

# Bulletin d'Information de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

n°18

décembre 2015

«Servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale»

Sa Majesté Le Roi Mohammed VI.

(Extrait du discours d'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, 18 mai 2006)

*Périodique semestriel d'information et de communication de l'Académie*

**Patrimoine géologique marocain et développement durable**

**La chimie et les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle**

**Champs de recherche en sciences physiques au Maroc**

**Le boson de Higgs**

**Entropimétrie électrochimique**

**Taux de change et diversification des exportations**

**Hommage au mathématicien Alexandre GROTHENDIECK**



# Bulletin d'Information de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

**n°18**

décembre 2015

«Servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale»  
Sa Majesté Le Roi Mohammed VI.  
(Extrait du discours d'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, 18 mai 2006)

*Périodique semestriel d'information et de communication de l'Académie*

*Publié par :*

**L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques**

**Siège : Km 4, Avenue Mohammed VI (ex Route des Zaers) - Rabat.  
Tél : 0537 75 01 79 Fax : 0537 75 81 71 E-mail : [acascitech@academiesciences.ma](mailto:acascitech@academiesciences.ma)**

**Site internet : [www.academiesciences.ma](http://www.academiesciences.ma)**

**Directeur de la publication : Omar FASSI-FEHRI**

**Rédacteur en Chef : Mohamed AIT KADI**

**Comité de rédaction:**

**Daoud AIT KADI** (Collège de la Modélisation et de l'Information)  
**Omar ASSOBEI** (Collège des Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer)  
**Mohamed BERRIANE** (Collège des Etudes Stratégiques et Développement Economique)  
**Ali BOUKHARI** (Collège d'Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique)  
**EI Mokhtar ESSASSI** (Collège des Sciences Physiques et Chimiques)  
**Abdelkrim FILALI-MALTOUF** (Collège des Sciences et Techniques du Vivant)

**Dépôt légal : 2007 / 0067  
ISSN : 2028 - 411X**

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

**Impression: Imprimerie LAWNE  
11, rue Dakar, 10040 - Rabat**





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



# Sommaire

<b>Editorial</b> .....	<b>9</b>
<b>Patrimoine géologique marocain et développement durable, A. EL HASSANI</b> .....	<b>11</b>
<b>La chimie et les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle, E.M. ESSASSI</b> .....	<b>37</b>
<b>Champs de recherche en sciences physiques au Maroc</b> .....	<b>41</b>
<b>Le boson de Higgs, la particule la plus «chère» de tous les temps, R. CHERKAOUI EL MOURSILI</b> .....	<b>46</b>
<b>Entropimétrie électrochimique : principes et applications aux batteries lithium-ion, R. YAZAMI</b> .....	<b>48</b>
<b>Does exchange rate misalignment facilitate export diversification in developing countries?, K. SEKKAT</b> .....	<b>59</b>
<b>Focus : Journée en hommage au mathématicien Alexandre GROTHENDIECK</b> .....	<b>67</b>
<b>Activités de l'académie</b> .....	<b>103</b>
• Les rencontres Galien-Ibn Sina .....	104
• Journée sur l'enseignement des sciences.....	108
• Journée sur génomique et cancers .....	111
• Journée "les jeunes et la science au service du développement" .....	115
<b>Appui à la recherche scientifique et technique</b> .....	<b>117</b>
• Nanocomposites écologiques à partir de ressources naturelles espagnoles et marocaines, M. LAHCINI.....	119
• Collaborations science – industrie et innovation dans les firmes françaises. Impacts et déterminants, S. AISSAOUI.....	125
• Le Congrès de l'Arganier : une opportunité de capitalisation des connaissances et de promotion de la recherche, A. FILALI-MALTOUF & A. AITLHAJ.....	127
<b>Nouvelles des académiciens</b> .....	<b>131</b>





## Editorial

Ce numéro du Bulletin d'Information célèbre le dixième anniversaire de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Dans les considérants du dahir instituant l'Académie, l'accent a été mis sur «le rôle des échanges et de la communication dans la valorisation, l'accroissement et la diffusion du savoir scientifique et des savoirs-faire technologiques». Le chemin parcouru par le Bulletin depuis son premier numéro paru en juin 2007 et sa diffusion à un public aussi large conforte l'Académie dans ce rôle.

Le Bulletin reflète la vie de l'Académie dans l'accomplissement de l'ensemble de ses missions. Son contenu et sa politique éditoriale sont définis sous la direction de Monsieur le Secrétaire Perpétuel et d'un Comité de Rédaction composé des représentants des Collèges et des responsables de la direction scientifique et du programme d'appui à la recherche scientifique et ce, selon les logiques qui lui ont été assignées par l'article 23 «Publications» du règlement intérieur de l'Académie qui dispose «... Le bulletin d'information est une publication biannuelle; y figurent des informations générales, les discours, les notices nécrologiques, les rapports, la liste des prix décernés, le bulletin bibliographique des ouvrages et périodiques reçus ainsi que tous documents que le Secrétaire perpétuel décide d'y insérer».

Ce numéro, le dix-huitième, témoigne de la poursuite jamais interrompue de la parution du Bulletin qui s'attachera dans l'avenir à poursuivre son œuvre dans les conditions qui ont présidé à sa naissance. Nous nous engageons à le perfectionner en permanence. Les membres de l'Académie, individuellement ou à travers leurs collèges respectifs, ont fourni une contribution remarquable au Bulletin pour laquelle nous tenons à les remercier. Qu'il nous soit permis de remercier également l'administration de l'Académie pour son appui et son dévouement.

La rédaction



## Patrimoine géologique marocain et développement durable \*

Ahmed EL HASSANI

Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Maroc  
a.elhassani@academiesciences.ma

### Résumé

*Au Maroc, on note une prise de conscience de plus en plus accrue de la nécessité de préserver et de valoriser le patrimoine naturel paléontologique et géologique dans un contexte nouveau, véritable paradigme relatif au développement durable économique et social. Pour éclairer cette thématique, on présente ici quelques exemples de ce patrimoine pour relater sa richesse géologique et attirer l'attention du public, en général, et de l'administration, en particulier, sur la nécessité de sauvegarde de ce patrimoine naturel. On décrit, par ailleurs, les outils d'une bonne connaissance géo-touristique à travers la caractérisation des deux stratotypes marocains, du géoparc de Mgoun et des principaux affleurements, surtout paléozoïques, permettant de mieux connaître, pour valoriser et surtout protéger ces richesses naturelles dont dispose le Maroc. Pour cela, on propose quelques idées et mesures qui pourraient aider les décideurs à une meilleure gestion de ce patrimoine.*

### Moroccan Geological Heritage and Sustainable Development

#### Abstract

*In Morocco, there is a growing awareness around the development of the paleontological and geological natural heritage and its contribution to both economic and social development. To clarify this issue, we present here some examples of this heritage to relate its geological wealth and attract public attention in general and administration in particular, to safeguard this natural heritage. This paper describes also the geo-tourism knowledge tools through the characterization of two Moroccan stratotypes, the Mgoun Geopark and outcrops, mainly Paleozoic, to know better, value and protect these Moroccan natural resources. For this, we propose some ideas and measures that could help policy makers to better heritage management.*

### I- Introduction



La géologie marocaine présente des affleurements considérés, mondialement, parmi les meilleurs et les plus complets de l'échelle des temps géologiques. A juste titre le Maroc est qualifié par la communauté des géoscientifiques de «Paradis des Géologues».

Mais, les richesses/ressources naturelles, dont dispose le Maroc, subissent une détérioration irréversible: fossiles et minéraux faisant l'objet actuellement de pillage, d'exploitation

abusive, de vente et d'exportation. Les mesures réglementaires sont-elles suffisantes pour sa protection, sa valorisation et sa préservation? Ou bien s'agit-il d'un système intégré où interviennent divers facteurs humains à différents niveaux? Il s'agit là d'une problématique complexe nécessitant, de notre part d'émettre un avis académique pour faire connaître ce patrimoine, le valoriser et surtout le protéger pour que le Maroc demeure une référence mondiale en géologie.

La présente étude est une contribution qui encourage principalement la préparation d'un inventaire national des espaces géologiques et des espèces (minérales et fossiles) nécessitant une conservation ou une gestion rationnelle. Cet inventaire, en plus de l'étude réglementaire

\* Conférence présentée au 7<sup>ème</sup> Forum Parmenides -GID-Dubrovnik 17-19 mars 2015.

**La géologie marocaine** est connue pour sa richesse exceptionnelle aussi bien du point de vue minéralogique que paléontologique, possédant ainsi un patrimoine fossilifère très riche et très varié à travers ses nombreux affleurements. Le Maroc constitue ainsi une source irremplaçable dans la connaissance de l'Histoire de la Terre. Chacune de ses régions se caractérise par un nombre impressionnant de sites géologiques, de gîtes minéralogiques variés et de gisements fossilifères remarquables. Du point de vue paléontologique, il constitue un endroit de rêve pour tous les géologues-paléontologues avec de nombreux niveaux riches en restes organiques depuis le Précambrien jusqu'au Quaternaire. Ainsi, le Maroc montre une importante géo-biodiversité (ou biodiversité historique). Faut-il rappeler que la biodiversité occupe une place de plus en plus importante dans les préoccupations de l'opinion publique, du monde politique, mais surtout des scientifiques, car protéger la biodiversité est devenu aujourd'hui un impératif dont la prise de conscience est relativement récente. Chacun d'entre nous est concerné car la diversité biologique constitue une condition essentielle de l'environnement humain et de sa conservation. C'est pour cela que l'un des objectifs premiers des scientifiques est de comprendre la complexité des processus qui déterminent l'actuelle biodiversité sur terre. Dans cette optique, les scientifiques attirent l'attention sur le fait que le monde actuel se lit pour une très grande part à la lumière de son passé. Les formes de vie qui existent aujourd'hui sur la planète sont celles d'un instant; leur évolution, leur disparition, ne sont intelligibles que si on les replace dans leur très longue histoire. Pour retracer l'histoire de la biodiversité et pour l'analyser, il faut donc faire appel aux fossiles qui sont ainsi les clés de la compréhension de l'évolution de la biodiversité à travers les temps géologiques.

susmentionnée, comblera une grande lacune qui persiste dans le Plan Directeur des Aires Protégées du Maroc, établi récemment à l'initiative du Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à lutte contre la désertification. En effet, celui-ci a identifié un large réseau d'espaces à protéger en insistant principalement sur les valeurs biologiques et écologiques ; les valeurs géologiques n'y étant évoquées que de manière occasionnelle et souvent indirecte.

Parmi les propositions, l'accent sera mis sur les moyens d'exploitation durable des ressources et sur des mises en valeurs conservatrices de ces ressources (exploitations pour l'éducation, l'éco-tourisme).

## II- Vision et problématique

La notion de patrimoine géologique dérive de la notion de patrimoine naturel qui reconnaît que des éléments de la nature font partie des biens communs, tels que les richesses géologiques, minéralogiques et paléontologiques. En tant que patrimoine naturel, le patrimoine géologique doit être considéré comme un bien commun d'une collectivité, d'un groupe d'hommes, de l'humanité, considéré comme un héritage transmis par les ancêtres.

Dans un souci de protection et de valorisation du patrimoine paléontologique et géologique, notre vision pour un développement durable et sociétal s'articule autour de la question suivante : quelle est la relation qui existe entre la préservation du patrimoine naturel et le développement durable ?

Pour y répondre, nous sommes face à plusieurs points importants :

- nous disposons d'un slogan : **«Le Maroc : Paradis du géologue»** à cause de la qualité de l'archivage, de la richesse des terrains en fossiles, de l'importance et qualité des terrains, des affleurements des plus anciens aux plus récents, de l'accessibilité des sites,...
- comment sauvegarder ce patrimoine pour que le Maroc demeure le paradis du géologue quand on sait que les détériorations de ce patrimoine sont irréversibles, à cause des pillages de sites ou de leur exploitation abusive entraînant des ventes et des exportations illégales de ces richesses naturelles ?
- que faire pour mettre fin à cette détérioration, surtout que le Maroc possède une grande richesse en curiosités géologiques (diversité des roches; abondance de fossiles variés et bien conservés; stratotypes; affleurements d'événements géologiques pédagogiques; paléo-environnements variés : récifs, dépôts de mers profondes, de continents (rivières, lacs, glaciers); belles structures tectoniques et volcaniques; métamorphismes : minéraux et événements variés; volcanismes bien conservés (de divers âges : précambrien, primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire) et espèces minérales diverses; mines et cortège diversifié de minéralisations exploitées; diverses formes sculptées dans les séries géologiques; panoramas de paysages divers)?

**Le patrimoine dans sa définition** est un bien qu'on tient par héritage de ses ascendants. Il est par définition tout objet du passé, un objet de valeur et une sorte de trésor. Le patrimoine, pris ici dans sa composante géologique, englobe tous les objets et sites (géosites ou géotopes) symbolisant la mémoire de la terre.

Au Maroc existent deux types de patrimoines :

- *in situ* : ce sont les roches à l'affleurement, les fossiles, les mines aussi bien en surface qu'en subsurface, les sols et les minéraux, les structures géologiques et les paysages ;
- *ex situ* : ce sont les collections géologiques des établissements universitaires, des ministères de tutelle, des musées et des magasins (bazars) ainsi que les publications, les cartes géologiques, les lames microscopiques, les archives, etc.

Sur le plan géologique, le Maroc est considéré par la majorité des géo-scientifiques comme un témoin important de la mémoire de la Terre. Actuellement, on note une prise de conscience de plus en plus accrue de la préservation de l'environnement et de la sauvegarde du patrimoine, qu'il soit culturel ou naturel. Il y a donc un nouveau concept, véritable paradigme relatif au développement durable.

Le Maroc témoigne aussi de plusieurs paléo-environnements géologiques :

- des variations climatiques : polaire à équatoriale,
- des biotopes variés :
  - marin : profond, peu profond, littoral, ...
  - continental : fluvial, lacustre, ...
- une répartition des organismes selon les environnements,
- des extinctions de masses de faunes en relation avec des facteurs internes et externes,
- des relations géodynamiques de la terre et ses environnements

Cependant, des effets « pervers » subsistent, telle l'exploitation abusive pour ne pas dire pillage par les populations locales qui repèrent les sites et les gisements découverts par les scientifiques ou encore la localisation de sites par les trafiquants étrangers dont les publications sont une source d'informations. Il est vrai par ailleurs que ces sites constituent des sources de revenus non négligeables pour la population de

ces régions où sévissent souvent des conditions climatiques et des conditions d'enclavements très dures.

### III- Contexte et intérêt pour la sauvegarde du patrimoine géologique

Pour donner envie de protéger, il faut d'abord faire connaître ce patrimoine. Le Maroc, comme on peut le lire sur les cartes géologiques, est parmi les pays qui relatent de manière assez complète l'histoire géologique du globe (de l'Archéen 3 Ga, au Quaternaire). Il présente, à ce titre, un intérêt majeur pour la communauté scientifique internationale, ce qui lui vaut d'être régulièrement visité par un grand nombre de géologues des cinq continents.

En plus de la grande diversité des terrains géologiques, plusieurs stratotypes et groupes de fossiles ont été identifiés au Maroc où ils sont le mieux représentatifs à l'échelle planétaire.

Le Maroc présente également plusieurs curiosités (paysages) géologiques rares de part le monde (exemple: les mud-mounds Dévonien de Hamar Lakhdad dans le Tafilalet, les péridotites de Beni Bousera dans le Rif interne, les nombreuses grottes, ...).

Ces richesses restent de nos jours méconnues par la majorité des marocains, y compris les gestionnaires des espaces naturels, voire la communauté scientifique non spécialisée. Ceci incite à des études de type « inventaire » auxquelles les géologues se livrent rarement, mais qui ont un rôle fondamental dans la sensibilisation du public à la sauvegarde, à la valorisation et à l'utilisation rationnelle de ce patrimoine.

Parmi les nombreuses valeurs que possèdent les sites géologiques, la valeur commerciale prédomine actuellement au Maroc ; elle engendre une exploitation massive, voire abusive, des richesses minérales et fossilifères qui conduiront inévitablement à leur disparition à court ou à moyen termes. Un commerce florissant (national et surtout international) s'est développé au détriment des raretés minéralogiques et fossilifères. Les autres valeurs (scientifiques, éducatives, culturelles, touristiques, esthétiques, ...) restent méconnues, sinon très mal satisfaites.

Il résulte de cette ignorance une faible sensibilisation à l'échelle nationale envers la conservation et/ou la valorisation respectueuse des « sites patrimoniaux ».

Consciente de la gravité de ces exploitations abusives, la Direction de la Géologie (Ministère de l'Énergie et des Mines) a lancé une étude pour l'établissement de mesures réglementaires pour remédier à la disparition progressive du patrimoine géologique national. Ces mesures devraient, entre autres, prévoir l'établissement des listes de spécimens de fossiles et de minéraux pouvant faire l'objet d'interdiction ou de restrictions à l'exportation et instituer des espaces géographiques protégés.

#### IV- Présentation de quelques exemples du Patrimoine géologique marocain

1) L'une des curiosités géologiques du patrimoine marocain reste manifestement **les monticules dévoniennes de Hamar Lakhdad dans le Tafilalet**, à l'Est d'Erfoud (fig. 1-a et 1-b) et qui sont visités chaque année par les scientifiques et aussi les touristes.



**Figure 1-a.** Vue générale des mud-mounds (au nombre de 48) dévoniens de Hamar lakhdad (kess-kess)

Ces structures, assez particulières, ont été décrites dès le début du siècle dernier par Nicolas Menchikoff, géologue pétrolier franco-russe, comme une accumulation d'origine récifale (Roch, 1934), divers termes ayant été utilisés par la suite par nombre d'auteurs:

- protubérances ou bulles pleines (Roch, 1934),
- curieux pitons récifaux (Massa et al., 1965),
- formations récifales du Dévonien inférieur (Hollard, 1963),
- récifs du Dévonien inférieur (Hollard, 1974 ; Michard, 1976),
- mud mounds (Gendrot, 1974 ; Brachert et al., 1992 ; Hüssner, 1994 ; Belka, 1998),
- buildups, reef-mounds ou mud mounds (Tönebohn, 1991),
- venues hydrothermales localisées au droit du massif magmatique de Hmar Lakhdad (Mounji et al., 1996 ; Belka, 1998),
- monticules de boue (Belka et al., 2015).

**Qu'est ce qu'un fossile?** Les fossiles sont des restes d'êtres disparus ou traces de leur activité préservés dans les roches, se révèlent, dans ces conditions, comme autant d'archives qui racontent l'histoire de la vie et contribuent à rendre compréhensible l'extraordinaire diversité du monde vivant actuel. Après sa mort, tout être vivant est voué à disparaître sans laisser de traces. Les cadavres et les restes végétaux sont, en effet, la proie d'une multitude d'agressions qui contribuent, à plus ou moins brève échéance, à leur destruction. L'oxygène de l'atmosphère décompose la matière organique. L'eau dissout les coquilles et les squelettes. Une foule d'animaux et de micro-organismes se nourrissent des organismes morts. Aussi, la conservation de vestiges d'animaux et de plantes d'époques révolues constitue-t-elle l'exception; elle tient du miracle, mais elle existe. Les modalités de la fossilisation qui assurent la transmission des vestiges d'anciennes faunes et flores sont variées. Les fossiles les plus communs qu'un promeneur averti récolte au pied d'une falaise ou dans une carrière, correspondent aux parties minéralisées des animaux c'est-à-dire les coquilles, les carapaces ou les squelettes.

**Les gisements fossilifères sont des lieux de mémoire :** Les fossiles ramassés au hasard lors d'une promenade fait le bonheur du collectionneur. Il est perçu comme un élément décoratif ou comme une invitation à rêver de paysages disparus. Pour les géologues, ces gisements fossilifères font l'objet d'une attention beaucoup plus raisonnée, car ils correspondent à des accumulations de documents paléontologiques d'une exceptionnelle abondance ou d'une qualité de conservation inhabituelle. Certains sont connus et prospectés depuis longtemps, tels les sites de l'Anti Atlas oriental (régions du Tafilalet) dont les goniatites, othocères et trilobites intriguent les visiteurs (touristes) des bazars d'Erfoud, Rissani et leurs environs.

**Quel est le message des fossiles?** L'étude des fossiles relève du domaine de la Paléontologie, une discipline située à la charnière entre les Sciences de la Vie et les Sciences de la Terre. Son objectif est la reconstitution de l'histoire des êtres vivants, une évolution qui, en près de 4 milliards d'années, a conduit de l'apparition des premières bactéries à l'émergence de l'homme. En effet, une très longue filiation nous relie aux premières formes de vie. Les fossiles nous racontent l'histoire de nos origines. L'étude de ces fossiles permet de formuler un répertoire de la bio (géo) diversité. L'une des premières constatations est que les fossiles nous renseignent sur l'extrême diversité du monde vivant ayant peuplé la planète. Tout au long des temps géologiques, une multitude d'animaux et de plantes se sont succédés, la plupart n'ayant plus de représentants dans la nature actuelle. Il en est ainsi par exemple des dinosaures dont la silhouette est désormais familière. Des formes anciennes disparaissent, des espèces nouvelles naissent au rythme des millions d'années, témoignant de la fabuleuse capacité d'innovation de la vie.

