في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «استعادة الطاقة الميكانيكية باستخدام تهجين البوليميرات المتفاعلة مع المجال الكهربائي»

- الأستاذ محمد عدو، جامعة ابن طفيل، القنيطرة، حول «الخلايا الضوئية العضوية»

- الأستاذ مصدق طالبي، جامعة إكس - مارسيليا، مدير مدرسة الدكتوراة، مرسيليا، حول «مدرسة الدكتوراة لمرسيليا»

- الأستاذ حسن لعسري، جامعة الحسن الثاني، الدار البيضاء، حول «المواد النانومترية المغناطيسية المعتمدة على معادن الانتقال والتربة النادرة»؛

- الأستاذ زهير السقاط، جامعة محمد الخامس أكادال، عضو مراسل في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «التوليد الضوئي للعمل بالبوليمرات : الحركة الجزئية التي يسببها التوليد الضوئي والهيكلية النانومترية»؛

عند نهاية الجلسة العامة الثالثة، تناول الكلمة الأستاذ عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم، لتقديم قائمة المرشحين الجدد لشغل مقعد عضو أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، بعد الموافقة الملكية السامية على تعيينهم كأعضاء جدد في الأكاديمية، وفقا لأحكام الظهير الشريف المعتبر بمثابة قانون بإنشاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات. ويتعلق الأمر :

بصفة أعضاء مشاركين :

- الأستاذ إيف كوبانس Yves Coppens، الحاصل على مقعد في علم المتحجرات والتاريخ القديم في كوليج دو فرانس، وعضو في المجلس الأعلى للعلوم والتكنولوجيا بفرنسا، وعضو بأكاديمية العلوم، فرنسا؛
- الأستاذ أحمدو لين ندياي Ahmadou Lamine Ndiaye، أستاذ مبرز ودكتور في التعليم البيطري، رئيس شرفي لجامعة كاستون برجي بالسنغال، رئيس أكاديمية العلوم والتقنيات لسنغال، رئيس الأكاديمية الإفريقية للعلوم.

بصفة أعضاء مقيمين :

- الأستاذ علي البخاري، عضو مراسل سابق بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، عميد كلية العلوم بالقنيطرة، المغرب؛
- لأست محفوظ زياد، عضو مراسل سابق بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، نائب عميد سابق لكلية العلوم بالرباط، المغرب؛

بصفة أعضاء مراسلين :

- الأستاذ عبد الجبار المنيرة، أستاذ في علم الأعصاب، شعبة العلوم الأعصاب، بمعهد كارولنسكا بالسويد؛
- الأستاذ المعطي أوهبان، أستاذ الرياضيات بجامعة بوردو، فرنسا؛
- الأستاذ عبد الغني بلوقيد، أستاذ الرياضيات بجامعة القاضي عياض، المدرسة الوطنية للعلوم التطبيقية، أسفي، المغرب؛
- الأستاذ عبد الكريم الفيلاي ملطوف، أستاذ علوم الأحياء الدقيقة والجزيئية بجامعة محمد الخامس أكادال، كلية العلوم، الرباط، المغرب؛
- الأستاذ عبد الله مقسيط، مهندس عام، خريج المدرسة العليا للكهرباء بباريس، مهندس مدني في علوم الأرصاد الجوية، مدير الأرصاد الجوية الوطنية؛

بعد هذه العروض، جرت مناقشة ، سيرها الأستاذ ألبير ساسون، عضو مقيم في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات.

الجلسة الموازية رقم 3 حول «الفيزياء في علوم الاقتصاد»، تم خلالها تقديم عرضين من طرف السادة :

- الأستاذ جيوم هولار، مركز الإقتصاد بالسوربون، فرنسا، حول «الاقتصاد التجريبي ما العلاقة مع الفيزياء»؛

- الأستاذ يو يونغدينغ، عضو أكاديمية العلوم الإنسانية، الصين، عضو مشارك في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «التطور الاقتصادي في الصين».