Il s'agit en fait d'accumulations de carbonate du Dévonien affleurant dans la partie est de l'Anti-Atlas (Tafilalt), connus sous le nom des monticules «Kess-Kess». Nom qu'on donne au «coussoussier traditionnel» est une appellation locale qui décrit parfaitement la morphologie de ces édifices : conique, à base subcirculaire et sommet pointu pour la majorité d'entre eux. Ils sont au nombre de 46, étalés sur 7km en direction E-W et dont la hauteur est comprise entre 3 et 45m avec des pentes variables de 15 à 60°, mais généralement plus fortes vers le Nord.

Ces structures constituent un exemple classique de monticules de boue en eau profonde liés à l'hydrothermalisme. Ces structures particulières

de Hamar Lakhdad, situées à l'Est d'Erfoud, ont été créées par des éruptions volcaniques sous-marines au Dévonien inférieur. Ces infiltrations hydrothermales ont persisté pendant une longue période, depuis la fin du Praguien jusqu'au début du Frasnien. La réactivation des processus magmatiques vers la fin de l'Emsien a permis la formation de structure en dômes du complexe volcanique, recouvrant des strates sédimentaires, et en conséquence création d'un réseau de failles. Ces failles servent alors de conduits pour les fluides chauds qui migrent sur le fond marin. Les données géochimiques suggèrent que les carbonates des monticules de boue se sont formés par un mélange de fluides hydrothermaux et l'eau de mer (Belka et al. 2015).

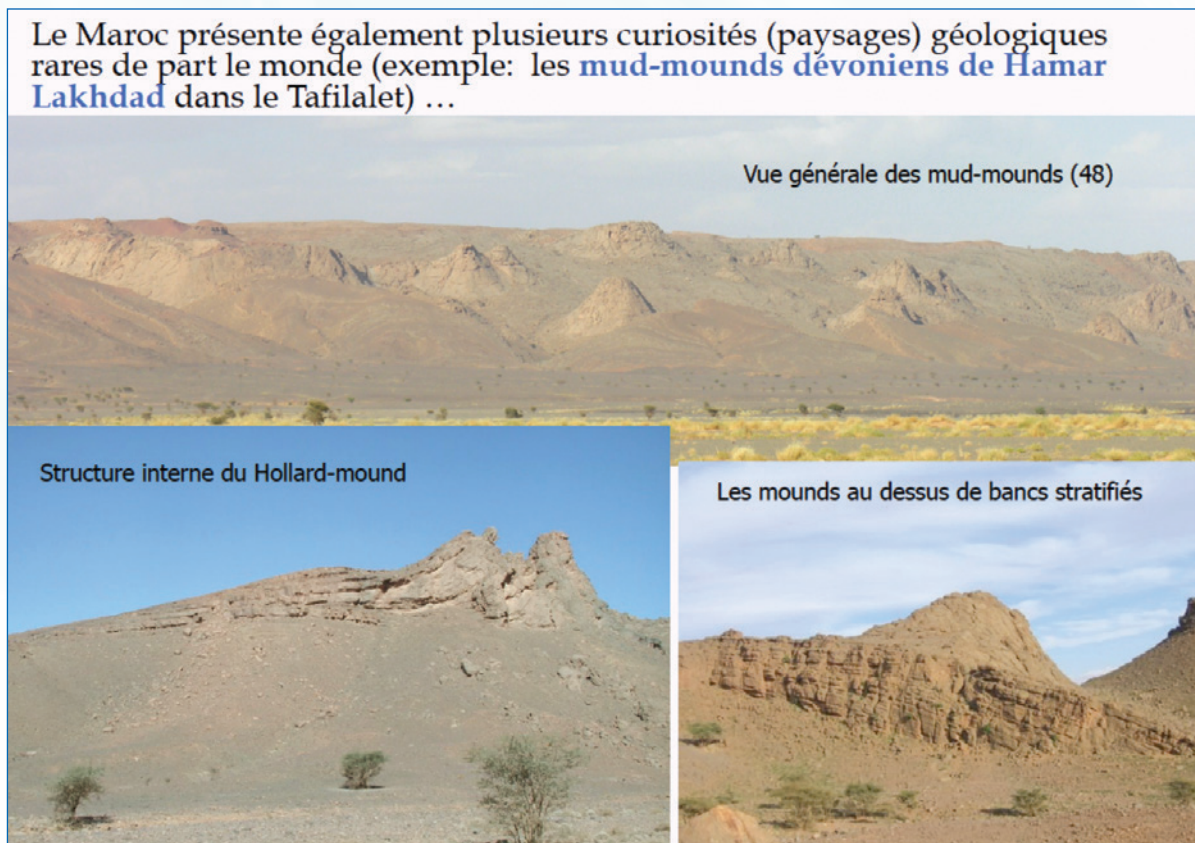


Figure 1-b. Différents aspects des mud-mounds en 3D et en coupes.

L'un des traits caractéristiques de ces monticules de boue est la présence d'un grand nombre de cavités qui sont des fragments de plus grands espaces libres. À l'origine, ils constituent un système complexe de fissures, des cheminées et des espaces ouverts remplis de sédiments laminés micritiques à grains fins et à ciments de calcite. Bien que les phases de leur formation

n'aient nécessité qu'une courte période (une seule zone de conodontes), ces monticules sont restés un lieu d'activité animale intense. En effet, les parties supérieures de ces structures, offrant une meilleure circulation des eaux, ont été colonisées par des communautés diverses de Rugueux de Coraux tabulés, de Bivalves, de Crinoïdes, et de Brachiopodes et où les cavités et les fissures,

les anciennes voies de migration de fluide, sont devenues le lieu de développement du biote<sup>1</sup>, avant d'être remplies par des sédiments. En outre, ces cavités ont été visitées périodiquement par des centaines de trilobites (Scutellum, Harpes) qu'on retrouve actuellement à l'état fossile.

Cet environnement fait de cette région un lieu exceptionnel dans le monde, méritant d'être conservé et protégé.

### Qu'est ce qu'une coupe géologique?

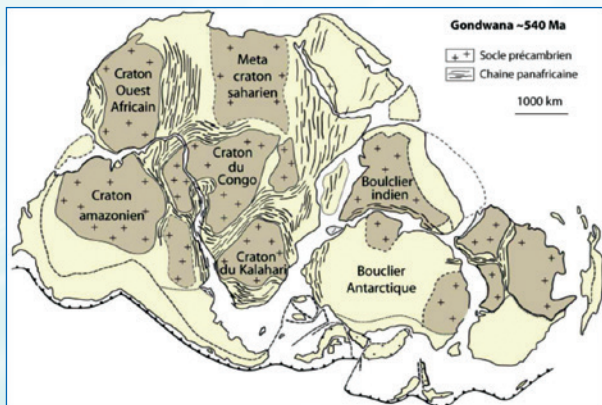
Une coupe géologique est un ensemble d'affleurements (strates continues visibles quand les roches du sous-sol ne sont pas recouvertes par les constructions, la végétation ou le sol) retraçant une tranche de temps géologiques. Ces affleurements correspondent à un ensemble de roches non-dissociées du sous-sol, mises à nu par un ensemble de facteurs naturels (érosion) ou humains. Un affleurement correspond à une surface qui après érosion montre la roche constituant le sous sol. Une coupe géologique peut être choisie comme stratotype (affleurement-type ou étalon qui permet de définir un étage de l'échelle stratigraphique). Un stratotype est choisi comme référence sur terre là où la série géologique d'une tranche de temps géologique est la plus complète et sert donc de témoin à l'échelle internationale. Il peut également correspondre à une limite entre deux étages géologiques.

2) Le Maroc possède une histoire géologique assez complexe, mais aussi assez complète depuis les temps précambriens jusqu'à l'Actuel, marquée par des environnements sédimentaires et climatiques variés et aussi par la formation de chaînes de montagnes dont l'âge varie depuis les plus vieilles sur terre (orogénèse éburnéenne) jusqu'aux chaînes alpines. Nous retraçons ici, à titre patrimoniale, une partie de cette histoire à partir de la phase fini-précambrien à 600 Ma (l'orogénèse pan-africaine) qui a donné une chaîne du même nom aux alentours du Craton Ouest Africain (fig. 2).

**Qu'est-ce-qu'un stratotype?** Selon le Guide Stratigraphique International de l'Union Internationale des Sciences Géologiques, un stratotype représente une limite entre deux étages ou une unité stratigraphique, donc d'un étage. Il représente de ce fait une coupe-type qui sert d'étalon pour la définition et l'identification de l'unité à l'échelle internationale.

Malgré la grande richesse de la géologie marocaine, seul deux stratotypes ont été retenus par la Commission Internationale de Stratigraphie (CIS). Un dans le Tafilalt en 1994 à Mech Irdane pour la limite Eifélien-Givétien (Walliser et al., 1995) ; l'autre en 2000 dans la région de Rabat (vallée de l'oued Akrech) pour la limite Tortonien-Messinien (Hilgen et al., 2000).

**Qu'est-ce-qu'un Géoparc?** Un Géoparc est défini ici comme un lieu renfermant un certain nombre de sites (de toutes tailles) ou une mosaïque d'entités géologiques d'une rareté, d'une beauté ou d'un intérêt particulier, représentatif de l'histoire géologique d'une région donnée ainsi que des événements et processus qui l'ont formée.



**Figure 2.** Reconstitution du super continent Gondwana à la fin du Précambrien, vers -540 Ma (d'après Gray et al., 2008)

3) Parmi les curiosités de l'Anti Atlas, on cite aussi le complexe ophiolitique de la boutonnière de Bou Azzer, qui atteste de la fermeture de l'océan précambrien moyen durant l'orogénèse pan-africaine (fig. 3). L'accident majeur de l'Anti Atlas retrace la suture de cette fermeture.

1- Le biote cryptique incrustant le toit des cavités se composait principalement de quatre groupes d'invertébrés: coraux rugueux, crinoïdes, compile, et éponges.



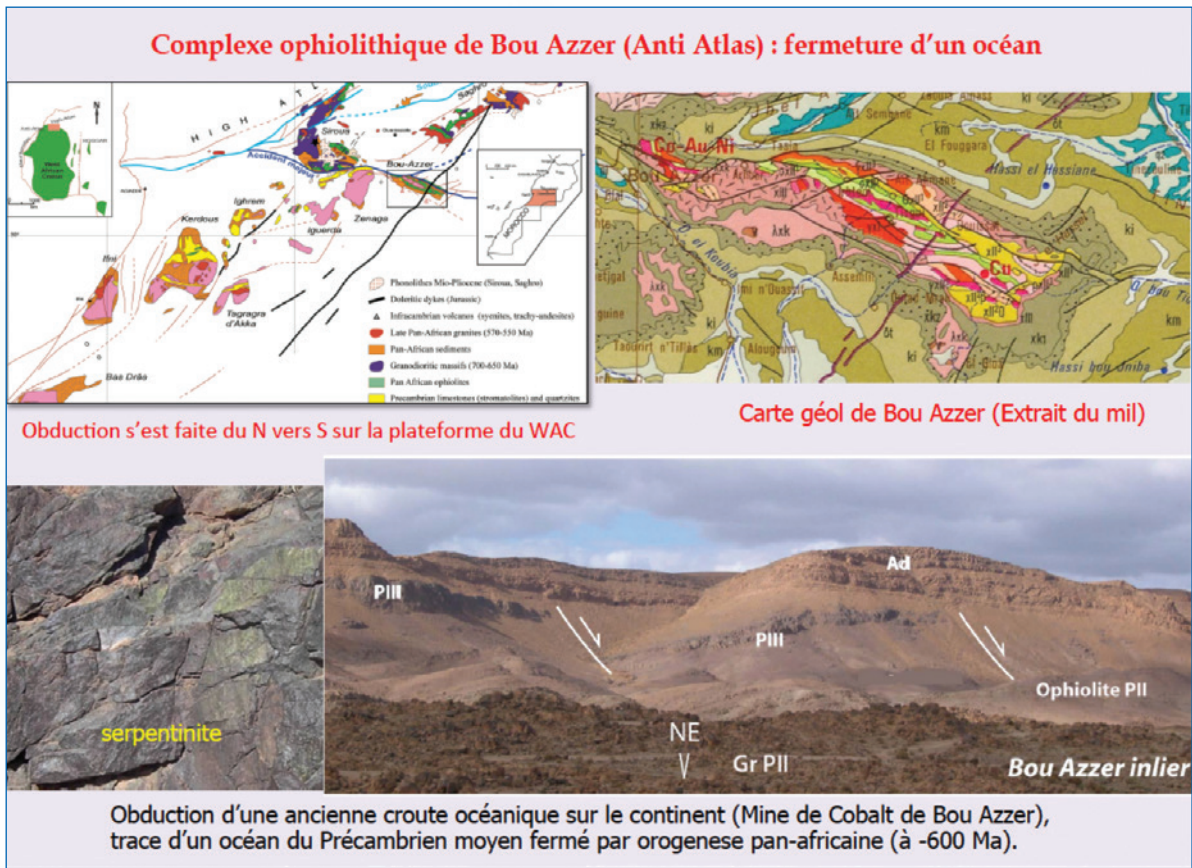


Figure 3. Cartes et photos des ophiolites (le panorama est de Michard et al., 2008)

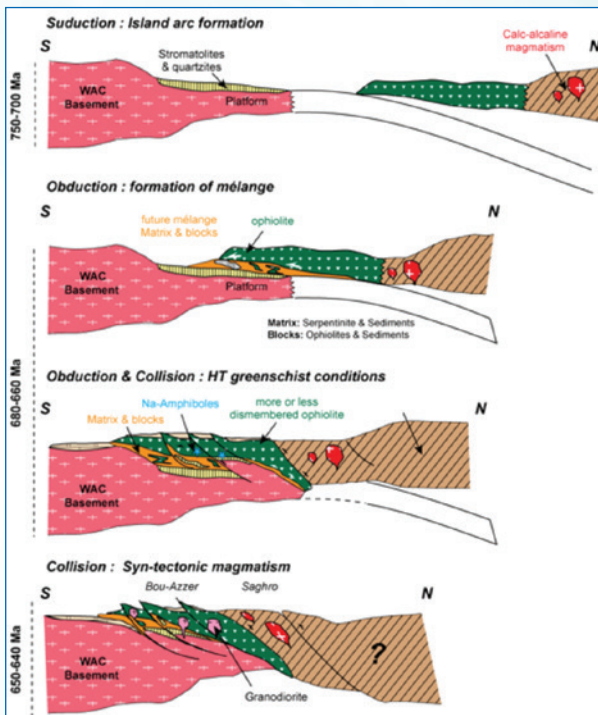


Figure 4. Modèle pour la mise en place de la série ophiolitique de Bou-Azzer (d'après Bousquet et al., 2008)

**La série ophiolitique** de Bou Azzer–El Graara affleure sur une longueur de 15km et une largeur de 4 km. Elle est constituée par une matrice de serpentinite englobant des fragments de roches basiques et ultrabasiques (harzburgite, dunite, werhlite, clinopyroxénite...). Ces roches d'origine mantellique sont tectoniquement emballées au sein de séries complexes interprétées comme des mélanges d'accrétion au sud, d'origine magmatique, métamorphique ou sédimentaire et des associations de métagrauwackes, basaltes et andésites, considérées comme des assemblages d'avant-arc au nord (Saquaque et al., 1989). L'âge néoprotérozoïque de cette série ophiolitique, par la méthode Rb/Sr, est de 788 +/- 10 Ma (Clauer, 1976).

Bien que cette série présente un caractère morcelé et incomplet, il est actuellement admis que ces roches sont bien représentatives d'une lithosphère océanique néoprotérozoïque, d'où elles ont été extraites par obduction lors de la collision panafricaine et attestent bien de l'existence d'une suture panafricaine le long de l'Anti-Atlas central, avec une polarité nord de la subduction (Soulaïmani et al., 2006).

Ce site représente donc une bonne illustration de la fermeture d'un océan précambrien. Bousquet et al. (2008), schématisent ces mouvements selon un modèle de mise en place de la série ophiolitique de Bou-Azzer avec trois épisodes (fig. 4) :

- le premier à 750-700 Ma où l'on observe la subduction à pendage nord de l'océan panafricain.
- le second à 680-660 Ma avec la Formation d'un mélange et de faciès schistes-verts avec surimposition d'un métamorphisme pendant obduction et l'assemblage de l'ensemble.
- enfin à 650-640 Ma qui est celui d'un magmatisme syn-collision transversale des structures tectoniques antérieures.

L'existence d'un continent au nord de cette structure est supposée, en raison de l'absence de croûte océanique panafricaine au nord de Bou-Azzer.

**4) Dans le sud du Maroc (fig. 5 et 6), un excellent trajet géologique depuis Dakhla à Awssard, sur 270 km, permet de lire une partie assez ancienne de l'histoire géologique du Maroc, notamment**

dans la partie SE (Saddiqi et al., 2015). Les auteurs de ces travaux effectués dans le cadre d'un projet financé par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques retracent à travers des trajets géo-touristiques l'histoire complète du Craton ouest-africain, de la partie nord de la chaîne des Mauritanides, de sa couverture paléozoïque et des bassins plio-quadernaires.

Nous décrivons ici un seul trajet, celui de Dakhla-Awssard, en se référant aux travaux de ces auteurs où le lecteur pourrait avoir toutes les données sur les provinces du Sud marocain. L'histoire précambrienne et paléozoïque de cette région est lisible dans quelques géosites.

Le géosite A-6 est situé à 55 km de Dakhla et où la route de Awssard traverse le plus grand complexe de métagabbro du massif de l'Adrar Souttouf. Ce site constitue l'axe des nappes Mauritanides dans le sud du Maroc et où affleurent les faciès typiques de métagabbros. La complexité de la structure de l'unité de métagabbros est beaucoup plus visible dans le sud-est du massif de l'Adrar Souttouf, en raison de l'altitude élevée et un relief plus profondément incisée.

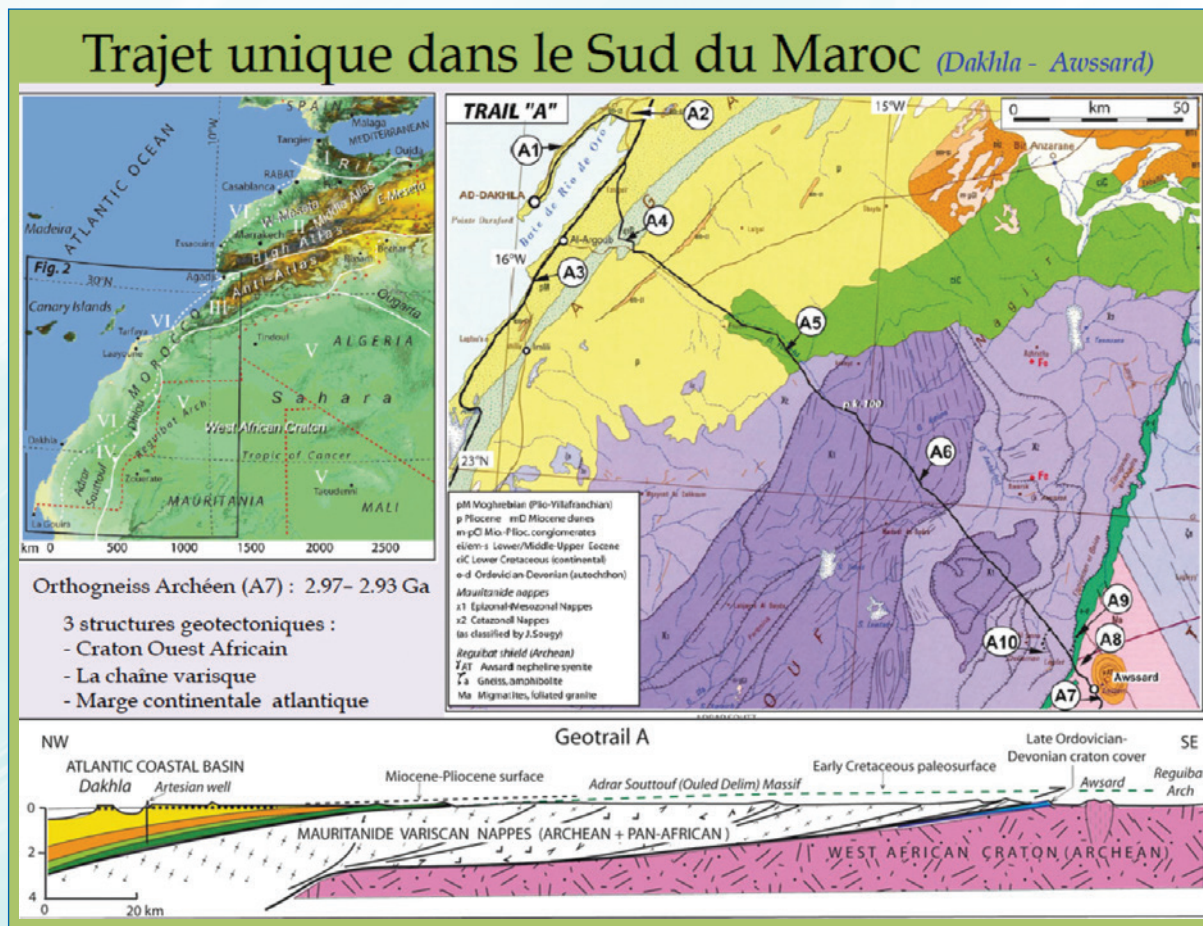


Figure 5. Carte du trajet géo-touristique dans le Sud du Maroc (Saddiqi et al., 2015)

En effet, dans les environs d'Awssard, géosite A-9, on peut observer un beau panorama sur le bouclier Reguibat autour d'Awssard à partir de la colline Dliyat En'Sour. L'intrusion de syénite et de dykes de base est clairement visible au milieu de roches granitiques blanchâtres érodés. De plus, ce site permet aux visiteurs d'observer la belle discordance angulaire entre le vieux socle de 3 Ga et sa couverture ordovicien supérieur (Ashgill = Hirnantien, 445 Ma). Ce dernier se compose de quartzites et de galets déposés après l'érosion liée à la progression vers le nord de l'inlandsis Hirnantien, qui a affecté les régions sahariennes à cette époque (Deynoux et al., 1985). Une large vue d'ensemble, en regardant vers l'ouest, des unités frontales des nappes de la chaîne des Mauritanides (métaquartzites du Néoprotérozoïque, mica-schistes de l'Archéen et recouvrant les orthogneiss et méta-granites archéens). On peut noter également la présence de pélites et calcaires du Siluro-Dévonien coincés entre les quartzites de l'Ordovicien.

Enfin, le géosite A-10, situé dans la colline Laglat à proximité d'une «Zaouïa» (sanctuaire) permet d'observer au niveau de la falaise des micaschistes d'âge archéen. Les indices tectoniques indiquent une mise en place des nappes des mauritanides à l'hercynien (varisque).

Le géosite A-8, situé dans le socle archéen à 10km au nord de la ville Awssard, près de la route de Dakhla, montre de magnifiques affleurements de migmatites hétérogènes, avec de gros blocs de roches basiques entourés et recoupés par des veines de granite.

**5) Les premiers signes de vie au Maroc**, peuvent être observés à 25km au sud de Ouarzazate sur la route allant à Agdz. On y observe des stromatolithes mamelonnés des Conophyton datés de 555 Ma (fig. 7).

Ces Stromatolites (Conophyton Collenia) sont des constructions d'algues silicifiées. Il s'agit d'organismes primitifs d'eau douce, indicateurs de début indice de vie dans cette région.

**6) Le Maroc en position polaire.** Après la fin de l'orogénèse pan-africaine, commence un nouveau cycle appelé Cycle calédonien (Cambrien-Ordovicien-Silurien) qui va durer environ 120 Ma et qui, à travers l'étude des sédiments, montre des positions paléogéographiques différentes (Beuf et al., 1971) dont l'une des principales qui nous intéresse ici est la position à la fin de l'Ordovicien (Hirnantien) où le super continent du Gondwana était situé dans l'hémisphère sud avec une position du pôle sud en Afrique de l'Ouest (fig.8). La glaciation fini-ordovicienne correspond au développement d'une calotte glaciaire s'étendant sur la partie occidentale du Gondwana et où le Maroc est impliqué et se situerait entre 445.6 à 443.7 Ma soit environ 1.9 Ma<sup>2</sup>.

Néanmoins, le Maroc, à travers le type de sédiments, a bien enregistré cette période. Jacques Destombes (1985) développe une stratigraphie détaillée des sédiments de l'Ordovicien moyen supérieur qu'il subdivise en 3 groupes (les grès du 1<sup>er</sup> Bani, les grès de Ktaoua et enfin les grès du 2<sup>ème</sup> Bani) qu'on peut suivre aisément au jbel Kissane (voir photo de la fig. 8). Le 2<sup>ème</sup> Bani est le groupe associé à un environnement glaciaire, notamment dans sa partie supérieure (glaciation Hirnantienne) qu'on peut apprécier particulièrement entre Alnif et Zagora. Cette partie (ou formation) supérieure est caractérisée par le développement d'un plancher glaciaire à surface irrégulière qui marque le contact entre les grès préglaciaire et le conglomérat basal d'origine glaciaire. Vient ensuite un faciès de conglomérat massif monogénique remplissant le fond de paléo-vallées à Alnif notamment, surmontés par d'autres conglomérats et grès chenalisés correspondant un faciès érosif, grossiers à granules polygéniques et blocs de grès émoussés avec parfois un granoclassement normal.

La série se termine par des diamictites sableuses sous forme de lentilles à fine sédimentation à galets centimétriques. Cette série est couronnée par des dépôts gréseux fins à rides de courants et rides grimpantes et par des siltites massives à Brachiopodes, fragments de coquilles et de dropstones (Clerc, 2013).

2- Cette période est discutée en littérature géologique et pourrait, d'après Sutcliffe et al. (2000), être réduite à 200.000 ans, donc un épisode de froid extrêmement rapide.

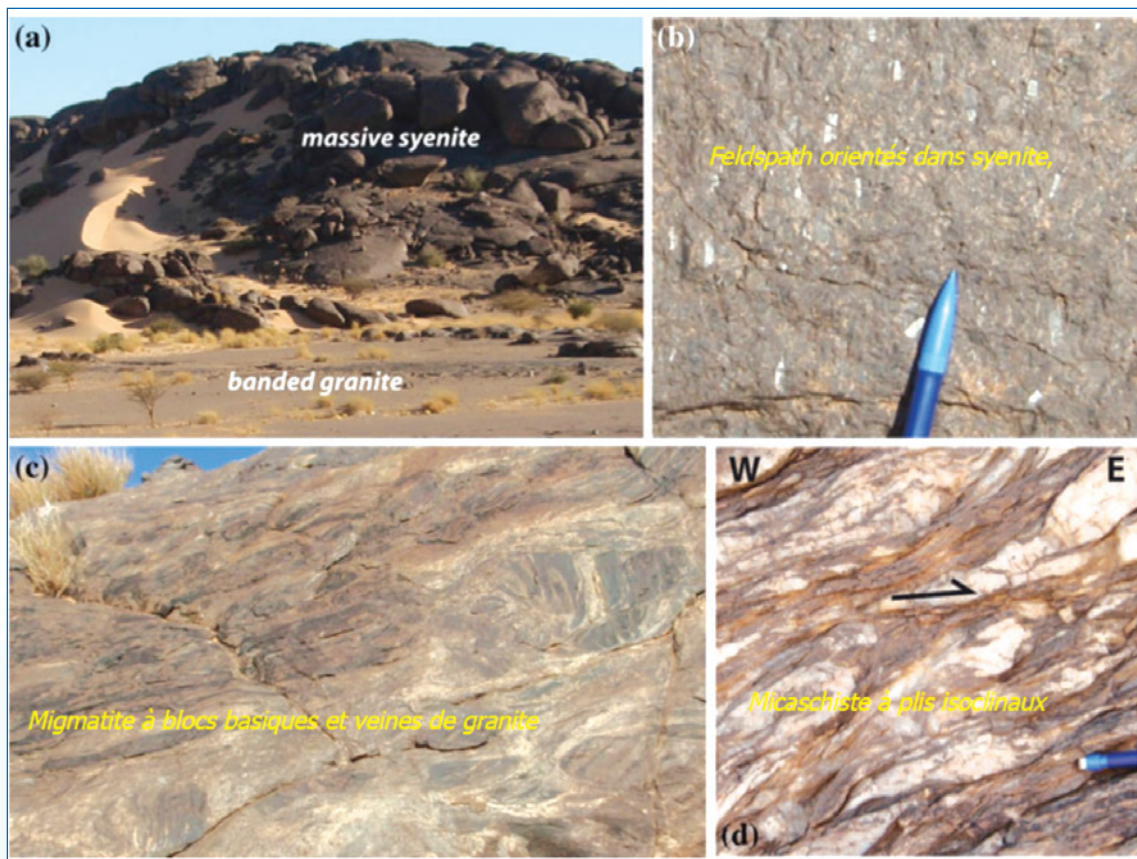


Figure 6. Photos des principaux affleurements (in Saddiqi et al., 2015)



Figure 7. Carte de situation et photos des Conophyton dans la région de Ouarzazate



**Figure 8.** Position polaire du Maroc à l'Ordovicien supérieur (photos des conglomérats ordoviciens de Baider L.)

**7) Constructions récifales dans les Rehamna** (région de Mechra Ben Abbou). A partir du Silurien, la position paléogéographique du Maroc change et une remontée vers des latitudes plus chaudes s'amorce. Ceci est attesté par la prolifération d'une riche faune dans un milieu confiné relativement chaud caractérisé par une sédimentation carbonatée où se développent des complexes récifaux au Dévonien (Givétien notamment). L'une des régions où ceux-ci sont bien représentés est celle de Mechra Ben Abbou, sur les bords de l'oued Oum Erbia (massif des Réhamna).

Dans la région de Mechra ben Abbou, les calcaires Dévonien moyen affleurent sous forme de chicots en relief, souvent encadrés par des terrains tendres pélitiques à intercalations calcaires et gréseuses du Dévonien inférieur (fig. 9). L'analyse des coupes et des cartes de faciès réalisées au niveau de ces chicots révèle l'existence d'un dérangement tectonique qui oblitère certaines informations. Le jbel Sidi bou Talaa qui reste indemne paraît fournir des renseignements précieux. Situé sur la rive

droite de la presque île de l'Oum er Rbia (Sud-Est du village de Mechra ben Abbou : fig. 9), le jbel Sidi bou Talaa s'allonge dans une direction subméridienne, en forme de demi-ellipse, dont l'anneau le plus externe est formé des calcaires de la sole, suivit des calcaires bioconstruits du récif organique puis des calcaires stratifiés de l'arrière récif, dans l'anneau interne.

L'examen de cette localité rend compte de la succession de faciès suivante :

- la sole récifale (80 m) d'âge Emsien supérieur-Eifelien est un amalgame crinoïdique. Les coraux (en particulier les tabulés) et les stromatopores sont subordonnés aux crinoïdes. Les bryozoaires, les stromatopores et les mollusques y sont également présents. L'abondance des crinoïdes et des organismes constructeurs reflète la proximité à la fois des prairies de crinoïdes et des édifices récifaux à bioconstructions. Au sommet, on passe à des débris de faune récifale qui paraissent plus importantes, pouvant indiquer un milieu d'avant récif.

- le biostrome puis le récif organique étant la partie massive en relief du Jbel où les stromatopores globuleux, les tabulés, les rugueux, les amphipores et les tamnopores sont abondants.
- l'arrière récif est le produit de démantèlement du récif construit, éboulis en masse sur la pente d'arrière récif. Y sont distingués des fragments de stromatopores (jusqu'à 30 cm de diamètre), de tabulés de tamnopores... Latéralement et d'une manière progressive une stratification

s'établie avec l'apparition de couches à faciès micritique (packstone à wackstone) riche en algues (amphipores) alternés avec des strates bréchiques (rudstone). Une diminution de la taille des éléments bréchiques avec la présence des fénestrés caractéristiques du milieu restreint est remarquable en s'éloignant du récif.

Ce type de faciès récifale peut également être bien observé dans les séries givétiennes de Mzoudia, oued Cherrat, oued Tiflet et Ain Jemaa (région d'Oulmès).



**Figure 9.** Photos montrant les calcaires récifaux du Givétien de Sidi Bou Talaa (Mechra Ben Abbou, Réhamna)

**8) Les péridotites de Beni Bousera.** En remontant vers le Nord dans la *chaîne alpine du Rif*, on peut observer des affleurements rares témoignant d'un morceau de manteau par les péridotites de Beni Bousera (fig. 10).

Les péridotites sont constituées dans leur partie centrale par des lherzolites rubanées qui prédominent. Ce rubanement est dû à la présence de pyroxénolites. La paragenèse primaire indique des conditions de cristallisation voisines de 1.400°C et 25 kb. Au toit du massif, les péridotites s'enrichissent en grenats.

L'origine des grenats est discutée par plusieurs auteurs: soit mantelliques, résultant d'une trempe par refroidissement à la périphérie des péridotites en remontée rapide, soit provenant d'une cristallisation tectonique, due à une contamination crustale des péridotites lors de leur charriage. Ces péridotites sont faiblement serpentinisées au cœur du massif, mais la serpentinitisation est totale, sur une épaisseur parfois pluridécamétrique, au toit du massif. Des filons leucocrates tardifs recoupent les structures synmétamorphiques.

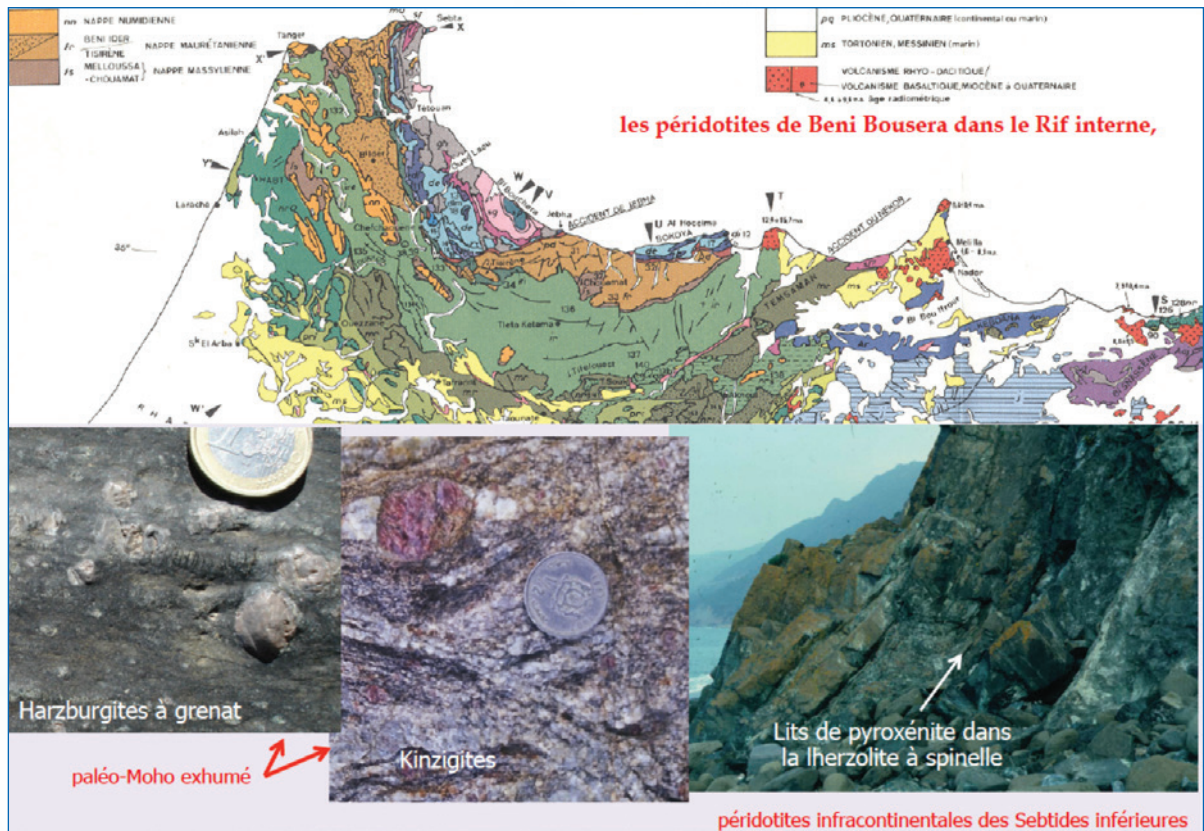


Figure 10. Carte de la chaîne alpine du Rif et photos des péridotites de Beni Bousera

### V- Les stratotypes

**1) Mech Irdane.** Le jbel portant le même nom englobe le GSSP (Global Stratotype Section and Point) après recommandation de la Subcommission de Stratigraphie du Dévonien (SDS) en séminaire (1991) puis ratifiée par IUGS en 1994 (Walliser et al., 1995). Le jbel Mech Irdane est une structure synclinale située dans la partie SE du Tafilalt à 12km au SW de la ville de Rissani. Comme partout ailleurs dans le Tafilalt, la coupe peut être entamée dès les niveaux calcaires à Scyphocrinites caractérisant dans l'Anti Atlas la limite Silurien - Dévonien (fig. 11, 12 et 13).

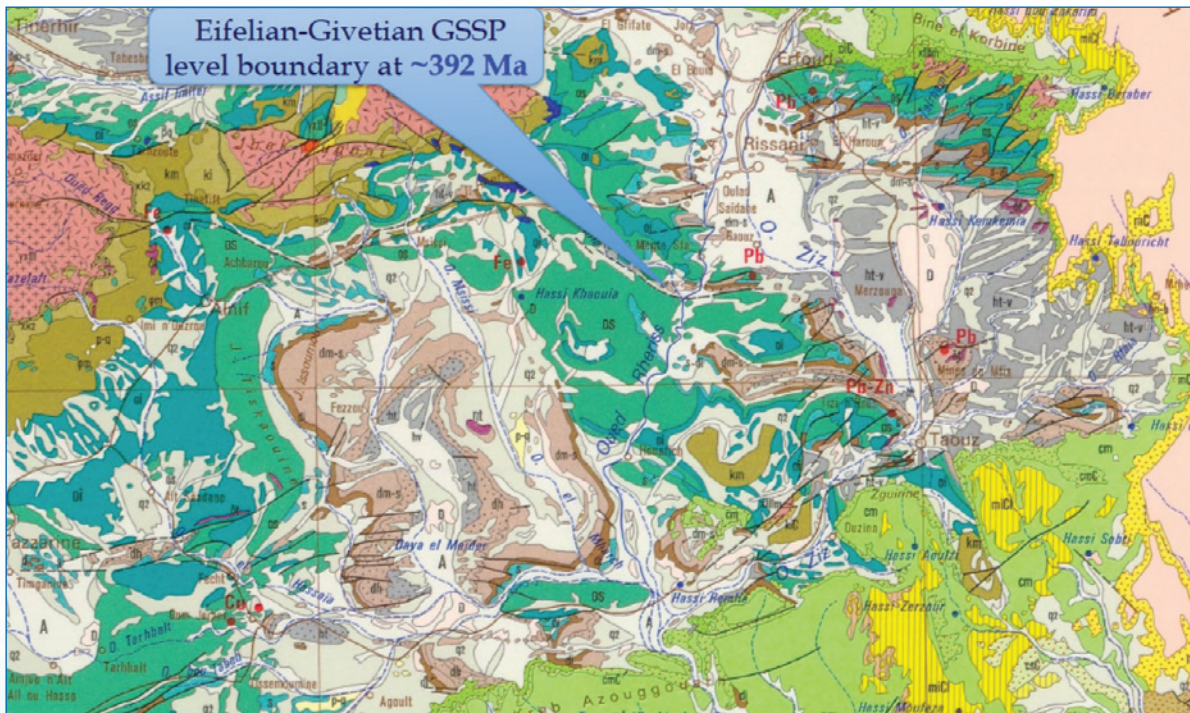
La partie dévonien inférieur est très bien représentée et riche en fossiles (Goniatites notamment) : les calcaires à Mimagoniantites avec le groupe des Anetoceras, Nowakia cancellata apparaît dans la transition calcaires-schistes noirs du Dalejien.

Les calcaires Eifélien à J. Mech Irdane sont très fossilifère, avec d'abondants trilobites, des pélécy-podes du groupe «Panenka», orthocône

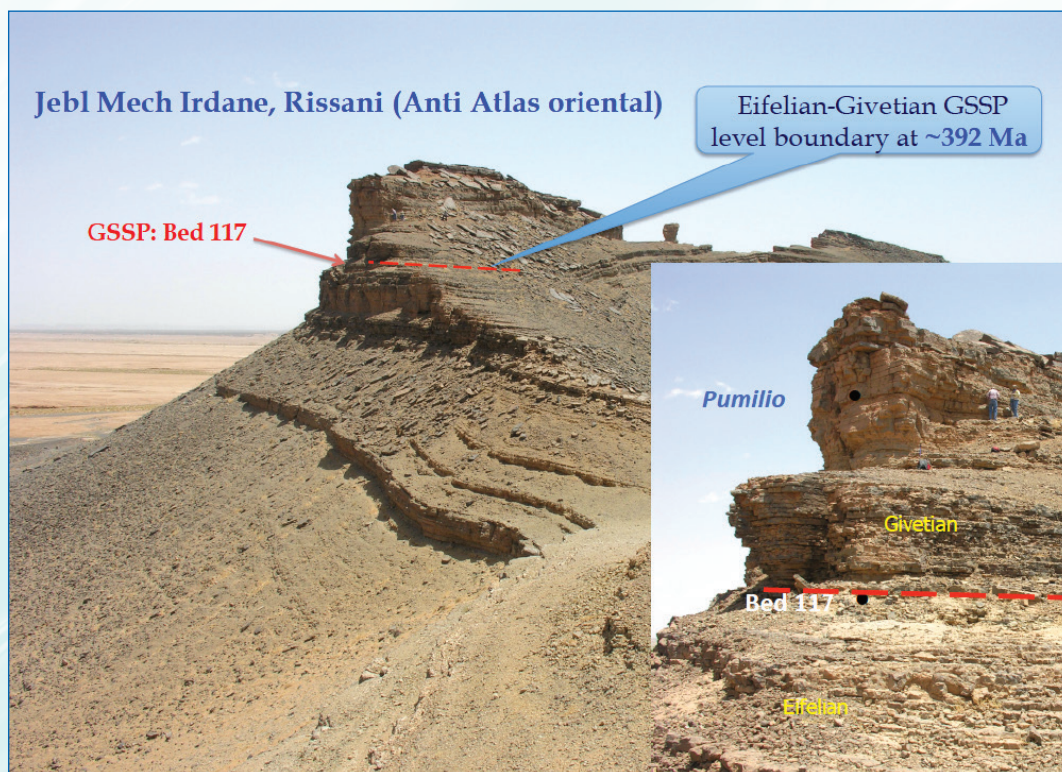
céphalopodes et goniatites, en particulier Subanarcestes et Cabrioceras, mais aussi Werneroceras, Fidélites, Agoniatites, et d'autres.