بعد هذين العرضين، جرت مناقشة ، سيرها الأستاذ نور الدين العوفي، عضو مقيم في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات.

الخميس 10 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 21 فبراير 2013 صباحا

الجلسة العامة الثالثة حول موضوع « الفيزياء وعلوم المهندس»

و

تقديم الأعضاء الجدد للأكاديمية

خصص يوم الخميس 21 فبراير 2013 صباحا، للجلسة العامة الثالثة حول موضوع «الفيزياء وعلوم الهندسة»، تم خلالها الاستماع إلى أربعة عروض قدمها كل من :

- الأستاذ دانييل كبلان، عضو أكاديمية العلوم، فرنسا، رئيس شركة فاستيليت، حول « أجهزة ليزر ذات النبض القصيرة جدا»

- الأستاذ مصطفى بوسميني، نائب أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، رئيس الجامعة الأورومتوسطية بفاس، حول «المواد الخلوية وتطبيقاتها الكهروضغطية»،

- الأستاذ أندري الزاوي، عضو أكاديمية العلوم، فرنسا، عضو مشارك بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول « هل لازال التجريب له دور في ميكانيك المواد»،

- الأستاذ خوان كارلوس كاستيا، الجامعة الكاتوليكية بالشيلى، عضو مشارك بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول « إعادة النظر في رباعي باستور: دور العلم ما بعد الحدائة بالنسبة لاحتياجات المجتمع والكوارث الطبيعية».

بعد هذه العروض، جرت مناقشة، سيرها الأستاذ إدريس وازار، مدير الجلسات.

- الأستاذ عبد الإله بن يوسف ،جامعة محمد الخامس أكдал، عضو مقيم بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «المواد الجديدة لسبينترونيك» (Spintronique).

وتلت هذه العروض مناقشة عامة.

بعد الاستراحة، تابعت الأكاديمية أشغالها بعقد ثلاث جلسات موازية تمت خلالها دراسة ومناقشة المواضيع التالية :

الجلسة الموازية رقم 1 حول «الفيزياء في علوم الحياة»، تم الاستماع خلالها إلى ثلاثة عروض قدمها كل من :

- الأستاذة نزهة بن الرايس، جامعة محمد الخامس سويسي، والأستاذة رجاء الشرقاوي، جامعة محمد الخامس أكдал، عضوة مراسلة في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «طوموغرافيا ينبعث البوزترون (TEP)»؛

• الأستاذ عبد السلام الخليلشي، جامعة محمد الخامس، سويسي، حول «الجراحة الراديولوجية جاما كناف : طريقة علاجية نوروجراحية متقدمة وميدان متميز لتطبيق الفيزياء الطبية»؛

- الأستاذ عبد اللطيف بن يدر، جامعة الحسن الثاني، الدار البيضاء، حول «العلاج بالأشعة في المغرب: الماضي، الحاضر والمستقبل».

بعد هذه العروض، جرت مناقشة، سيرتها الأستاذة رجاء العواد، عضوة مقيمة في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات.

الجلسة الموازية رقم 2 حول «الفيزياء في الزراعة»، تم الاستماع خلالها إلى ثلاثة عروض قدمها كل من:

- الأستاذ سيلفيو كريستانا، EMBRAPA، برازيل، عضو مشارك في أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «الأجهزة الزراعية إحدى فرص التعاون الدولي في مجال العلم والتكنولوجيا، خاصة بين المغرب والبرازيل»؛

• الأستاذ محمد أطريد، معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة، حول «الاستشعار عن بعد في الزراعة»؛

- الأستاذة رياض بلغيتي ومحمد بدرابي، المعهد الوطني للأبحاث الزراعية، حول «تنبؤ المحاصيل الزراعية بالمغرب».