La limite Eifélien-Givétien est située au niveau du banc 117, limite attestée aussi bien par des méthodes paléontologiques (Walliser et al., 1995) que magnétostartigraphiques (Ellwood et al., 2011).

Le Givétien montre une large séquence de calcaires noduleux et lamellaires et nodulaires avec deux niveaux de pumilio (Lottmann, 1990, provoqués par les tsunamis) situés à la base et dans la partie centrale de la zone varcus, et avec la séquence de calcaire fins noduleux, caractéristiques de la partie supérieure comprenant les genres Maenioceras, notamment le M. terebratum et Pharciceras amplexum. Les calcaires à Pharciceras, qui coïncident avec l'ancienne zone à lunulicosta du Dévonien supérieur  $\alpha$ , sont absents dans cette coupe. Au dessus de cette lacune affleurent les calcaires à Manticoceras dans un faciès crinoïdique.



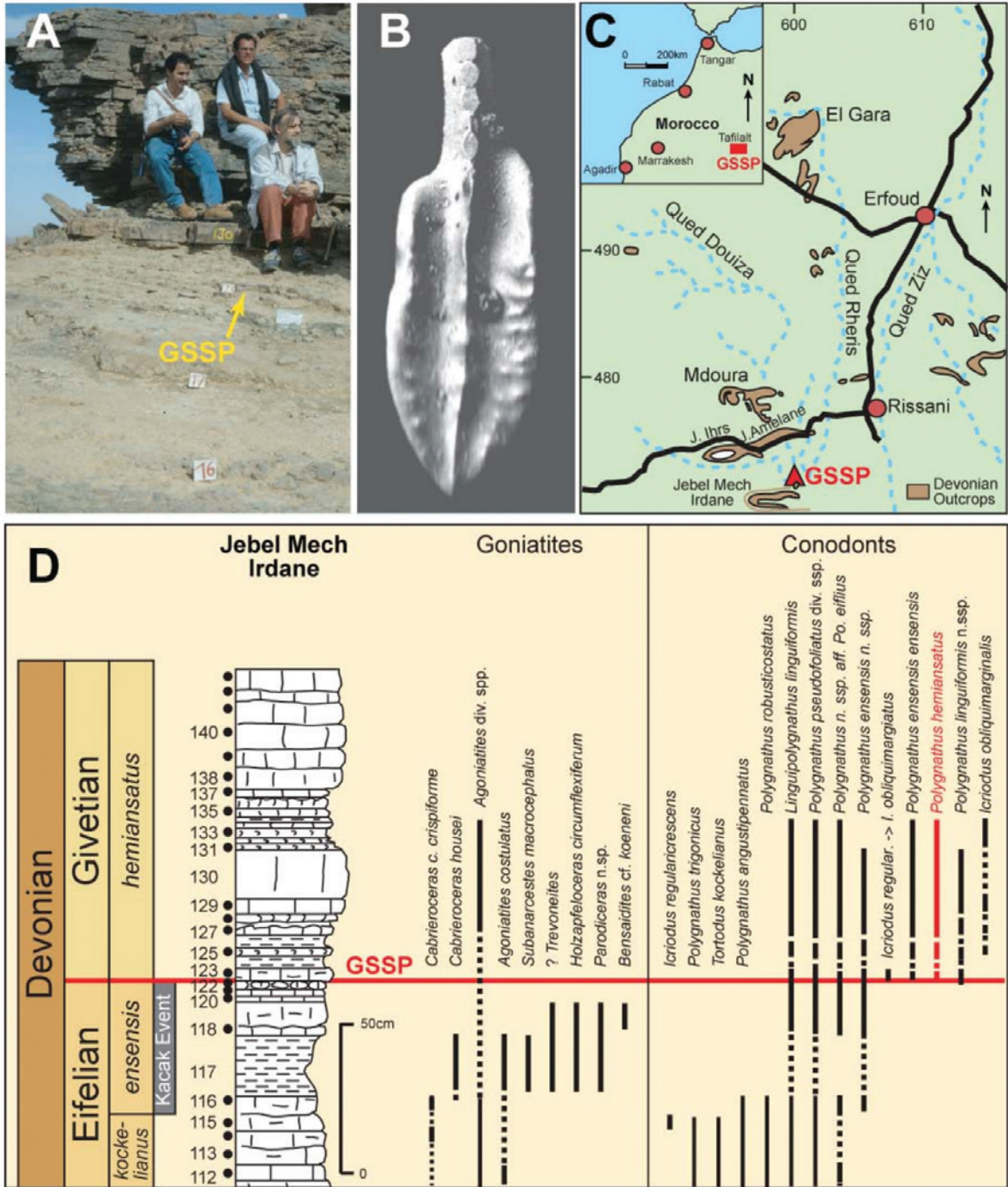
**Figure 11.** Carte géologique montrant la localisation du stratotype Eifélien-Givétien dans le Tafilalet (extrait du 1 :1000.000ème de la carte géologique du Maroc, NMSG n°260 – 1985)



**Figure 12.** Le Jbel Mech Irdane, son stratotype et ses événements



**Base of the Givetian Stage of the Devonian System  
at Jebel Mech Irdane, Morocco**



The basal-Givetian GSSP in the western part of Jebel Mech Irdane, western Tafilalt, Anti-Atlas, SE Morocco. **A.** Section details showing the position of the GSSP. **B.** Specimen of the index conodont, *Polygnathus hemiansatus*, from the GSSP Bed (Walliser, 2000, fig. 3C3), **C.** Geographic position of Jebel Mech Irdane SW of Rissani, Tafilalt, **D.** Lithological log showing the range of marker goniatites and conodonts around the GSSP.

from: The Geologic Time Scale 2012, Elsevier

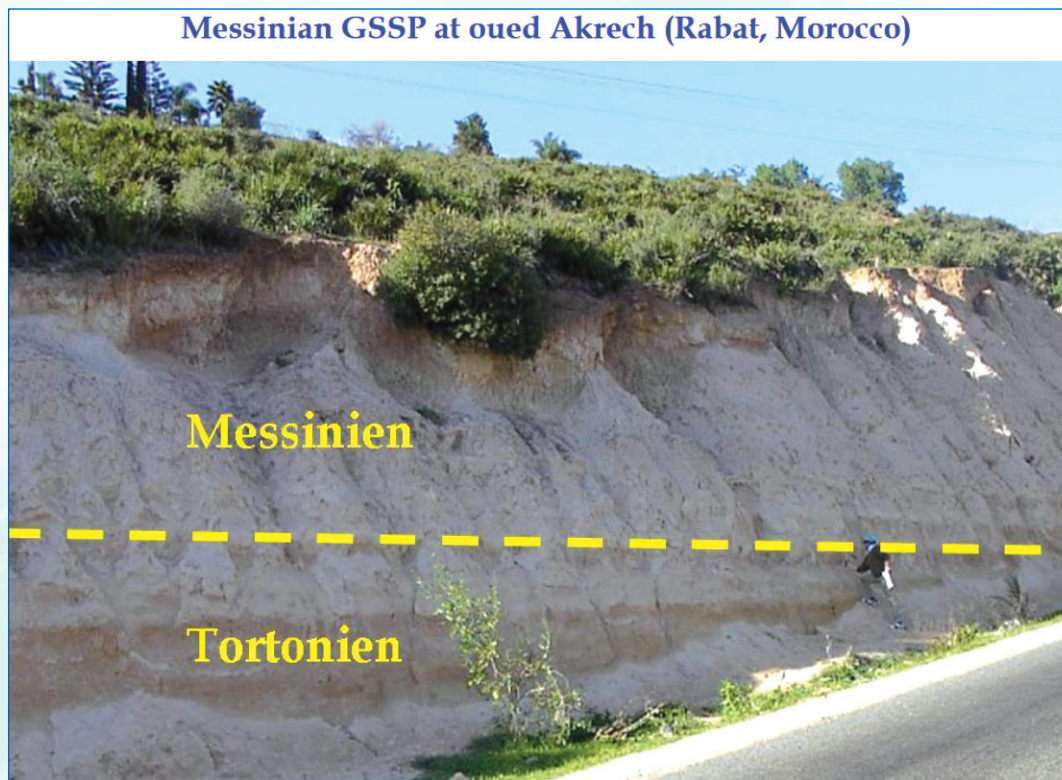
**Figure 13.** Coupe stratigraphique du stratotype de Mech Irdane (in the geological time scale, 2012, vol2, p. 568).

**2) Oued Akrech.** Le stratotype de la limite Tortonien/Messinien est situé à 10 km au SSE de Rabat (33°56'13»N ; 6°48'45»W), dans la vallée de l'Oued Akrech (fig. 14 et 15).

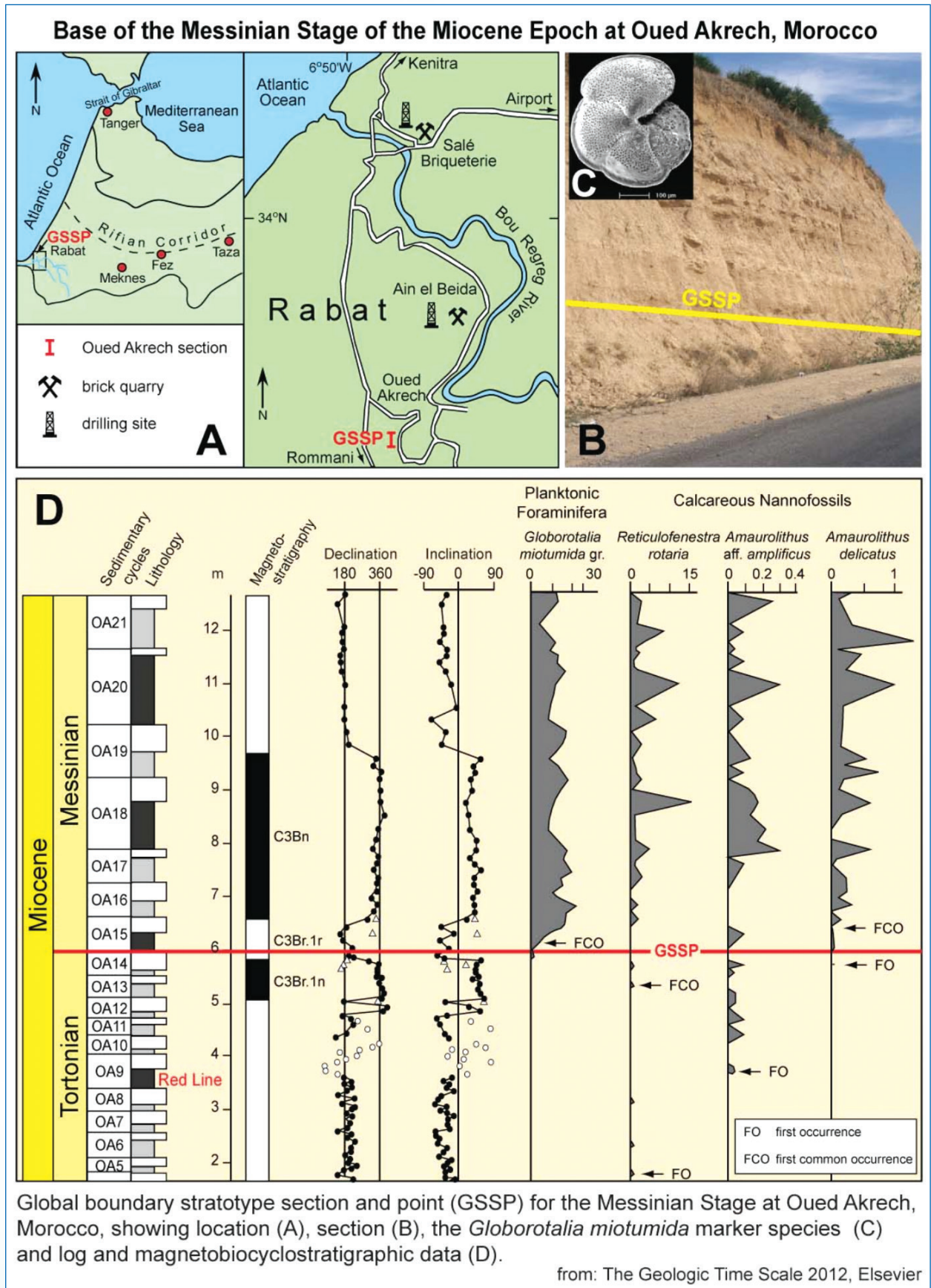
La série stratigraphique commence par des grès à glauconie peu profond du Tortonien supérieur appelés «Molasse de Base». Ce grès jaunâtre de 5m d'épaisseur, repose en discordance angulaire sur les roches du Paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère).

Il est surmonté par un niveau phosphaté durci qui correspond à une période de forte réduction du taux de sédimentation. Au dessus viennent des marnes sableuses à glauconie et des marnes arénacées (2m d'épaisseur) de mer profonde qui se termine avec un niveau à coraux (Flabellum).

Le Messinien débute par des marnes jaune-beige de mer profonde qui montrent des bancs rougeâtres. Au niveau de la couche phosphatée, l'environnement du dépôt marin change rapidement (microfaune benthique). Il passe du sublittoral au bathyal supérieur (profondeur de sédimentation estimée entre 500 à 700 m). Le GSSP (Globale Stratotype Section and Point) de la base du Messinien est ainsi formellement défini à la base du numéro rougeâtre de la couche n° 15 dans la coupe de l'Oued Akrech (Hilgen et al., 2000). Ce point coïncide étroitement avec la première occurrence régulière (FRO) du groupe des foraminifères planctoniques (*Globorotalia miotumida*) et de la première occurrence (FO) du nannofossile calcaire (*Amaurolithus delicatus*). Ainsi, la limite entre le Tortonien supérieur et le Messinien est datée de 7,251Ma. (Hilgen et al., 2000).



**Figure 14.** Le stratotype de l'oued Akrech (région de Rabat)



**Figure 15.** Localisation de la coupe de l'oued Akrech et lithologie (in the geological time scale, 2012, vol2, p.932).

## VI- Quelques exemples d'affleurements à intérêts scientifique et géo-touristiques

1) **L'Anti Atlas oriental (le tafilalt).** On ne peut pas parler du Tafilalt sans avoir en mémoire les merveilleux affleurements dévoniens et leur richesse en fossiles qui font le trésor des bazars et le

bonheur des visiteurs/collectionneurs. Vu l'énorme variété et la richesse des coupes géologiques, nous ne donnons ici que quelques exemples d'un riche patrimoine naturel marocain, telles les séries stratigraphiques du jbel Boutchrafine, du jbel Amelane et de Ouidane chebbi à la frontière avec l'Algérie (fig. 16 a et b, 17 et 18).



Figure 16a. La série dévonnaise au Jbel Amelane

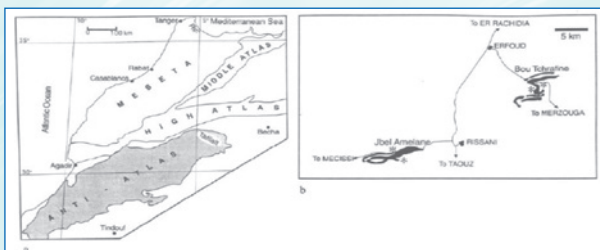
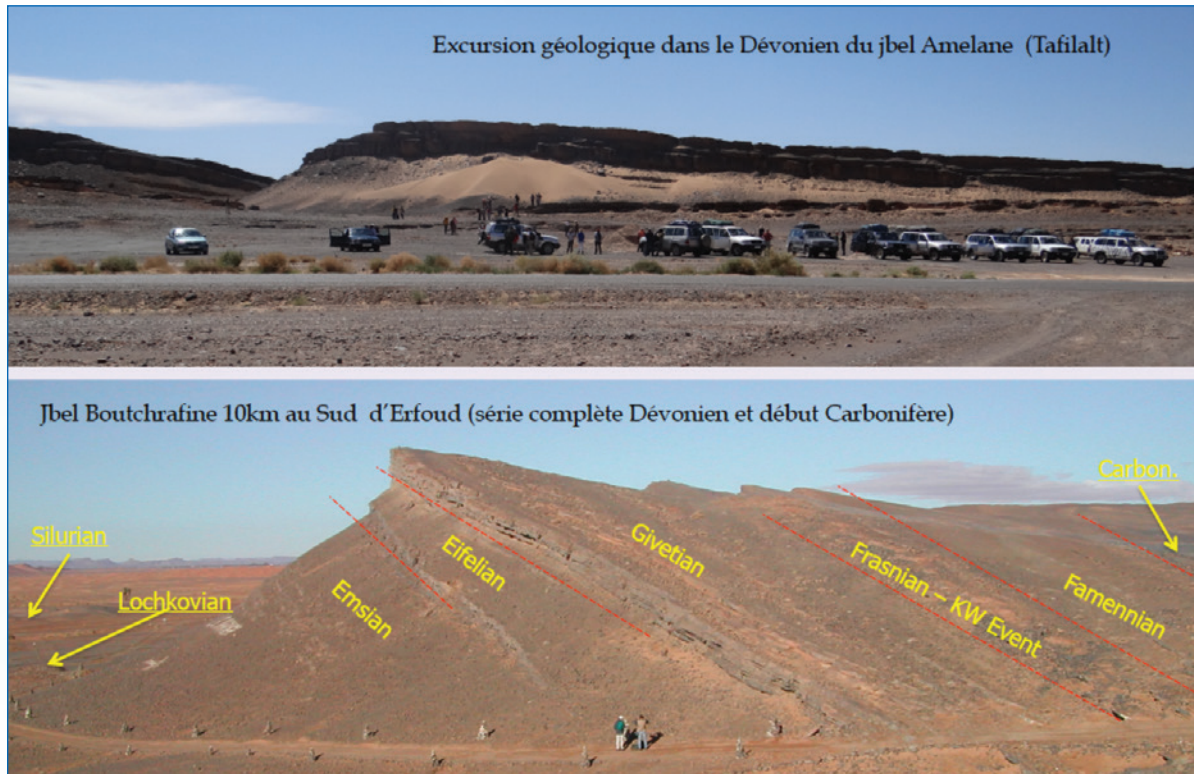


Figure 16b. Situation des coupes dévoniennes (a) : dans le Tafilalt et (b) : au Jbel Amelane et à Bou Tcharfine.

L'analyse de la coupe géologique du Jbel Amelane (situé à 25km au SW d'Erfoud, très facilement accessible par la route goudronnée allant à Msissi et Alnif) permet de suivre une série complète

depuis la fin du Silurien jusqu'au Famennien où l'on observe (au bord de la route goudronnée) de longs orthocères et des goniatites de grandes tailles qu'on retrouve dans les bazars du Tafilalt (tables d'Erfoud). Cette coupe présente plusieurs curiosités géologiques, mais l'évènement Kellwasser (KW event) reste le plus important dans la région par ses deux niveaux inférieur et supérieur.

Le jbel Bou Tcharfine et le jbel Amelane sont des témoins d'une période géologique complète pour tout le Dévonien, ce qui leur vaut d'être visité par plusieurs équipes de géologues de divers pays, développant chacun sa spécialité et sa vocation.



**Figure 17.** Série siluro-dévono-carbonifère du Jbel Amelane (haut) et Jbel Bou Tchrafine (bas)



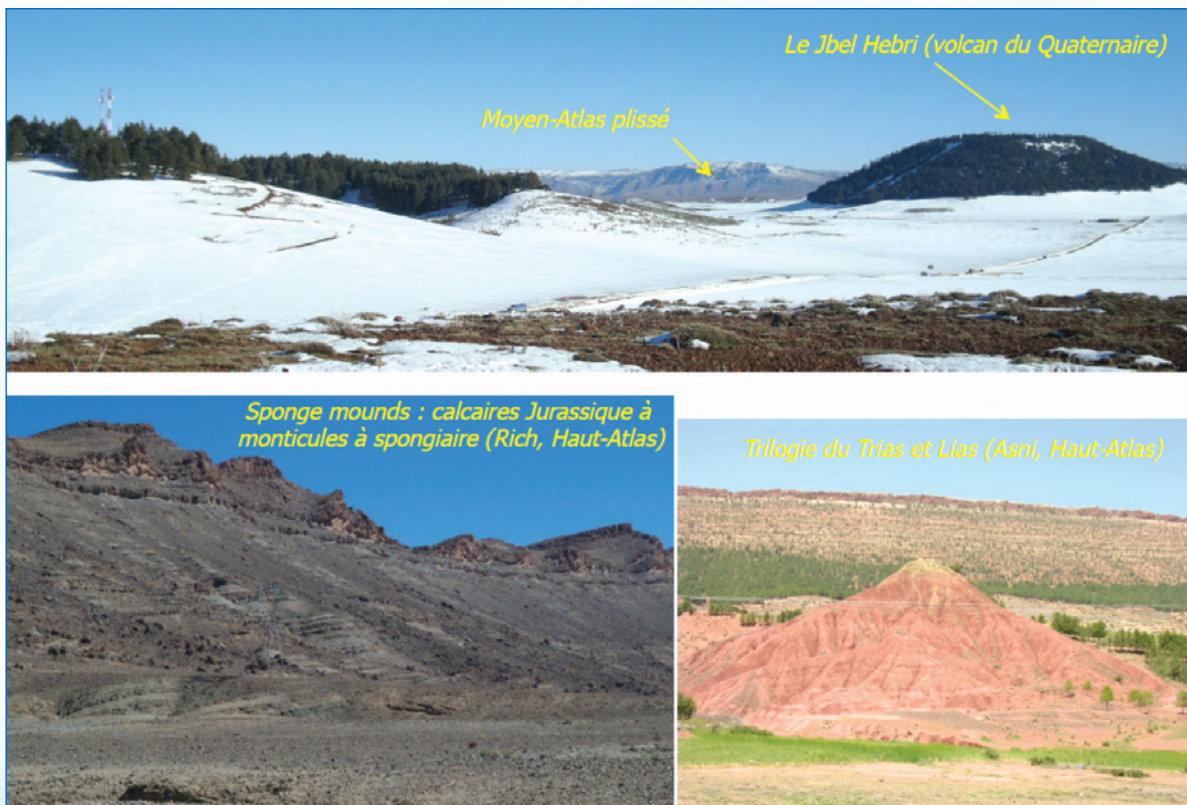
**Figure 18.** Le passage Dévonien-Carbonifère à Ouidane Chebbi (partie est du Tafilalt)

Les affleurements situés dans la partie orientale du Tafilalt, à Ouidane Chebbi, montrent également une coupe complète du Dévonien avec le passage au Tournaisien (Carbonifère). Les terrains crétacés et néogènes de la Hamada du Guir sont en discordance angulaire sur le Paléozoïque.

**2) La Chaîne atlasique.** A plusieurs endroits de la chaîne atlasique, notamment la partie occidentale, on peut retrouver la trace de l'ouverture de l'océan atlantique. D'excellentes coupes sont visibles dans le couloir d'Argana (sur la route Marrakech-

Agadir) et aussi dans la région d'Asni où la trilogie "argiles rouges inférieures – coulées basaltiques – argiles rouges supérieures" est bien illustrée. Le passage progressif vers les calcaires du Jurassique est observable dans la plupart des coupes de ces régions (fig. 19).

Plusieurs appareils volcaniques du Quaternaire sont également visibles dans le Moyen Atlas plissé (région comprise entre Ifrane, Azrou et Timahdite). L'un des plus connus est le jbel Hebri avec sa piste de ski (en période hivernale).



**Figure 19.** Différents paysages de la chaîne atlasique

## VII- Le Géoparc du M'Goun

Bien qu'il ne jouisse que d'un seul parc géologique, le Maroc reste le trésor de la mémoire de la Terre. En effet, le **géoparc du M'Goun**, minéralogique et paléontologique, situé dans la région Tadla Azilal, reste exceptionnel et suscite l'intérêt de la communauté scientifique nationale et internationale (fig. 20). Sa réalisation a permis au Maroc, premier pays arabe et africain, d'intégrer le réseau mondial des géoparcs. Il a été honoré à travers sa labellisation par l'UNESCO (6<sup>ème</sup> Conférence mondiale des Géoparcs) en tant que «**Global Geopark**» lors d'une cérémonie qui s'est tenue au Canada le 22 septembre 2014.

La découverte des dinosaures au Maroc remonte à 1926 dans la région d'El Mers (85km au sud de Fès) où de nombreux éléments du *Cetiosaurus moghrebiensis* (herbivores) ont été décrits par Albert Félix de Lapparent (1955) dans les couches du Jurassique moyen (160 Ma : Bathonien). Par la suite un autre dinosaure (*Rebbachisaurus garasbae*) a été découvert par Lavocat (1954) dans les couches du Crétacé inférieur (110 Ma) du Kem-Kem de l'Anti-Atlas oriental. Les recherches récentes ont permis ensuite la découverte de plusieurs spécimens dont les plus spectaculaires restent celle de l'*Atlasaurus imelakei* trouvé en 1980 dans la région de Tillougit (Haut Atlas central) dans un niveau du Jurassique moyen

(160 Ma) par Monbaron et al. (1999). Le squelette, complet, d'une quinzaine de mètres de longueur est celui d'un énorme dinosaure herbivore de la famille des Brachiosauridés.

Plus récemment dans le petit village de Tazouda, au Nord-Est de Skoura, dans la province de Ouarzazate, a été découvert un gisement du Jurassique inférieur (180 Ma) dans lequel abondent les restes de deux dinosaures: un herbivore quadrupède qui a été nommé Tazoudasaurus naimi et un carnivore bipède Berberosaurus liassicus (Allain et al., 2004). Ces auteurs décrivent la couches fossilifère se trouvant

dans un environnement tellement spectaculaire qu'un bâtiment (Musée) a été construit sur la couche même (photos) permettant d'admirer les ossements fossiles encore en place. Le site de dinosaures de Tazouda est devenu alors l'un des hauts lieux du patrimoine géologique marocain.

Mais tous les Dinosaures (à l'exception des Dinosaures engagés dans la voie menant aux oiseaux) vont disparaître de la surface de la terre, il y a 65 Ma. Cette disparition a fait couler beaucoup d'encre et de nombreuses hypothèses ont été avancées pour expliquer cette extinction. (Taquet, 2008)



**Figure 20.** Le géoparc de Mgoun (photos Ph. Taquet)

La disparition des Dinosaures est attribuée à la cinquième extinction, à la fin du Crétacé il y a 65Ma. Plusieurs hypothèses ont été avancées mais celle qui reste la plus plausible est résumée par Taquet (2008). Le scénario proposé serait le suivant: «à la fin du Crétacé, 5 ou 6 millions d'années avant la limite Crétacé-Tertiaire, le climat se refroidit par suit d'une moindre activité solaire et par suite des changements intervenant dans les courants océaniques avec la nouvelle disposition des continents. Puis d'importantes éruptions

volcaniques se déclenchent sur la péninsule du Deccan en Inde à la limite Crétacé- Tertiaire et ce pendant 500.000 ans; à ces éruptions s'ajoute la chute d'une grosse météorite; enfin la compétition opère un tri parmi les espèces animales et végétales et seuls vont survivre les plus adaptées. La crise de la fin du Crétacé n'est donc pas due à une cause unique mais à une série de causes dont la somme va provoquer une crise environnementale majeure».

## VIII- Protection du patrimoine géologique

La Protection de ce patrimoine géologique doit être envisagée :

- d'abord sur site, par la création de réserves naturelles ou géoparcs, permettant d'interdire la collecte d'échantillons à des fins autres que scientifiques, de valoriser des sites géologiques par la création d'itinéraires guidés (qu'on peut tirer des excellents documents des «Notes et Mémoires du service géologique du Maroc»), de réalisation de panneaux explicatifs à fixer sur les géosites, en organisant des conférences grand public, en confectionnant et mettant en vente des moulages (buts éducatif et économique), des films documentaires,...
- puis hors site, par les collections de Musées et par l'éducation relative à la conservation du patrimoine environnemental (au niveau des écoles).

Dans l'état actuel, au vu de la rareté des musées, des magasins (bazars) sont bien développés un peu partout au Maroc, mais particulièrement dans la région du Tafilalt notamment (Erfoud, Rissani, Alnif, Ouarzazate, ...). Ces édifices offrent de jolis spécimens mis à la vente, bien qu'une bonne partie a été façonnée d'une manière erronée (fig. 21).



**Figure 21.** Exposition de fossiles dans un Bazar à Erfoud

De petits musées ont également été élaborés dans le Tafilalt par des particuliers où l'on peut admirer aussi bien la richesse de la région par l'exposition de pièces rares de la région de valeurs scientifiques inestimables que celles d'autres régions par l'exposition de copies de dinosaures et de reptiles et poissons du plateau des phosphates (de Khouribga) et aussi par l'exposition de météorites de tailles et types différents.

L'un des plus importants musées se situe au cœur d'une des principales palmeraies entre Erfoud et Rissani dans une bâtisse traditionnelle offrant à l'extérieur une emblématique copie de dinosaure (fig. 23).

Ce Musée comprend une partie exposition et une partie magasin de vente. Les espèces rares sont jalousement gardées. Son objectif est de vulgariser ce type de produits en le rapprochant d'un public large et diversifié (écoliers, touristes, scientifiques) toutes catégories confondues (l'entrée est gratuite).

Ici, le commerce des fossiles est une source de revenu pérenne pour bon nombre de familles tout au long de l'année (permet d'attirer des touristes dont des scientifiques). La réalisation (mise à jour) des pièces mises en vente nécessite un travail acharné par des équipes de spécialistes (de fortune) pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines pour dégager un trilobite, un crinoïde ou une goniatite (fig. 22, 23 et 24).



**Figure 22.** Divers ateliers de préparation de fossiles destinés à la vente

Cette richesse en fossiles et minéraux est menacée de surexploitation. Seul prime ici le prix de vente alors que les valeurs scientifiques sont souvent laissées de côté. Le Tafilalt figure pourtant dans le réseau mondial des réserves de biosphère de l'UNESCO (convention de 1970 concernant les mesures à prendre pour interdire et empêcher l'importation, l'exportation et le transfert de propriété illicites des biens culturels) cite dans son article premier (paragraphe a) les fossiles comme biens naturels à protéger. Cette convention a été ratifiée par le Maroc en février 2003.





**Figure 23.** Photo du dinosaure à l'entrée du Musée Tahiri d'Erfoud et trilobites de taille et âge différents



**Figure 24.** Exemples de fossiles Trilobites et Crinoïdes qu'on retrouve dans la plupart des bazars

### **Projet du Musée National d'Archéologie et des Sciences de la Terre.**

*Grâce à l'initiative instiguée par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, ce musée verra bientôt le jour sur les rives du Bou Regreg dans le but de faire découvrir au public le passé riche et prestigieux du Royaume. Il aura donc un rôle de préservation (ex-situ) et de mise en valeur du patrimoine naturel et culturel. Le Maroc mérite largement une telle institution qu'il est souhaitable d'étendre à d'autres régions quand on connaît le rôle éducatif de ce genre de structure. Ce Musée retracera donc l'Histoire naturelle du Maroc, qui pourra être lue à travers les collections géologiques regroupant des fossiles d'animaux et de végétaux ainsi que des spécimens de minerais qui retracent les grandes ères géologiques et l'évolution des espèces. Il reflètera aussi l'Histoire et les civilisations de l'Homme en brassant les différentes civilisations depuis les traces de la première activité humaine connues jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle.*

## **IX- Mesures de protection du patrimoine naturel**

Pour mieux protéger, il faudrait envisager des mesures et des lois pour la conservation et l'utilisation rationnelle des ressources géologiques. Ceci passe par l'établissement de l'inventaire national, sous forme de base de données, des sites géologiques à valeur patrimoniale. Il est nécessaire également d'établir des sites web traitant et faisant connaître le «Patrimoine géologique du Maroc». Ces sites devraient comprendre toutes les propositions de lois et des mesures prises par l'administration en charge de cette tâche (Ministère de la Culture, Ministère de l'Énergie et des Mines ) pour une meilleure gestion de ces ressources.

De telles initiatives nécessitent des **mesures réglementaires et incitatives** dont certaines sont déjà prises par le Ministère de l'Énergie et des Mines qui a lancé une étude pour l'établissement de mesures réglementaires pour remédier à la disparition progressive du patrimoine géologique national (par l'établissement de listes de fossiles, minéraux et sites à protéger). Le Plan Directeur des Aires Protégées, établi par

le Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification (HCEFLD), qui a identifié un large réseau de Sites d'Intérêts Biologique et Ecologique (SIBE), évoque de temps en temps les valeurs géologiques qu'il va falloir mieux développer comme contribution à la connaissance, à la préservation et à la protection de ce patrimoine.

Les mesures urgentes se résument comme suit :

- faire un inventaire national pour combler cette lacune et compléter le travail élaboré par le HCEFLD;
- veiller à l'application des mesures établies par le Ministère de l'Énergie et des Mines et aussi du Dahir (Loi) de 2002 relatifs à l'exploitation des carrières, en collaboration avec le Ministère de l'Équipement;
- mettre l'accent sur les moyens d'exploitation durable des ressources et sur les mises en valeur conservatrices de ces ressources.

Des partenariats avec les institutions éducatives sont à encourager dans le cadre de projets intégrés pouvant impliquer les universités (Facultés des Sciences), les AREF (Académies Régionales de l'Éducation et de la Formation), le Ministère de l'Énergie et des Mines (Division du Patrimoine Géologique), les Autorités et Collectivités locales, les Sociétés savantes, la Société civile. Tous doivent se rendre compte qu'il s'agit d'un patrimoine dont l'exploitation abusive est irréversible et que son utilisation rationnelle est devenue aujourd'hui plus que nécessaire.

De telles initiatives permettront la description des sites et de leur richesse par la Cartographie, par le Système d'Information Géographique (SIG) et aussi par l'élaboration de programmes d'inventaire, d'une documentation scientifique, de la vulgarisation des connaissances et sa médiatisation grâce à l'organisation de colloques, de séminaires thématiques et de rencontres avec les élus et les populations locales. Cela entrainera sans nul doute des impacts et des retombées :

- scientifiques (contribution à l'avancement des connaissances sur le patrimoine géologique marocain et à sa conservation en tant que valeur scientifique internationale) en facilitant au public et aux gestionnaires l'accès aux données «patrimoniales» via la Base de données et le Site Web.

- socio-économiques, en contribuant à une exploitation durable des ressources géologiques à caractère patrimonial du Maroc, tout en proposant de nouvelles formes de mise en exploitation des valeurs éducatives et touristiques.

Ces retombées permettront aussi la participation au développement durable par la création d'activités et d'emploi rémunérés autour des géosites.

## X- Conclusions

L'étude du patrimoine géologique marocain nous permet donc de constater que l'histoire de la terre et l'histoire de la vie sur terre sont marquées par plusieurs épisodes enregistrés dans les couches stratigraphiques et leurs contenus en minéraux et fossiles. Elle nous apprend et confirme en même temps que les constituants de la terre bougent (plaques tectoniques), que les climats et le niveau des mers changent sans cesse, que la flore et la faune évoluent constamment et que l'on s'achemine très probablement vers la sixième extinction, à la différence avec les cinq précédentes que celle-ci serait complètement due à la présence de l'homme et de l'impact de ses actions sur les écosystèmes, dont le plus grave reste le réchauffement, qui pourrait provoquer l'élévation du niveau de la mer par suite de la fonte des glaces de l'Arctique et de l'Antarctique.

Il est du devoir des académiciens, des hommes de science et des sociétés savantes d'informer les responsables et les décideurs de ce que nous savons de l'état de la planète Terre, car la connaissance du patrimoine géologique marocain et sa conservation sont des valeurs scientifiques internationales qu'il faut préserver à tout prix. Le futur musée national d'archéologie et des sciences de la terre reste une excellente idée qu'il faudrait multiplier dans la majorité des régions du Maroc, avec peut-être une spécification pour chaque région.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Allain R., Aquesbi N., Dejax J., Meyer C., Monbaron M. Montenat C., Richir P., Rochdy M., Russell, Taquet D.A., 2004 A basal sauropod dinosaur from the Early Jurassic of Morocco. *Comptes rendus Palevol.* 3, 199-208.

Belka Z. (1998).- Early Devonian Kess-kess carbonate mud mounds of the Eastern Anti-

Atlas (Morocco), and their relation to submarine hydrothermal venting. *Jour. Of Sedimentary Research*, 68, 3 pp : 368-377.

Belka Z. Berkowski B., Jakubowisz M., Dopieralska J., Skompski S. & Feist R. (2015).- Life of the dead mounds : an example from the Devonian mud mounds of Hamar Laghdad (Morocco). 31st IAS Meeting on Sedimentology, Cracow; 07.

Beuf S., Biju-Duval B. De Charpal O., Gariel O. & Bennacef A. (1971).- Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara – Sédimentation et discontinuités, évolution structurale d'un craton. Collection «Sciences et technique du pétrole», Vol 18, Publi de l'IFP, 464p.

Bousquet R., El Mamoun, R., Saddiqi, O. & Goffé, B. (2008).- Mélanges and ophiolites: was the Bou-Azzer's ophiolite suite (Morocco) a Franciscan-type wedge during the Pan-African orogeny? in *The Boundaries of the West African Craton* Eds Ennih, N. & Liégois, J.-P., Geological Society, London, Special Publications, 297 pp : 233-247.

Brachert T.C., Buggisch W., Flügel E., Hüssner H.M., Joachimski M.M., Tourneur F. & Walliser O.H. (1992).- Controls of mud mound formation: the Early Devonian Kess-kess carbonates of the Hamar Laghdad, Anti Atlas, Morocco. *Geol. Rundshow.*, 81, pp :15-44.

Clauer N (1976).- Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires : application à la géochronologie de la couverture du craton Ouest-Africain, *Mém. Sci. Géol. (Strasbourg)* 45, 256 p.

Clerc S. (2012).- Modèles de dépôt sous-glaciaires et dynamique de remplissage des vallées tunnel : exemple au Quaternaire (Bray, Irlande) et application à l'Ordovicien supérieur de l'Anti-Atlas (Alnif, Maroc). Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, 330p.

Destombes J., Hollard H. & Willefert S. (1985).- Lower Palaeozoic Rocks of Morocco. In C.H. Holland (Ed), *Lower Palaeozoic rocks of the World.* John Wiley and Sons, New York pp : 91-336.

Gendrot C. (1973).- Environnement du Dévonien récifal au Maroc. *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*, 254 pp : 55-86.

Hilgen F.J., Bissoli L., Iaccarino S., Krijgsman W., Meijer R., Negri A. & Villa G. (2000).- Integrated stratigraphy and astrochronology of the Messinian

GSSP at Oued Akrech (Atlantic Morocco). *Earth and Planet. Sci. Lett.* 182 pp : 237-251.

Hollard H ; (1963).- Tableau stratigraphique du Dévonien du sud de l'Ani-Atlas. *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*, 172 pp : 105-109.

Hollard H. (1974).- Recherches sur la stratigraphie des formations du Dévonien moyen, de l'Emsien supérieur au Frasnien, dans le Tafilalt et dans le Maider (Anti-Atlas oriental). *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*, 264, pp : 7-68.

Hüssner H. (1994).- Reefs, an elementary principle with many complex realizations. *Beringeria*, 11 pp: 3-99.

Lapparent A.F. de, 1955. Etude paléontologique des vertébrés du Jurassique d'El Mers (Moyen Atlas). *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*. 124.

Lavocat R. 1951. Découverte de restes d'un grand Dinosaurien sauropode dans le Crétacé du Sud marocain. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 232, 169-170.

Massa D., Combaz A. & Manderscheid G. (1965).- Observation sur les séries siluro-dévonniennes des confins algéro-marocains du Sud. *Notes & Mém. Comp. Fr. Pétroles*, 8 pp : 1-188.

Michard A. (1976).- Eléments de géologie marocaines. *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc*, N° 252, 439 p.

Michard A., Saddiqi O., Chalouan A., Frizon de Lamotte D. Eds (2008).- *Continental Evolution: The Geology of Morocco : Structure, Stratigraphy, and Tectonic of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction*. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 116, 437p.

Monbaron M. et Taquet P. 1981. Découverte du squelette complet d'un grand Cétiosaure (Dinosaur Sauropode) dans le bassin jurassique moyen de Tilougguit (Haut Atlas central, Maroc), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 292, 2, 243-246.

Monbaron M., Russell D.A., Taquet P. 1999. *Atlasaurus imelakei*, n.g., n.sp., a brachiosaurid-

like sauropod from the Middle Jurassic of Morocco. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 329, 519-526.

Mounji D., Bourque P.A. & Savard M.M. (1996).- Architecture and isotopic constraints on origin of Lower Devonian conical mounds (Kess-kess) of Tafilalt, Anti Atlas, Morocco. 17th Eur. Meeting of Sedimentology, Sfax, 26-28/3/1996, Abstract pp: 192-193.

Roch E. (1934).- Sur des phénomènes remarquables observés dans la région d'Erfoud (confins algéro-marocains du Sud). *Publ. Ass. Etud. Géol. Méditer. Occid.*, 5 pp : 1-10.

Saddiqi O, Michard A. Rjimati E. & Ouanaimi H. (2015).- Recommended geoheritage trails in Southern Morocco : A 3 Ga record between the Sahara desert and the Atlantic ocean. *Geoheritage*, 01, pp : 91-108

Sutcliffe O.E., Dowdeswell J.A., Whittington R.J., Theron J.N. & Craig J. (2000).- Calibrating the Late Ordovician glaciation and mass extinction by the eccentricity of Earth's orbit. *Geology*, 28 pp : 967-970.