الأربعاء 09 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 20 فبراير 2013 نهاية الصباح

زيارة ضريح محمد الخامس

بمناسبة حلول الذكرى الرابعة عشر (09 ربيع الثاني) لوفاة جلالة المغفور له الملك الحسن الثاني أكرم الله مثواه، والتي تتزامن مع افتتاح الدورة العامة الرسمية لسنة 2013 لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، التي تتشرف وتفخر بحمل اسم هذا الملك العظيم، وإحياء لهذه الذكرى الخالدة، قام وفد من الأكاديمية برئاسة الأستاذ عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم لأكاديمية، بزيارة ضريح محمد الخامس، يوم الأربعاء 09 ربيع الثاني 1434 هجرية الموافق ل 20 فبراير 2013، في نهاية الصباح، للترحم على الروح الطاهرة لباني المغرب الحديث وحامي وحدة الوطن، والذي يعود له الفضل في إنشاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، جلالة المغفور له الملك الحسن الثاني تغمد الله بواسع رحمته، وليلطف التحرير وفقيد العروبة والإسلام جلالة المغفور له الملك محمد الخامس قدس الله روحه. وبروح خاشعة، وقلب مؤمن بقضاء الله، شكلت هذه الزيارة مناسبة لاستحضار بكل فخر واعتزاز نضال أب الأمة جلالة المغفور له الملك محمد الخامس، ورفيقه في الدرب والجهد ووارث سره جلالة المغفور له الملك الحسن الثاني طيب الله ثراهما. وبعد تلاوة الفاتحة، اختتمت هذه الزيارة برفع أكف الضراعة إلى العلي القدير بأن يتغمد جلالة المغفور له الملك الحسن الثاني بواسع رحمته، ويسكنه فسيح جنانه، ويمطر شآبيب رحمته وغفرانه على جلالة المغفور له الملك محمد الخامس وينور ضريحه، وبأن يحفظ أمير المؤمنين صاحب الجلالة الملك محمد السادس بما حفظ به الذكر الحكيم، إنه سميع مجيب وبالإجابة جدير.

الأربعاء 09 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 20 فبراير 2013 بعد الزوال

الجلسة العامة الثانية حول «فيزياء الكونتيك والمادة الصلبة واللينة»

خلال الجلسة العامة المنعقدة يوم الأربعاء 20 فبراير 2013 بعد الزوال، تابعت الأكاديمية أشغالها بدراسة الموضوع حول «فيزياء الكونتيك والمادة الصلبة واللينة»، الذي تم خلالها الاستماع إلى أربعة عروض قدمها كل من:

- الأستاذ جيرالد فولير، جامعة ستانفورد، الولايات المتحدة الأمريكية، عضو مشارك بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «ديناميات الواجهات البيولوجية الناعمة»؛
- الأستاذ محمد داوود، جامعة ابن زهر، أكادير، حول «الارتباطات الكونتية في النظرية الكونتية للمعلومات»؛
- الأستاذ هانس هيرمان، المعهد الفيدرالي للتكنولوجيا، زيوريخ، سويسرا، حول «تعبئة الأسلاك داخل التجاويف وتزايد المساحات»؛

وفي خلق معارف جديدة، وتطوير المعرفة والكفاءات في مختلف المجالات العلمية والتقنية، وأيضا في العدد الكبير من التطبيقات المهمة الناتجة عنها ودورها في الحياة اليومية العادية، وأخيرا أشار إلى الاستفادة من الفيزياء في شتى المجالات العلمية مثل الكيمياء، وعلوم الحياة، وعلوم الأرض والبيئة، وعلوم الزراعة، وعلوم الأرصاد الجوية والرياضيات....

بعد كلمة أمين السر الدائم، أعطيت الكلمة للأستاذة كاترين بريشينيكا (Catherine Bréchnignac)، أمينة السر الدائمة لأكاديمية العلوم الفرنسية، التي قدمت عرضا افتتاحيا حول موضوع: «أين وصلنا في فهم المکانیزمات التي تنظم المادة؟».