Saquaque A., Admou H., Karson S., Hefferan K., Reuber I. (1989).- Precambrian accretionary tectonics in the Bou Azzer-El Graara region, Anti-Atlas, Morocco. *Geology* 17 pp : 1107-1110.

Soulaimani A., Jaffal M., Maacha L., Kchikach A., Najine A., Saidi A. (2006).- Modélisation magnétique de la suture ophiolitique de Bou Azzer-El Graara (Anti-Atlas central, Maroc). Implications sur la reconstitution géodynamique panafricaine. *C. R. Geoscience* 338, pp : 153-160.

Taquet P. (2008).- Les Dinosaures et la crise environnementale de la fin du Crétacé, *Proceedings Acad Hassan II Sci & Tech*, pp : 101-110.

Taquet P. 2000. *L'Empreinte des Dinosaures*. Ed. Odile Jacob.

Tönneböhn R. (1991).- Bildungsbedingungen epikontinentaler Dephalopodenkalke (Devon, SE-Marokko). *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie*, 47 pp : 1-114.

## La Chimie et les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle

**El Mokhtar ESSASSI**

Membre du Collège des sciences physiques et chimiques



La chimie est par excellence la science de la transformation de la matière. Elle est présente dans tout ce qui nous entoure. Il y a un adage qui dit : la chimie est dans tout et réciproquement.

Elle crée de nouvelles molécules, de nouveaux matériaux; ce qui a permis de la considérer comme une science de la création de nouvelles formes de la matière. En tant que facteur de développement de notre civilisation, la chimie jouera un rôle fondamental pour relever les grands défis réservés par le troisième millénaire, grâce à l'émergence d'une chimie utile et novatrice. Elle a transformé nos conditions de vie en fournissant de nouveaux objets.

La chimie s'est rendue indispensable à toutes les disciplines expérimentales en leur fournissant la matière de base. Elle joue également un rôle primordial dans l'explication fondamentale des phénomènes observés en physique, en biologie et en science des matériaux. Cette branche scientifique très fructueuse développe des recherches en interface entre plusieurs disciplines et trouve des applications dans les domaines de l'environnement, des matériaux, de la biologie et de la pharmacologie.

Une chimie utile est une chimie aux interfaces, qui élucide la relation «structurepropriété». Ces interfaces concernent trois domaines : (i) la physique et les sciences des matériaux, (ii) la biologie et les sciences du vivant et (iii) le génie chimique et la science des procédés.



Scribe devant l'accélérateur de particules AGLAÉ.

© C2RMF - D. Bagault

(i) La physique et les sciences des matériaux concernent les polymères, la métallurgie, la chimie du solide, les matériaux complexes, la nanoscience des composites et les matériaux moléculaires.

(ii) Dans le domaine de la biologie et des sciences de la vie, les perspectives thérapeutiques à caractériser s'intéressent à la fixation ou à la reconnaissance de brins d'oligo-nucléosides sur la double hélice d'ADN, à la conception de «bio-puces» et à la mise au point «d'outils transporteurs».

(iii) La valorisation des molécules préparées est réalisée par le génie des procédés qui offre de nombreuses perspectives (la chimie utile, la catalyse, la recherche sur les matériaux et la protection de l'environnement).

### Les enjeux actuels auxquels est confrontée la chimie

Un des enjeux majeurs de notre société concernera la protection de l'environnement qui imposera des contraintes très sévères concernant les concentrations de métaux lourds, les dérivés organo-halogénés, les molécules organiques, les gaz (NO<sub>x</sub>, CO, et SO<sub>2</sub>) dans les effluents liquides, gazeux et les déchets solides. Cette protection fera appel, essentiellement, à la physico-chimie analytique, à la chimie verte et à la chimie curative (la chimie dans l'eau, la catalyse, la synthèse sans

solvants, les matériaux biodégradables). Il est alors important de mettre au point de nouvelles molécules ayant des propriétés physico-chimiques caractérisant les surfactants, les dispersants, les mouillants et les stabilisants.

Un autre objectif considéré comme primordial est celui de fabriquer de nouveaux polymères ou dendrimères susceptibles d'insérer, de transporter ou d'adresser des substances ou des nanoparticules. Le développement d'une nouvelle chimie à l'intérieur de matrices spécifiques et la préparation d'interfaces organique/minéral, constitueront des domaines de recherches très prometteurs.

La chimie est également sollicitée par la synthèse de nouvelles molécules thérapeutiques. A l'interface de la chimie et de la biologie, la pharmacologie est porteuse d'enjeux humains et économiques immenses.

### De nouveaux programmes multidisciplinaires

Ces nouveaux défis seront relevés en proposant des programmes pluridisciplinaires faisant appel à la biologie structurale, à la biologie moléculaire, à la biochimie et à la chimie de synthèse.



Synthèse organique de macromères. © CNRS, CBM - Ph. Plailly

Dans ce cadre, les domaines à explorer concernent la chimie des substances naturelles, les méthodes de criblage et la chimie des biomolécules.

Les substances naturelles sont à l'origine d'environ 60% des médicaments mis au point. Elles sont extraites de plantes, de micro-organismes et d'organismes marins.

Il est à noter que 500.000 espèces de plantes sont encore inconnues et parmi les 300.000 espèces répertoriées, seules 2000 ont été soumises à une recherche d'utilité médicale.



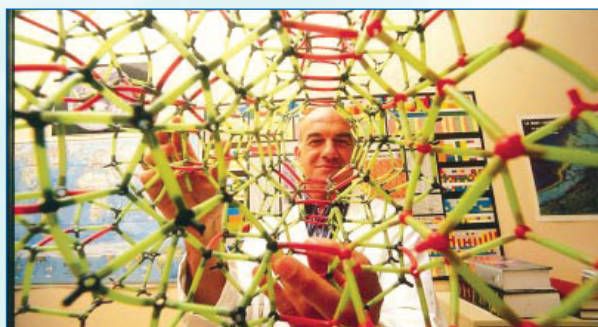
La pervenche de madagascar, CATHARANTHUS ROSEUS. © CNRS, ICSN - Th. Sevenet.

Le développement de la synthèse combinatoire et les moyens modernes de démultiplication, de robotisation et d'extrapolation, permettent de cribler de plus en plus rapidement les molécules et de tester leur activité vis-à-vis de leur cible (ADN, enzymes, systèmes de transport, neuromédiateurs).

Des tests adaptés seront mis au point pour permettre aux chimistes de définir et de multiplier les activités pharmacologiques des biomolécules.

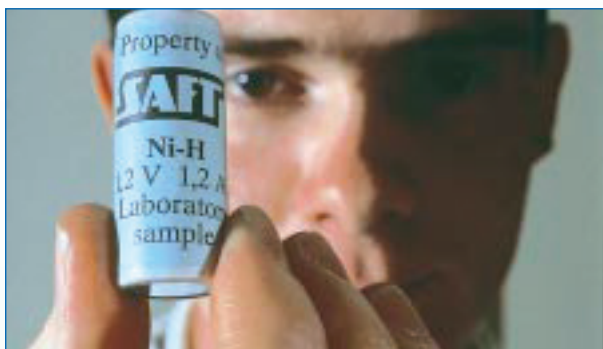
### La chimie du XXI<sup>ème</sup> siècle sera également hybride et poreuse

La mise au point de nouveaux types de matériaux, constitue également un nouveau défi à relever. Des multi-matériaux (matériaux de structure) recherchés par les industriels ont supplanté les nouveaux matériaux des années 80 (matériaux thermomécaniques et composants).



Modèle moléculaire d'une zéolithe ZSM5. © CNRS, IRC - J. Forest

Les chimistes offrent des possibilités importantes en matière d'économie d'énergie (matériaux pour le stockage de l'énergie, matériaux légers, pour le transport, matériaux nucléaires, et nanomatériaux).



Batterie cylindrique nickel hydrure pour dispositifs portables, commercialisée par SAFT. © CNRS, LCMTR - L. Médard



Sphérolite de polyéthylène formé par cristallisation en milieu supercritique. © CNRS, ICS - S. Graff

### Quels autres défis pour la chimie?

La chimie est considérée aujourd'hui comme une science centrale; en effet, elle fabrique elle-même ses propres objets d'étude et fournit aux disciplines voisines les molécules ou matériaux à propriétés spécifiques qu'elles demandent. Tout en restant centrée sur la synthèse de molécules, la chimie s'oriente de plus en plus vers une synthèse raisonnée assortie de la modélisation et de la compréhension de la réactivité.

Les défis à relever par les chimistes concernent :

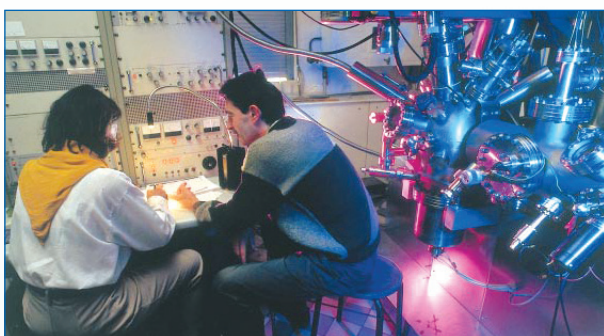
1) la mise au point d'une synthèse renouvelée. Ainsi, il est recommandé d'utiliser une chimie spécifique proposant des méthodes sélectives (chimie organique, chimie organo-métallique, chimie supramoléculaire et chimie douce); une chimie économe tenant compte des aspects environnementaux.

Les réactions à composants multiples sont économes en atome, en solvant et en énergie; ainsi, les chimistes évitent l'utilisation et la production de produits toxiques et proposent de nouvelles méthodes d'activation (chimie dans l'eau, la sonochimie, l'électro-synthèse organique, la chimie sous pression, la chimie en milieu supercritique, la chimie des hautes températures, la chimie combinatoire).

2) l'amélioration des capacités prédictives de la chimie afin d'expliquer la réactivité et les mécanismes d'élaboration des molécules sous l'action de la lumière, du rayonnement, d'une élévation de la température ou d'un courant. Toutes ces méthodes font appel à la modélisation.

Il est nécessaire, en intégrant les différents niveaux de la théorie (du quantique au classique, du microscopique au macroscopique), de développer des méthodologies de simulation multi-échelle et créer des codes de calculs et des logiciels appropriés. Ces modélisations peuvent être confirmées en mettant à la disposition des scientifiques de nouvelles techniques physico-chimiques de caractérisation in situ, enrichies par les progrès récents des nanotechnologies.

La chimie analytique promet, donc, des avancées spectaculaires dans le domaine de l'analyse in situ. Les chercheurs dans ce domaine utilisent la microscopie électronique, les microscopies à champ proche, à force atomique et à effet tunnel, l'imagerie par excitation photonique et électronique, les grands instruments de sources de rayonnement.



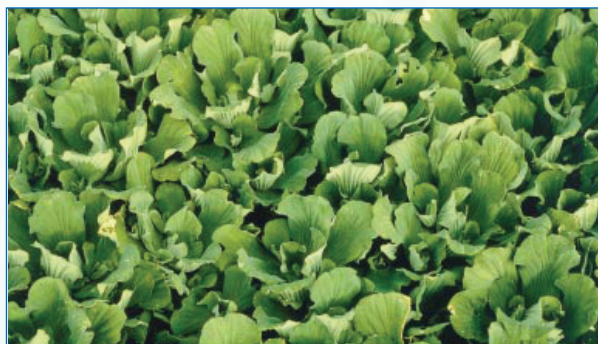
Spectromètre de photoelectron (ESCA) utilisé pour l'étude des surfaces métalliques ou oxydées. Laboratoire de physico-chimie des surfaces, ESA CNRS/ENSICP. © CNRS - C. Lepetit

La caractérisation des intermédiaires est rendue possible par l'observation in situ de volume d'échantillons ou de surface. L'étude des mécanismes et des cinétiques est appelée à se développer grâce au couplage des diverses micro et nano-techniques de caractérisation in situ en catalyse, en électrochimie, en corrosion et en adhésion.

## CONCLUSION

Pour assurer le développement de la société de façon durable pour des milliards d'êtres humains, il est impératif d'utiliser une chimie moderne et respectueuse de la santé et de l'environnement, en développant des produits plus performants et plus «intelligents», moins polluants et moins énergivores, pour répondre aux besoins et aux grands défis actuels de la santé, de l'approvisionnement alimentaire et en eau potable, à la valorisation et préservation des ressources naturelles, à la protection de l'environnement et à la recherche d'autres alternatives pour remplacer les énergies «fossiles» (pétrole, gaz et charbon) par des énergies renouvelables et plus durables (éolienne, solaire, hydroélectrique, géothermique, courants et marées).

Il est à noter que l'énergie est un défi majeur du XXI<sup>ème</sup> siècle. Ainsi, on fera appel à des technologies innovantes, combinant de l'électrochimie, de la chimie de coordination et la chimie du solide, contrôlées à l'échelle nanométrique, et permettant la conversion de l'énergie solaire en carburant. La chimie sera au cœur des questions énergétiques.



Épuration verte des eaux usées domestiques: culture comprimée de laitue d'eau. © CNRS, URA 454 - Y. Charbonnel

Pour participer au rôle central de la chimie au sein du XXI<sup>ème</sup> siècle, il est nécessaire de dispenser un enseignement susceptible de maintenir une forte culture de la chimie, et créer des centres d'excellence en recherches relatifs à la chimie supramoléculaire et des biomolécules, à la pharmaco-chimie, à la chimie des surfaces et des nanomatériaux et à la chimie physique théorique et modélisation moléculaire.

La chimie, considérée comme une science à la fois précise, analytique et pragmatique, doit rester une base de la formation intellectuelle du XXI<sup>ème</sup> siècle.



## Champs de recherche en sciences physiques au Maroc

**Collège des sciences physiques et chimiques  
Académie Hassan II des Sciences et techniques**

Depuis l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques par Sa Majesté le Roi en mai 2006, le Collège des sciences physiques et chimiques suit de près l'évolution de la recherche dans ces disciplines en relation avec la communauté scientifique nationale exerçant dans les universités et instituts scientifiques marocains. Certes, des efforts importants restent à être déployés avant de pouvoir se hisser à une place honorable sur l'échiquier de production scientifique internationale. En dépit de cette donne, il est toutefois intéressant de signaler que la recherche scientifique marocaine dans les sciences physiques et chimiques dispose d'une opportunité pour se positionner sur le plan international en focalisant ses efforts sur des thématiques prioritaires avec des impacts sur le développement scientifique, technique et socio-économique du Royaume. Dans ce qui suit certains des thèmes des sciences physiques traités par la communauté scientifique marocaine seront présentés.

Les sciences physiques s'intéressent à l'étude expérimentale, à la modélisation théorique et à la simulation numérique des phénomènes physiques de la nature. Leurs échelles d'applications s'étalent du microscopique (particules, atomes et nano-objets) à l'infiniment grand (planètes, étoiles, galaxies, et univers). Elles couvrent un large domaine, de l'astrophysique aux nanomatériaux en passant par la biophysique, les techniques utilisées en médecine et par le comportement de la matière dans ses divers états. Ainsi, son point fort est la transversalité. La plupart des développements technologiques qu'a connus la civilisation humaine contemporaine résultent des progrès des sciences physiques et chimiques.

Les sciences physiques ont été aussi à l'origine de nombreuses avancées dans le confort de la vie quotidienne (santé, médecine, agro-alimentaire, électronique technologies de l'information et de la communication, lasers, énergies,...).

La physique sert également le développement de nouvelles disciplines scientifiques telles que les sciences d'environnement, la médecine, la biologie et l'informatique. Elle contribue aussi à l'ingénierie de nouveaux prototypes nano-technologiques et oriente la quête pour le développement de nouveaux outils et méthodes mathématiques et numériques.

Les domaines de la physique sont nombreux et évoluent en fonction des développements scientifiques et technologiques.

La matière condensée traite des thématiques variées telles que les matériaux magnétiques et supraconducteurs; spintronique et nanomagnétisme, systèmes désordonnés et amorphes, systèmes de basse dimensionnalité, couches minces, systèmes hétérogènes, multicouches, systèmes granulaires, composants intermétalliques; matériaux diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques; matériaux semi-conducteurs; nanostructures, conversion photovoltaïque, hétérostructures et superréseaux, dispositifs optoélectroniques; solides super ioniques et les électrolytes solides; matériaux de photo catalyse et photo réactifs; matériaux adsorbants; élimination des polluants liquides, gazeux et métalliques....

Actuellement le domaine de la matière condensée continue à explorer de nouvelles thématiques : matière complexe, matériaux granulaires, solutions colloïdales, micelles, mousses, polymères et matériaux composites et nanocomposites. L'interface physique-biologie et physique-chimie s'efface pour laisser la place à de nouvelles disciplines hybrides permettant de mettre au point des capteurs (bio-puces, réseaux de neurones, etc.), des outils de mesure de forces extrêmement faibles; la synthèse d'oxydes, la mise au point de prototypes de systèmes de fermions fortement corrélés, très importants comme objets d'étude amont; des outils pour mesurer la masse d'objets aussi légers que les virus (10-18 g), des techniques d'observation et de modélisations atomistiques ou des milieux continus.

La physique statistique a permis des progrès importants dans la compréhension des processus hors équilibre. Cette discipline a continué à s'ouvrir vers de nouveaux champs d'applications, en informatique, biologie, médecine, économie, etc .... Ses outils de modélisation et d'analyse se sont révélés très efficaces, par exemple dans l'amélioration d'algorithmes, ou bien dans la prédiction d'évènements rares (tremblements de terre, krachs financiers, ...). L'utilisation des méthodes de la physique statistique dans les phénomènes non-linéaires permet des analogies fécondes entre des systèmes a priori très différents.

Actuellement le champ d'investigation de la physique statistique est très vaste, il touche différents domaines de la science. On peut citer entre autres; la thermodynamique et la recherche de résultats rigoureux et solutions exactes. Les transitions de phases et les phénomènes critiques à l'équilibre; les systèmes hors équilibre; les phénomènes de transfert de chaleur, de matière et de quantité de mouvement, des phénomènes de relaxation, des processus aléatoires; l'évolution dans les systèmes hors équilibre: processus de croissance, fractures, instabilités, hydrodynamiques, réactions chimiques, physique des fractals; systèmes dynamiques et turbulences; diffusion de surface, auto-organisation critique; la matière liquide et les phénomènes d'interface: fluides atomiques, ioniques et moléculaires, gels, liquides métastables, mouillage, effets de surface, systèmes confinés; matière condensée molle; polymères, cristaux liquides, micro émulsions, mousses, membranes, colloïdes, matière granulaire; systèmes quantiques; transitions de phase quantiques, fermions fortement corrélés, condensation de Bose-Einstein, phénomènes quantiques mesoscopiques, localisation; systèmes vitreux et désordonnés; systèmes percolants, verres de spin, verres structurés, transition de verres; systèmes à motivations biologiques; réseaux biologiques, moteurs moléculaires, dynamique à l'échelle cellulaire, modèles d'évolution, modèles de repliement des protéines, modélisation statistique des données biologiques. Les thèmes interdisciplinaires en physique statistique; réseaux, éconophysique, trafic, problèmes des algorithmes, applications à l'astrophysique et à la physique des plasmas.....

Dans le domaine de l'interaction rayonnement matière, des progrès importants ont été faits.

On peut citer comme exemples les lasers de puissance; les condensats de Bose-Einstein, qui permettent maintenant d'aborder la physique d'objets quantiques macroscopiques; l'optique quantique qui fait intervenir des variables continues; les structures isolées de nature spatiales ou temporelles avec leurs possibilités d'application en traitement de l'information; les importants progrès effectués dans la détection et la caractérisation optique ainsi que l'imagerie de nano-objets uniques.

Outre les formulations classiques et quantiques usuelles, un autre volet où les sciences physiques ont connu un succès spectaculaire est certainement les théories quantiques relativistes. Celles ci ont permis de sonder le cœur de la matière, ses constituants fondamentaux et leurs interactions. La découverte des bosons de jauge des interactions électrofaible a été un tournant dans la conception du finiment petit. Les théories quantiques relativistes mettent en jeu des énergies énormes et concernent en particulier la physique des hautes énergies.

La physique des hautes énergies, ou physique des particules élémentaires, avec ses trois volets principaux : expérimental (accélérateurs, détecteurs de particules), phénoménologique (élaboration de modèle quasi-réaliste) et théorique (théorie quantique des champs, théorie des cordes) est une science physique allant au delà de l'échelle du nucléaire. Elle utilise des énergies à la limite de la technologie humaine (soit des énergies allant jusqu'à plusieurs centaines de GeV comme c'est le cas pour le projet LHC du Centre Européen pour la Recherche Nucléaire CERN,  $1\text{GeV}=10^9\text{eV}$ ). Ces énergies concernent les constituants ultimes de la matière et visent à explorer les relations entre les quatre interactions fondamentales qui régissent le monde des particules élémentaires à hautes énergies.

En effet depuis la découverte du modèle standard des particules élémentaires unifiant l'interaction électromagnétique et l'interaction faible (radioactivité) et son passage réussi à la plupart des testes expérimentaux aux échelles d'énergies disponibles, cette discipline quantique relativiste a connu un intérêt de plus en plus croissant; d'abord pour le raffinement des prédictions du modèle Glashow-Salam-Weinberg et ensuite pour explorer les nouvelles questions apportées par cette percée scientifique.

La physique des hautes énergies a accompli de remarquables progrès au cours des cinquante dernières années. Ces progrès ont conduit à identifier un petit groupe de particules élémentaires à la base de toute la matière que l'on trouve dans l'univers. Le modèle standard est encore incomplet; c'est pourquoi la communauté scientifique est si impatiente d'explorer toujours plus les propriétés fondamentales de la matière, avec de nouvelles techniques et des outils puissants.

Les expériences ATLAS et CMS du projet LHC (Large Hadron Collider) du CERN, Suisse, mettant en jeu des énergies énormes de l'ordre du TEV, est une opportunité exceptionnelle pour répondre aux énigmes du modèle standard. Ces expériences, impliquant également plusieurs laboratoires du monde, y compris des laboratoires marocains, ont apporté des réponses à plusieurs questions suspendues; notamment celle concernant le mystère du boson de Higgs (particule essentielle dans l'édifice du modèle standard observée au CERN en 2012) et le rôle de la supersymétrie. Cette découverte a donné une impulsion supplémentaire dans la quête des constituants ultimes de la matière et la relation entre les lois qui les régissent.

Par ailleurs, et à l'instar de la physique de la matière condensée et la physique statistique, la physique des hautes énergies a permis le développement de méthodes de calcul analytique et numérique approximatifs. Ces méthodes de calcul ont été adaptées à d'autres champs disciplinaires, physiques des phénomènes critiques, théorie quantique du solide entre autres. Elle a permis aussi le développement de nouvelle thématique comme la cosmologie primordiale, la physique de matière noire ou les ondes gravitationnelles. Les théories des super-cordes et des D-branes découvertes en milieu des années 1980 constituent actuellement un grand champ d'interaction entre physiciens et mathématiciens. Les nouvelles technologies développées pour la conception des accélérateurs et détecteurs de plus en plus puissants a eu également des impacts sur le développement d'autres sciences, tels que thérapie protonique et l'informatique.

La physique nucléaire est née, il y a 100 ans de la découverte de la radioactivité. C'est la science qui s'occupe de l'étude des phénomènes inhérents au noyau de l'atome et à ses nucléons. La radioactivité

faisant partie intégrante de cette science. Outre l'étude de la structure du noyau, qui vise à comprendre comment les nucléons (protons et neutrons) interagissent pour former le noyau, et la compréhension des mécanismes de réaction, le XX<sup>ème</sup> siècle a vu un développement très important de technologies nucléaires. La radioactivité, et la physique nucléaire que sa découverte aura engendrée, auront en effet d'innombrables applications dont la production d'énergie nucléaire, à des fins pacifiques et militaires, et les applications médicales et industrielles.

L'énergie nucléaire est l'énergie des atomes. Cette énergie, de très grande puissance, peut être libérée de deux façons ; en cassant les noyaux ou en les faisant fusionner. La maîtrise de la réaction de fission permet d'exploiter cette énergie, soit de façon incontrôlée (bombe atomique, bombe H), soit de façon contrôlée (énergie nucléaire mise en œuvre dans les centrales de production d'électricité - réacteurs nucléaires). La fusion nucléaire a les atouts pour devenir l'énergie de demain. Cette technologie multiplie les avantages; elle satisfait au développement durable et s'affranchit des inconvénients majeurs des autres sources d'énergie (projet ITER).

Nous pouvons citer plusieurs applications des neutrons issus des réactions de fission dans les réacteurs nucléaires, outre l'étude de la matière par diffraction ou spectroscopie, le dopage par transmutation, appliqué massivement au silicium pour l'électronique (production mondiale annuelle : 150 tonnes par an), la création de défauts ponctuels, de structures ou de propriétés nouvelles par irradiation aux neutrons, l'analyse par activation neutronique, l'imagerie par radiographie neutronique, ou par topographie neutronique, les tests de comportement sous irradiation de matériaux (destinés au nucléaire, fission ou fusion, en particulier), et enfin la production de radio-isotopes pour la médecine (traceurs, thérapie).

Certains éléments radioactifs naturels constituent de véritables chronomètres pour remonter dans le temps. Des méthodes de datation ont été mises au point, fondées sur la décroissance progressive de la radioactivité contenue dans les objets ou vestiges étudiés. On peut ainsi citer la datation au carbone 14 ainsi que d'autres méthodes telles que la thermoluminescence ou la méthode uranium-thorium.

La radioactivité constitue également un outil irremplaçable pour la médecine. Elle a apporté une révolution dans les explorations des fonctions du vivant. La médecine nucléaire repose d'abord sur l'utilisation de sources radioactives et de l'interaction de ces molécules avec les tissus humains. Cette interaction est exploitée à des fins de diagnostic (radiologie, scintigraphies, ...) ou de traitement (radiothérapie). A partir des années 80 se sont développées les techniques de résonance magnétique nucléaire qui font appel aux propriétés magnétiques des noyaux.

Le domaine de la radioprotection a connu également un grand essor. En physique nucléaire il est très important de connaître la façon dont les divers rayonnements alpha, gamma, rayons-X ou neutroniques interagissent avec la matière (en gros les rayonnements non chargés ou chargés). Cela permet de connaître la façon dont leur énergie cinétique se répartit ou se dissipe dans la matière qu'ils rencontrent sur leur chemin et de s'en protéger de façon adaptée.

La physique nucléaire a contribué par ses innovations scientifiques et techniques au développement de beaucoup d'autres sciences comme la biologie, la génétique, les sciences de la terre et de l'environnement. Les traceurs radioactifs interviennent dans le contrôle de nombreux procédés de fabrication industriels.

Les activités de la physique nucléaire sur le proton et les noyaux exotiques apportent, en liaison avec la nucléosynthèse dans le big-bang et dans les étoiles, un regard nouveau sur l'origine des éléments.

En cosmologie, la science de l'origine de l'univers, la découverte d'une nouvelle forme d'énergie, l'énergie noire (peut-être l'énergie du vide), est l'une des découvertes les plus spectaculaires de ces dernières années. L'astroparticules est un domaine émergent d'observation de l'univers avec de nouveaux messagers (neutrinos, rayons cosmiques de haute énergie, particules très massives dans l'univers, ondes gravitationnelles)

L'ensemble de ces domaines, physique des particules, physique nucléaire, cosmologie, astroparticules, contribuent à faire progresser la compréhension de la physique des origines de la matière, des éléments et de l'univers, thèmes qui interpellent un très large public.

Il faudrait aussi signaler que tout comme la mécanique quantique non relativiste, la physique nucléaire et la physique des particules élémentaires en général n'aurait pu se développer avec cette ampleur sans l'apport considérable de la physique mathématique. Les méthodes exactes ou approximées développées pour la résolution des équations d'ondes, les théories de représentations des groupes et algèbres ainsi que la théorie des champs sont des exemples parmi plusieurs d'autres où la physique mathématique a joué un rôle crucial. Le concept de la géométrie non-commutative en plein essor constitue actuellement une piste vers une théorie quantique de la gravitation et a été appliqué à d'autres problèmes notamment matière condensée et l'effet Hall quantique fractionnaire.

Les rapports\* d'évaluations du système marocain de la recherche scientifique et technique dans les

\* 1- Rapport d'évaluation du système de la recherche scientifique dans les domaines des sciences exactes, sciences de la vie et sciences de l'ingénieur.

2- Atelier National sur l'évaluation du système de la recherche scientifique dans les domaines des sciences exactes, sciences de la vie et sciences de l'ingénieur, 26-27 Mai 2003.

3- Rapport d'évaluation des laboratoires des recherches marocains, une enquête questionnaire, Par Jacques et Anne-Marie Gaillard, 2003.

4- Rencontre Nationale de la recherche scientifique et technologique (MENESFCRS), 3-4 Mars 2006, Vision et stratégie de la recherche, horizon 2025 : Système National de recherche, Analyse de l'état des lieux ; Savoir et innovation : notre voie vers l'avenir.

5- Etat des lieux des formations doctorales dans les universités marocaines (Rapport basé sur les documents de la commission nationale d'accréditation et d'évaluation).

6- Les systèmes Nationaux de recherches et d'innovation du monde et leurs relations avec la France, éléments de rétrospectives, situation actuelle et futurs possibles, les pays du Maghreb, Mai 2005 ; Analyse réalisée par l'observatoire des sciences et des techniques ( OST) en collaboration avec le Ministère des affaires étrangères Français (Direction Générale de la coopération Internationale et du Développement).

domaines des sciences exactes, des sciences de la vie et sciences de l'ingénieur, montrent que parmi les axes de recherches scientifiques qui peuvent être considérés comme prioritaires et à développer au Maroc dans le domaine des sciences physiques et chimiques. Il s'agit des nouveaux matériaux fonctionnels et particulièrement les nanomatériaux et le secteur de l'énergie. Dans ce qui suit, les grandes lignes de ces deux thèmes sont présentées.

### a) Nanomatériaux et nanotechnologies

Les nano-stratégies (pour ne pas dire nanoscience) regroupent l'ensemble des recherches ayant pour objectif la synthèse et l'étude de nano-objets doués de propriétés spécifiques de nature aussi bien biologique, chimique que physique. Elles s'intéressent à des objets à l'échelle du milliardième du mètre et aux phénomènes et propriétés qui lui sont associés.

Au niveau mondial, les nanomatériaux et les nanotechnologies qui leur sont associées, représentent un secteur particulièrement stratégique, en rapide croissance, avec un énorme potentiel de développement économique. Plus qu'une évolution, il s'agit d'une véritable révolution touchant de nombreux domaines d'applications : médecine, pharmacologie, micro et nano- électronique, énergies, technologies de l'information, l'aérospatial etc.

En effet les propriétés de la matière à l'échelle nanométrique sont si particulières qu'elles ne peuvent être extrapolées à partir de celles connues à l'échelle supérieure. Cette révolution se traduit par une nécessaire approche pluridisciplinaire et implique une absolue nécessité de convergence des savoirs des sciences biologiques, chimiques et physiques, mais aussi de l'informatique, du génie des procédés et des mathématiques.

### b) Énergies

En progression constante, la consommation énergétique mondiale conditionne de plus en plus la croissance économique des pays en développement et d'un autre côté le renchérissement des coûts du pétrole et son épuisement, à moyen terme, posent avec acuité la question de l'alternative aux sources énergétiques fossiles. Le Maroc est un pays jusqu'à présent non producteur de ressources énergétiques et

dépendant de l'extérieur pour la quasi totalité de son approvisionnement (consommation 12 Millions de TEP Tonnes Équivalent Pétrole (TEP, 1 TEP=12 000 KWh) + 3 MTEP en bois. Électricité nette appelée ~18.000 GWh) (statistique de l'année ...). La consommation reste relativement faible (0,4TEP/habitant, 480 KWh/habitant, la consommation moyenne dans le monde consomme 1,7 TEP).

Ainsi, tenant compte de ces incidences négatives sur l'économie nationale et sur l'environnement, le Maroc a choisi de s'orienter vers la diversification des sources énergétiques en vue de contrecarrer la double dépendance de notre pays vis-à-vis de l'étranger en matière énergétique et vis-à-vis des ressources fossiles polluantes. Ainsi le Maroc a décidé d'atteindre 42% en 2020, et 52% en 2030 de l'énergie consommée sous forme propre et renouvelable; hydraulique, énergies solaires, géothermique, éolienne ....

Les énergies renouvelables comprenant l'énergie solaire, l'énergie éolienne et hydraulique, géothermique, biomasse, agro-ressources et l'énergie des marées. Si le Maroc présente un handicap en ce qui concerne des énergies fossiles exploitables actuellement, il dispose toutefois de grandes potentialités en énergies renouvelables. Faire de ce volet un axe de recherche nationale prioritaire constitue donc une bonne vision stratégique en ce qui concerne le développement des ressources des énergies dans notre pays.

L'exploitation à grande échelle de certaines de ces ressources demanderait cependant de développer des moyens de stockage de l'énergie. Parmi les techniques de stockage actuellement en développement on cite les batteries à Lithium ions et le stockage de l'hydrogène dans les solides.

## Le Boson de Higgs, particule la plus «chère» de tous les temps

**Rajaâ CHERKAOUI EL MOURSLI**

Membre du Collège des sciences physiques et chimiques



Le Boson de Higgs est sans conteste la particule la plus «chère» de tous les temps : la découverte de cette particule a nécessité la création d'énergies expérimentales rarement enregistrées auparavant sur notre planète et n'a

pu aboutir que grâce à de grandes collaborations internationales qui ont permis de répondre à des défis technologiques et informatiques inédits. Une telle réussite expérimentale a été possible comme on le sait grâce au Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN dont les coûts de construction et d'expérimentations sont estimés à plus de 10 milliards d'Euros.



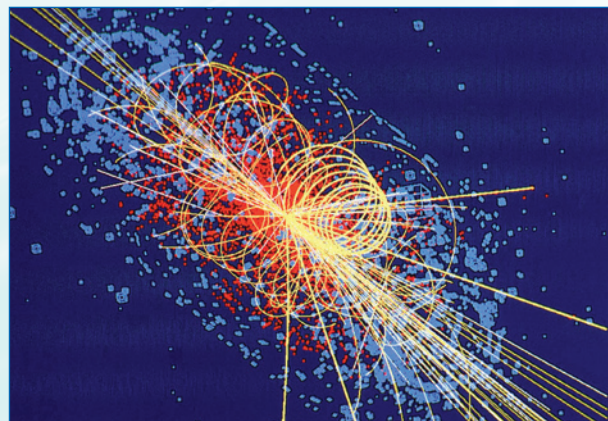
Le grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN

### Pourquoi le Higgs a fait l'objet de tant de battage médiatique ?

- Premièrement, il était la dernière particule non décelée qui permet de vérifier l'exactitude du modèle standard de la physique et qui, ainsi, peut valider plus d'une génération de publications scientifiques. Le Modèle standard de la physique des particules est une théorie élaborée au début des années 1970 qui décrit les particules fondamentales et leurs interactions. Cette théorie prédit avec exactitude une grande variété de phénomènes et est parvenue à expliquer jusqu'à présent presque tous les résultats des expériences en physique

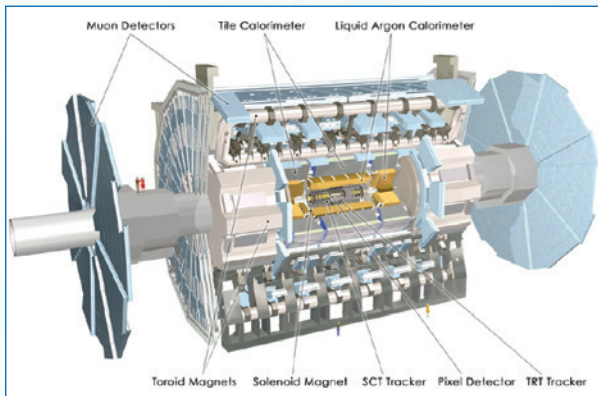
des particules. Mais le Modèle standard est incomplet. Il laisse sans réponse de nombreuses questions auxquelles le LHC contribuera à apporter des éléments d'explication.

- Deuxièmement, le boson de Higgs est la particule qui donne à d'autres particules leur masse ce qui, en fait, est à la fois important et apparemment magique. En général, nous avons tendance à considérer la masse comme une propriété intrinsèque de toutes les choses, mais les physiciens estiment que sans le boson de Higgs, la masse n'existerait pas fondamentalement. La raison revient en fait à ce qu'on appelle le «champ de Higgs». Ce champ a été effectivement mis en théorie avant le boson de Higgs lui-même. Les physiciens ont montré que pour que leurs théories soient valides, il était nécessaire d'imaginer un nouveau champ qui existerait partout dans l'univers. Le seul problème? Par la façon dont il était prédéfini, le champ de Higgs serait pratiquement impossible à observer.



Le champ de Higgs a été pensé pour être responsable du fait que certaines particules ne devraient pas avoir de masse et d'autres en être pourvues ; en un sens, le moyen universel qui sépare les particules sans masse en différentes masses. Ceci est appelé brisure de symétrie : le champ de Higgs est pensé pour briser la masse-symétrie de certaines particules qui sont par ailleurs symétriquement sans masse.

Ce ne fut que plus tard que les physiciens ont réalisé que si le champ de Higgs existe, son action nécessiterait l'existence d'une particule porteuse correspondante ; et les propriétés de cette particule hypothétique étaient telles que nous pourrions effectivement être en mesure de l'observer. Cette particule fait partie d'une classe appelée les bosons (les physiciens ont appelé le boson qui allait avec le champ de Higgs le boson de Higgs). Il est un soi-disant «porteur de force» pour le champ de Higgs, tout comme les photons un support de force pour le champ électromagnétique (EM) de l'univers. Les photons sont, dans un sens, des excitations locales du champ EM, et dans ce même sens, le boson de Higgs est une excitation locale du champ de Higgs. Prouver l'existence de la particule avec ses propriétés prédites par les physiciens revenait effectivement à prouver l'existence du champ directement.



L'expérience ATLAS, une des 5 expériences du collisionneur LHC au CERN

Après de nombreuses années de planification, le collisionneur (LHC), une expérience assez massive, démarre le 10 septembre 2008. Cette boucle de 27 kilomètres est jalonnée d'aimants supraconducteurs associés à des structures accélératrices qui augmentent l'énergie des particules qui y sont propulsées, provoquant ainsi des collisions assez violentes pour briser ces particules en constituants fondamentaux, et déformer l'espace autour du point d'impact. Pour la petite histoire, ces énergies ont été si grandes que certains ont même paniqué et ont déclaré que le LHC pourrait détruire le monde, tandis que d'autres sont allés jusqu'à décrire une observation du boson comme un coup d'œil dans une autre dimension.

Ce n'est que le 14 Mars 2013, après des analyses de données très importantes et une bonne statistique, que le CERN a officiellement annoncé la confirmation du boson de Higgs. Il y a même des hypothèses pour suggérer l'existence de plusieurs bosons de Higgs, mais cette idée a besoin d'un complément d'études significatives.

Le prix Nobel de physique fut octroyé cette année à François Englert et Peter Higgs pour leur découverte théorique du mécanisme contribuant à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques et récemment confirmée par la découverte, par les expériences ATLAS et CMS auprès du LHC du CERN, de la particule fondamentale prédite par cette théorie».



L'annonce de la découverte du Boson de Higgs au CERN

### Quelle est la prochaine étape? A quoi rêvent les physiciens ?

Le LHC a récemment redynamisé ses activités avec des améliorations importantes et un niveau d'énergie pratiquement double par rapport à l'exploitation précédente. Cette énergie très élevée permettra d'explorer de nouveaux territoires pour repousser les limites de notre compréhension de la structure fondamentale de l'Univers, de l'antimatière à l'énergie sombre. La matière noire est pensée pour interagir avec la matière ordinaire uniquement à travers le moyen de gravité - et en créant de la masse, le boson de Higgs pourrait être crucial pour comprendre exactement comment. Le principal défaut du modèle standard est qu'il ne peut pas tenir compte de la gravité - qui pourrait le faire serait appelé Grande Théorie Unifiée - et certains théoriciens espèrent que la particule / champ de Higgs pourrait être un pont pour y arriver.

Dans tous le cas, l'existence du boson de Higgs est confirmée; mais ce phénomène physique n'est pas entièrement compris. Les futures expériences permettront-elles de confirmer la super-symétrie, que l'idée que la particule de Higgs pourrait se désintégrer en la matière noire elle-même? Ou pourraient-elles confirmer chaque prédiction du modèle standard sur les propriétés du boson de Higgs?

C'est pourquoi les expériences auprès du LHC s'efforcent de trouver des indices d'une «nouvelle physique», qui permettrait de résoudre certaines de ces énigmes.

## Entropimétrie électrochimique : principes et applications aux batteries lithium-ion

Rachid Yazami

Energy Research Institute, Nanyang Technological University, Singapore  
Membre de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

### I. Introduction : un peu de théorie



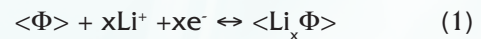
Le terme «Entropimétrie» qui signifie littéralement la mesure de l'entropie n'est pas encore d'un usage commun par la communauté scientifique. Cette lacune est probablement due au fait qu'il est souvent admis que l'on ne peut pas mesurer l'entropie

«S» d'un système. Cependant, en tant que fonction d'état, une variation d'entropie «DS» entre deux états d'un système est mesurable. La notion d'entropie est souvent liée au désordre dans un système. S est définie à l'échelle microscopique par la théorie statistique de Boltzmann à travers sa fameuse formule  $S = k \ln \Omega$  dans laquelle  $k$  = constante de Boltzmann et  $\Omega$  = le nombre d'états possibles. A l'échelle macroscopique, l'entropie peut être définie par la formule de Clausius  $S = Q/T$ ,  $Q$  = quantité de chaleur accessible du système et  $T$  = température absolue.