وفي إطار نفس الجلسة الافتتاحية، أعطيت بعد ذلك الكلمة إلى الأستاذ سيرج هاروش Serge Haroche، ضيف الشرف للدورة العامة الرسمية، والحاصل على جائزة نوبل للفيزياء سنة 2012، الذي قدم عرضا حول موضوع «احتباس الفوتونات في علبة وإحراز (قط شرودينجر) من الضوء».

وقدم خلال نفس الجلسة الافتتاحية الأستاذ سيدريك فيلاني Cédric Villani، الحاصل على ميدالية فيلدس Fields سنة 2010، عرضا ثالثا حول موضوع «الرياضيات والفيزياء زواج مثمر: بعض التأملات في مغامرات الأنثروبي ما بين الرياضيات والفيزياء».

مباشرة بعد الجلسة الافتتاحية، تم انتخاب السيد إدريس وازار مدير للجلسات خلفا للسيدة رجاء العواد الذي انتهت ولايتها.

بعد الاستراحة، تابعت الأكاديمية أشغالها في جلستها العامة الأولى حول موضوع «فيزياء الطاقات العليا وعلوم الكون»، والتي تم أثنائها الاستماع إلى ثلاثة عروض قدمها كل من:

- الأستاذ جان ميشل أليمي، مختبر الكون والنظريات، مرصد باريز، فرنسا، حول «أصل هيكل الكون وطبيعة الطاقة السوداء»؛
- الأستاذ جون إليس، من المركز الأوروبي للأبحاث النووية (جنيف، سويسرا)، حول «البحث عن بوزون هيكس وما بعد في إطار مشروع LHC»؛
- الأستاذ الحسن سعيدي، جامعة محمد الخامس أكادال، عضو مقيم بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «الكون سوبيرسيمتریک».

بعد هذه العروض، جرت مناقشة واسعة بين الأكاديميين، سيرت ونشطت بالخصوص من طرف السيد إدريس وازار مدير للجلسات.

وأشار أيضا في كلمته أن هذه الدورة تتميز بحضور عدد من الشخصيات العلمية ذات المستوى الرفيع، التي أتت من دول مختلفة (فرنسا، الولايات المتحدة الأمريكية، الولاية المتحدة البريطانية، السويد، الصين، إسبانيا، السنغال، الشيلي، البرازيل، البرتغال) والتي ستساهم في تنشيط أشغال الدورة بارتباط مع موضوعها. ومن بين أبرز الشخصيات المدعوة نجل الأستاذ سيرج هاروش Serge Haroche، الحاصل على جائزة نوبل للفيزياء سنة 2012، أستاذ بالمدرسة العليا للأساتذة بباريس، وبكوليج دو فرانس Collège de France، وعضو بأكاديمية العلوم بفرنسا، والأستاذة كاترين بريشينيكا Catherine Brechignac، أمينة السر الدائمة لأكاديمية العلوم بفرنسا، والأستاذ سيدريك فيلاني Cédric Villani، عالم في الرياضيات، والحاصل على ميدالية فيلدس Fields سنة 2010، أستاذ بجامعة كلود برنار بليون بفرنسا، والأستاذ جوناتان إليس Jonathan R. Ellis، عضو في أكاديمية العلوم الإنجليزية، ومستشار المدير العام للمركز الأوروبي للأبحاث النووية (CERN).

كما ذكر في كلمته الافتتاحية بالأنشطة الرئيسية التي قامت بها الأكاديمية خلال سنة 2012، من أهمها :

1. تشجيع البحث العلمي بتمويل مشاريع البحث،
2. الاهتمام بموضوع تدريس العلوم ونشر الثقافة العلمية، من خلال تنظيم أيام الشباب والعلم وخلق الأندية العلمية،
3. النشر المنتظم للمنشورات الأربعة للأكاديمية من بينها المجلة العلمية «حدود في العلوم والهندسة»،
4. تعزيز التواصل العلمي،
5. تشجيع التميز عن طريق توزيع منح الامتياز على الفائزين في المباراة العامة في العلوم والتكنولوجيا،
6. حضور متميز للأكاديمية على الصعيد الدولي وتنمية التعاون العلمي الدولي،
7. القيام بالدراسات والأبحاث حول قطاع البحث العلمي في المغرب، ونشر الوثيقة حول حالة البحث العلمي في المغرب بعنوان «تطوير البحث العلمي والابتكار لكسب معركة التنافسية: الحالة الراهنة والتوصيات الرئيسية»،

وبخصوص أشغال هذه الدورة، ذكر الأستاذ عمر الفاسي الفهري بالموضوع العلمي العام الذي تم اختياره لهذه الدورة، والذي يتمحور حول موضوع «الفيزياء اليوم وتطبيقاتها». وشدد في كلمته على الدور الحاسم الذي تلعبه اليوم الفيزياء في فهم الطبيعة والكون،

انعقدت الدورة الرسمية العامة لسنة 2013 لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات بقاعة المحاضرات بمقر أكاديمية المملكة بالرباط أيام 10-09 و 11 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 21-20 و 22 فبراير 2013، حول الموضوع العلمي العام «الفيزياء اليوم وتطبيقاتها».

الأربعاء 09 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 20 فبراير 2013 صباحا

الجلسة الافتتاحية

والجلسة العامة الأولى حول موضوع «فيزياء الطاقات العليا وعلوم الكون»

انعقدت الجلسة الافتتاحية لأشغال الدورة العامة الرسمية لسنة 2013 لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات بقاعة المحاضرات بمقر أكاديمية المملكة بالرباط يوم الأربعاء 09 ربيع الثاني 1434 الموافق ل 20 فبراير 2013 على الساعة التاسعة صباحا بحضور عدد من الشخصيات المدعوة.

في الكلمة الافتتاحية للأستاذ عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، ذكر أن انعقاد الدورة العامة الرسمية السنوية تعتبر دائما من اللحظات المتميزة في حياة الأكاديمية، وهي مناسبة للقيام بإحدى أهم أنشطة الأكاديمية، التي ينص عليها القانون المحدث لها، ألا وهي جمع كل أعضاء الأكاديمية بصفة منتظمة مرة في السنة، بهدف تعزيز التشاور والتواصل بين المنظومة العلمية الوطنية وشخصيات علمية أجنبية حول أهم القضايا والتساؤلات التي تهم المجتمع، بغرض تسليط الضوء حول المستجدات والتقدم الحاصل في ميدان العلوم، وكذلك فرصة لمناقشة أنجع السبل لإعطاء دفعة جديدة للعلوم والتكنولوجيا في بلادنا، والعمل على الانخراط السريع لقطاع البحث والابتكار في إنتاج القيمة المضافة في جميع قطاعات الاقتصاد المغربي. كما ذكر بأن انعقاد هذه الدورة الرسمية لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات يتم في إطار التوجيهات السامية لراعيتها صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله وأيده، الذي أكد في خطابه السامي عند تنصيب الأكاديمية «على أهمية الدور الفاعل الذي يقوم به علماءنا بصفة عامة، وأعضاء الأكاديمية بصفة خاصة في الإسهام في رفع ما تطرحه التنمية من تحديات، ولاسيما منها تلك المرتبطة بالتنمية البشرية». كما أعرب بهذه المناسبة، لصاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، عن أخلص مشاعر التقدير والاحترام، وعن أحر عبارات الامتنان والاعتراف، على إثر الرعاية الملكية الكريمة والعناية الميمونة والتشجيع الموصول الذي ما فتئ يوليه جلالته للأكاديمية. كما أثنى أيضا على جلالة الملك الراحل الحسن الثانيغفده الله برحمته ، و قدس روحه الطاهرة، والذي يرجع له الفضل في إنشاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، والذي يصادف يوم 09 ربيع الثاني ذكرى وفاته يوم افتتاح الدورة.

محضر أشغال الدورة الرسمية العامة

لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات

لسنة 1434 هجرية الموافق لسنة 2013 ميلادية

مع تطور المفاهيم النظرية في الفيزياء وكذا تطور وسائل الحساب والتحليل التجريبي واستعمال الآلات الكبيرة الجديدة كمسارع جسيمات البروتون (Large Hadrons Collider LHC) تسمح لمجموعة الفيزيائيين الاعتقاد أننا نوجد حاليا على مشارف اكتشافات علمية ضخمة ستمكن دون شك على فهم أفضل للمادة والكون.

إن الدورة العامة الرسمية 2013 لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات هي مناسبة لعرض ومناقشة التطورات الحديثة في علوم الفيزياء وكذا انعكاساتها على معرفتنا للمادة والكون وكذلك باعتبار أهميتها في تطوير مختلف القطاعات الصناعية والإنتاجية بالمغرب.

مقدمة

تعتبر الفيزياء من العلوم الطبيعية الحقة التي تستمد اسمها من كلمة إغريقية (physikê) والتي تعني "معرفة الطبيعة"، فمنذ الأعمال العلمية لكليلي (Galilée) في القرن السابع عشر حول الجاذبية (ميكانيك الحركة)، كانت الفيزياء رائدة وسباقة لوضع أسس المنهجية العلمية كما نعرفها اليوم والتي تستند على الملاحظة، والفرضية والنظرية والتجربة النظامية القابلة للتكرار ومواجهتها مع النظرية والافتراضات.

يسعى الفيزيائي إلى فهم واكتشاف قوانين الطبيعة والآليات التي تتحكم في سلوك وتفاعلات المادة عبر المكان والزمان لتدوينها على شكل قوانين عامة وكمية.

مع مرور الزمن تفرعت الفيزياء إلى عدة تخصصات من بينها الميكانيك وعلم الفلك، فيزياء الجزيئات والتفاعلات، الفيزياء الكونية وفيزياء الأمواج، فيزياء المادة المكثفة وفيزياء الإحصاء. تحت هذا التصنيف الملخص وشيئا ما تجريبي، تكمن عدة ميادين علمية كالكهرومغناطيسية والإلكترونيك، البصريات والضوئيات، والفيزياء الفلكية، والفيزياء النووية وفيزياء البلازما، والديناميك الحرارية، وفيزياء المواد الصلبة، وفيزياء المواد والفيزياء الحيوية، فيزياء الإشارة، إلخ.

إن كل هذه الميادين العلمية توجد في قلب الاختراعات وفي قلب التنمية الصناعية في عالمنا الحديث مثل : الكهرباء، الاتصالات، الإلكترونيك، السيارات، الطيران، البصريات والضوئيات، المعدات الطبية للتشخيص والتطبيب، أدوات التحليل والتصنيع والإنتاج، إلخ.

توجد الفيزياء، باختصار، تقريبا في كل قطاعات الأنشطة الصناعية والإنتاجية.

وتجدر الإشارة أننا محتاجون إلى المعرفة العلمية والتقنية المرتبطة بالفيزياء في مختلف مخططات التنمية القطاعية التي دشنها المغرب مثل مخطط الانبثاق (émergence) في الميدان الصناعي (الطيران والسيارة، الإلكترونيك، الاتصالات والتقنيات الرقمية، النسيج، المناجم والصناعة التحويلية، الصناعات الكيماوية) أو مخطط الطاقة الشمسية في مجال الطاقات المتجددة. كل هذه المخططات القطاعية تحتاج من جهة إلى تكوينات جيدة ومن جهة أخرى إلى نشاط علمي وتكنولوجي ذات مستوى.



المملكة المغربية

أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات

أشغال

الدورة العامة الرسمية

لسنة 2013

الرباط : 20 - 22 فبراير 2013



صاحب الجلالة الملك محمد السادس - نصره الله -
راعي أكاديمية الحسن الثاني
للعلوم والتقنيات



المملكة المغربية

أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات

أشغال الدورة العامة الرسمية
لسنة 2013

الرباط : 20 - 22 فبراير 2013