L'Entropimétrie électrochimique est relativement simple à mettre en œuvre du fait qu'elle repose sur la mesure dans une cellule à l'équilibre de trois grandeurs : le potentiel électrique  $E^0$ , la température  $T$  et la quantité d'électricité ayant traversé la cellule à l'instant  $t$ ,  $q(t)$ . Cette dernière peut être déterminée par coulométrie ( $q(t) = \int_0^t i(t) dt$  (le courant électrique  $i(t)$  et le temps  $t$ )).

Dans la suite de cet article, nous utiliserons les termes 'cellule électrochimique', 'demi-pile', 'cellule complète ou batterie' pour désigner respectivement un système à deux électrodes dont au moins une est une électrode de travail (anode ou cathode dans une batterie au lithium), une cellule électrochimique avec une électrode de travail et une électrode de référence et enfin une cellule électrochimique à deux électrodes de travail ; une anode (pole -) et une cathode (pole +).

Dans le domaine des batteries au lithium, le potentiel thermodynamique d'une électrode à insertion  $\langle H \rangle$  dépend de la quantité de lithium 'x' insérée (en rapport avec  $q(t)$ ) et de la température  $T$ . En représentant schématiquement la réaction d'insertion du lithium dans la structure d'un matériau d'électrode  $\langle \Phi \rangle$  par l'équation:



La variation de l'énergie libre  $\Delta G(x, T)$  est directement liée à  $E_0(x, T)$  par l'équation classique :

$$\Delta G(x, T) = -F \cdot E_0(x, T), \quad F = \text{constante de Faraday} \quad (2)$$

Par ailleurs, la variation de l'énergie libre est liée à celles de l'enthalpie  $\Delta H(x, T)$  et de l'entropie par l'équation :

$$\Delta G(x, T) = \Delta H(x, T) - T \Delta S(x, T) \quad (3)$$

Dans le domaine de température relativement limité des études courantes sur les batteries, l'hypothèse est généralement admise que  $\Delta H(x, T)$  et  $\Delta S(x, T)$  ne varient pas significativement avec  $T$ . Par conséquent, en dérivant l'Eq. (3) par rapport à  $T$  et en combinant avec Eq. (2) on obtient :

$$\Delta S(x) = - \left. \frac{\partial \Delta G(x, T)}{\partial T} \right|_x = F \left. \frac{\partial E_0(x, T)}{\partial T} \right|_x \quad (4)$$

et

$$\Delta H(x) = -F \left( E_0(x, T) - T \left. \frac{\partial E_0(x, T)}{\partial T} \right|_x \right) \quad (5)$$

Ainsi, la mesure du potentiel d'électrode à l'équilibre et de sa dérivée par rapport à la température à un taux d'insertion défini 'x' (associé à l'état de charge), permet de déterminer les variations d'entropie et d'enthalpie. C'est en effet sur les Eq. 4 et 5 que se fondent l'entropimétrie et l'enthalpimétrie présentées dans cet article. Notons que ce que dans les Eq. 4 et 5,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  représentent, respectivement, le taux de variation de l'entropie  $S$  et de l'enthalpie  $H$  à la composition 'x' de l'électrode ou à l'état de charge 'x' d'une cellule complète. Ainsi,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  se définissent par les équations suivantes :



$$\Delta S(x) = \left. \frac{\partial S(x)}{\partial x} \right|_x \quad (6)$$

et

$$\Delta H(x) = \left. \frac{\partial H(x)}{\partial x} \right|_x \quad (7)$$

Les variations d'entropie ou d'enthalpie entre deux états de charge  $x_1$  et  $x_2$  sont obtenues par intégration des équations 4 et 5, respectivement.

$$\Delta S(x_1, x_2) = \Delta S|_{x_1}^{x_2} = \int_{x_1}^{x_2} \Delta S(x) dx \quad (8)$$

et

$$\Delta H(x_1, x_2) = \Delta H|_{x_1}^{x_2} = \int_{x_1}^{x_2} \Delta H(x) dx \quad (9)$$

Notons enfin que toutes les équations 2 à 9 précédentes s'appliquent à tous les types de réactions d'électrode, y compris celles dites à déplacement ( $AB + xLi^+ + xe^- \leftrightarrow A + Li_xB$ ) ou d'alliage qui ne sont pas des réactions d'insertion. Cependant, les électrodes à insertion représentent l'écrasante majorité de celles utilisées dans les batteries commerciales.

Dans cet article, nous présenterons quelques exemples de résultats d'entropimétrie (et 'l'enthalpimétrie' (ou calorimétrie)) qui découlent des équations (4) et (5) afin d'illustrer les différentes applications dans la caractérisation de matériaux d'électrodes à insertion ainsi que de celle de différentes batteries lithium-ion commerciales. Dans ces dernières, la force électromotrice (notée ici open-circuit voltage OCV ou open-circuit potential OCP) est la différence entre le potentiel de la cathode (pole +) et de l'anode (pole -) de la cellule selon l'équation :

$$E_0^b(x_b, T) = E_0^+(x_c, T) - E_0^-(x_a, T) \quad (10)$$

dans laquelle  $x_b$ ,  $x_c$  et  $x_a$  représentent respectivement l'état de charge de la batterie, de l'anode et de la cathode.

En appliquant les équations (2 à 7), les autres fonctions d'état en découlent :

$$\Delta S^b(x_b) = \Delta S^+(x_c) - \Delta S^-(x_a) \quad (11)$$

et

$$\Delta H^b(x_b) = \Delta H^+(x_c) - \Delta H^-(x_a) \quad (12)$$

Dans une cellule complète idéale, les états de charge  $x_b$ ,  $x_c$  et  $x_a$  sont égaux. Cependant, pour différentes raisons, dans la pratique, cette égalité est rarement vérifiée. Les grandeurs thermodynamiques partielles ( $E_0$ ,  $\Delta S$  et  $\Delta H$ ) de l'anode et de la cathode sont obtenues grâce à

l'utilisation de demi-piles, généralement avec du lithium métal comme contre-électrode et comme électrode de référence et le matériau d'anode ou de cathode comme électrode de travail.

L'intérêt de l'entropimétrie réside dans le fait qu'en intégrant la température comme paramètre thermodynamique, plus d'information est obtenue sur le comportement des matériaux actifs au cours des cycles charge/décharge et du vieillissement comme nous illustrerons dans la suite de l'article. En fait, les profils d'entropie et/ou d'enthalpie montrent des variations plus marquées que celui du potentiel, en particulier lors d'une transition ou de changement de phase. Les équations (11) et (12) prévoient que toute variation significative de l'entropie et de l'enthalpie dans l'une des électrodes affectera les profils respectifs de la cellule complète. Cette propriété permet en particulier de relier le vieillissement de la cellule à celui plus important de l'une des électrodes.

## II. Entropimétrie des matériaux d'électrode

Les résultats présentés dans cette partie ont été obtenus sur des demi-piles Li/électrolyte/matériau d'électrode. Loin d'être exhaustifs, ils sont montrés avec afin d'illustrer l'apport de l'entropimétrie à la caractérisation plus fine des phénomènes liés à l'insertion et la désinsertion du lithium dans quelques matériaux connus pour leur application pratique dans les batteries commerciales.

### 1. Matériaux d'anode : le graphite

Le graphite est le matériau d'anode le plus communément utilisé dans les batteries lithium-ion commerciales. Cette application a été introduite par l'auteur en 1980 et a connu depuis un essor considérable.

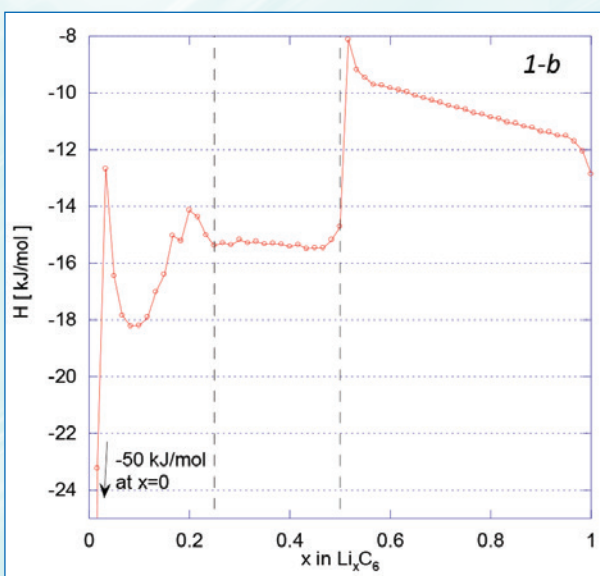
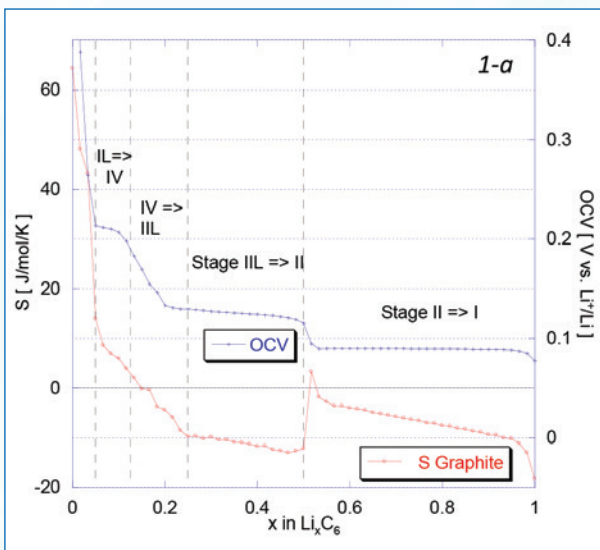
La réaction d'insertion du lithium dans le graphite peut être schématisée par l'équation:



L'étude cristallochimique du système graphite-lithium montre une série de transitions de phases, en particulier celles se produisant vers  $x=0,03$ ;  $x=0,33$  et à  $x=0,5$ . Elles correspondent respectivement aux équilibres de phases graphite  $\leftrightarrow$  stade 1D, stade 2L  $\leftrightarrow$  stade 2 et stade 2  $\leftrightarrow$  stade 1 (stade=nombre de feuillets graphitiques entre deux couches successives de lithium inséré, D=dilué, L=liquide).

La Figure 1-a montre les profils ( $E^0(x)$ ,  $\Delta S(x)$ ) et la Figure 1-b celui  $\Delta H(x)$  d'une électrode en graphite naturel [1]. Toutes ces courbes montrent des variations liées à la formation de stades ('stage') d'insertion rapportés sur la Fig. 1-a. Cependant, alors que la courbe  $E^0(x)$  montre un plateau quasi-horizontale dans le domaine de stœchiométrie  $0.55 < x < 0.95$ , celles de  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  montrent des profils en pente. Cette différence permet en particulier de déterminer avec précision la valeur de 'x' dans ce domaine de composition, mesure que la courbe  $E^0(x)$  seule ne permet pas de faire.

Figure 1 : Profils de  $E^0(x)$  et  $\Delta S(x)$  (1-a) et  $\Delta H(x)$  (1-b) d'une électrode en graphite naturel



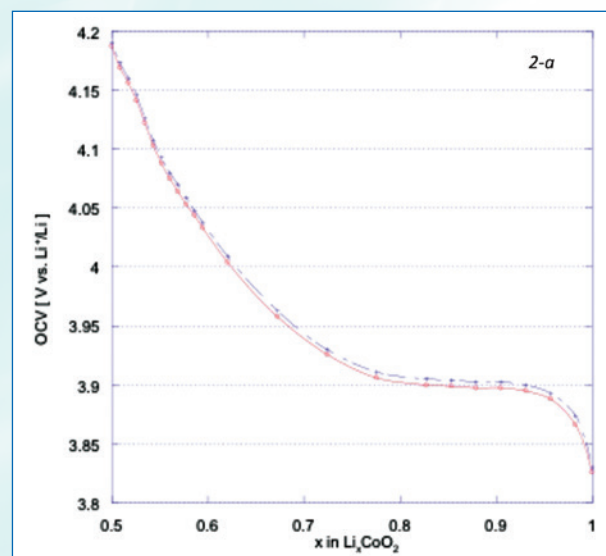
## 2. Matériaux de cathode :

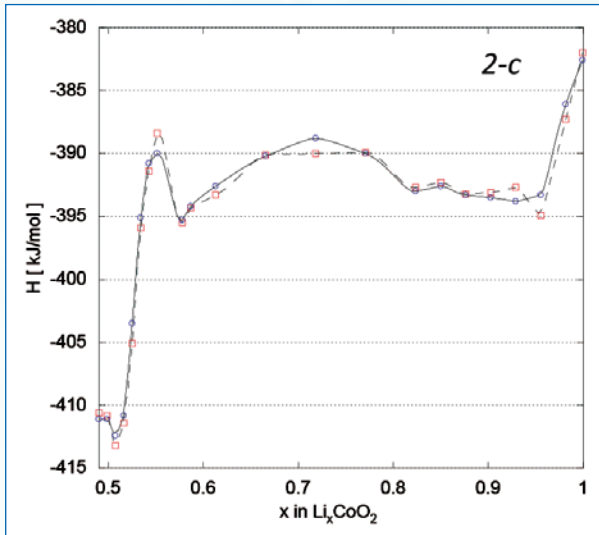
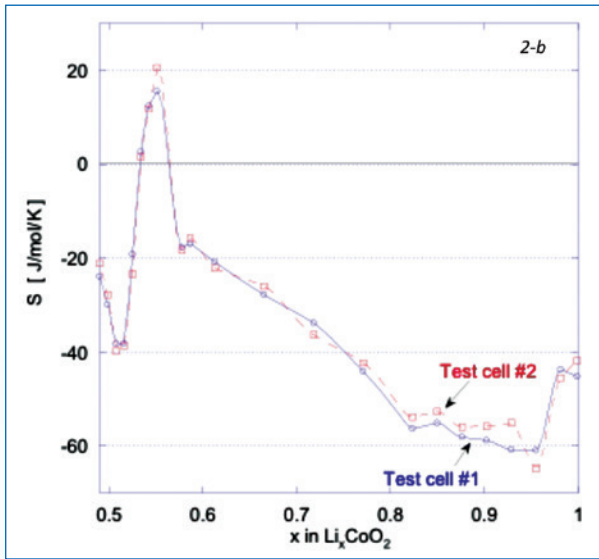
### a. Oxyde de lithium et de cobalt (LCO)

L'oxyde mixte de lithium et de cobalt  $\text{LiCoO}_2$  introduit par John Goodenough en 1980 [2], fut le matériau de cathode utilisé dans les premières batteries au lithium-ion commerciales. Sa structure cristallographique consiste à un empilement de plans  $\text{CoO}_2$  séparés par un espace de van der Waals dans lesquels le lithium est inséré et désinséré au cours de la décharge et de la charge, respectivement. Le domaine de stœchiométrie utilisable dans la formule  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  est  $0.5 \leq x \leq 1$ . Plusieurs transitions de phases ont été décrites dans la littérature concernant  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$ , la plus significative étant celle se produisant entre une phase hexagonale et une phase monoclinique autour de  $x=0.55$ . D'autres transitions de phases sont observées à  $x \sim 0.98$ ,  $x \sim 0.95$ ,  $x \sim 0.8$  correspondant à la formation successive de différentes phases de symétrie hexagonale.

Les figures 2-a, 2-b et 2-c montrent respectivement les profils  $E^0(x)$ ,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  de l'électrode  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$ . Il est intéressant de constater la différence entre le profil  $E^0(x)$  qui décroît de manière monotone sans montrer de plateau et ceux de  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  lesquels montrent des variations significatives, en particulier lors de la transition hexagonal-monoclinique avec un important pic à  $x=0.55$ . Ceci illustre l'intérêt de l'entropimétrie qui permet de décrire plus précisément le diagramme de phase du système  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$ .

Figure 2 : Profils de  $E^0(x)$  (2-a),  $\Delta S(x)$  (2-b) et  $\Delta H(x)$  (2-c) d'une électrode  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$





**b. Oxyde de lithium et de manganèse (LMO)**

L'oxyde mixte de lithium et de manganèse utilisé dans les batteries commerciales au lithium-ion a comme formule  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO). Sa structure cristallographique est de symétrie cubique (spinel). Son domaine de stœchiométrie utile est  $0 \leq x \leq 1$  dans  $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$  dans lequel la structure spinelle est préservée. Cependant, lors d'une surdécharge de  $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ , le taux en lithium 'x' dépasse 1. Une phase de symétrie tétragonale apparaît alors rendant le système irréversible.

LMO présente un certain nombre d'avantages par rapport à LCO tels un coût moins élevé du fait de l'utilisation de Mn plus abondant et bon marché que le Co, une tension de décharge plus élevée, une meilleure sécurité et une cinétique de charge/décharge plus favorable. Cependant, LMO est

moins stable au-delà de 55 °C du fait, entre autres, de la dissolution de  $\text{Mn}^{2+}$  dans l'électrolyte.

Les figures 3-a, 3-b et 3-c montrent respectivement les profils  $E^0(x)$ ,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  de l'électrode  $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ .  $E^0(x)$  contient les deux plateaux de longueur équivalente, respectivement centrés à 4.12V et 3.95V. La baisse rapide de  $E^0(x)$  à  $x \sim 0.5$  correspond à une transition ordre-désordre dans la structure spinelle [3]. Celle-ci se manifeste par un minimum dans la courbe  $\Delta S(x)$ . Cette dernière atteint un second minimum à  $x \sim 0.95$  qui correspond au déclenchement prématuré de la transition de phase cubique-tétragonale impliquant un effet Yahn-Teller. Il est à noter que LMO existe dans un large domaine de non-stœchiométrie (excès de Li, de Mn et défaut de O) ce qui affecte ses propriétés thermodynamiques.

Figure 3 : Profils de  $E^0(x)$  (3-a),  $\Delta S(x)$  (3-b) et  $\Delta H(x)$  (3-c) d'une électrode  $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$

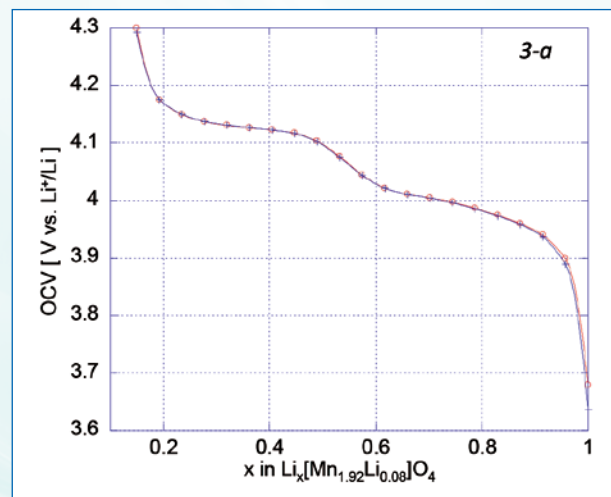


Figure 3-a

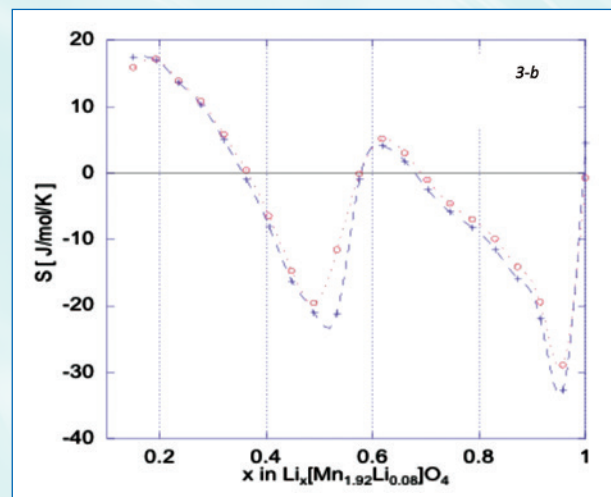


Figure 3-b

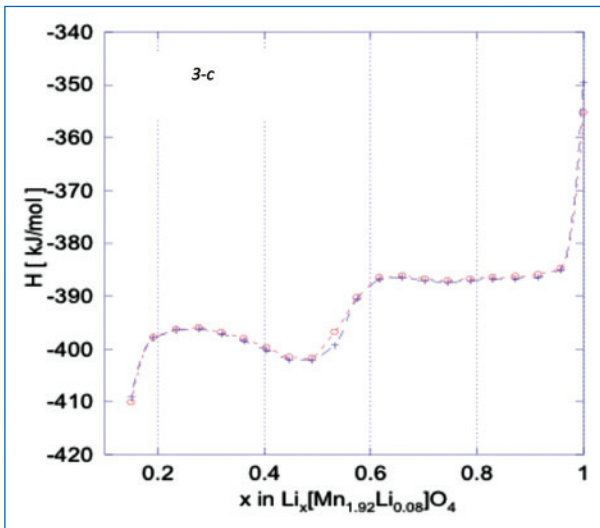


Figure 3-c

**c. Oxyde mixte de lithium et de (Mi, Mn, Co) (NMC)**

De formule générale  $\text{LiNi}_u\text{Mn}_v\text{Co}_w\text{O}_2$  ( $u+v+w=1$ ), NMC est une famille de matériaux développés plus récemment, dont le composé  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  (dit «1/3,1/3,1/3») est le plus représentatif [4]. Selon sa formulation, un matériau NMC peut montrer des avantages par rapport à ses analogues tels une meilleure stabilité thermique, une cinétique de charge/décharge plus rapide et une durée de vie en cyclage plus longue.

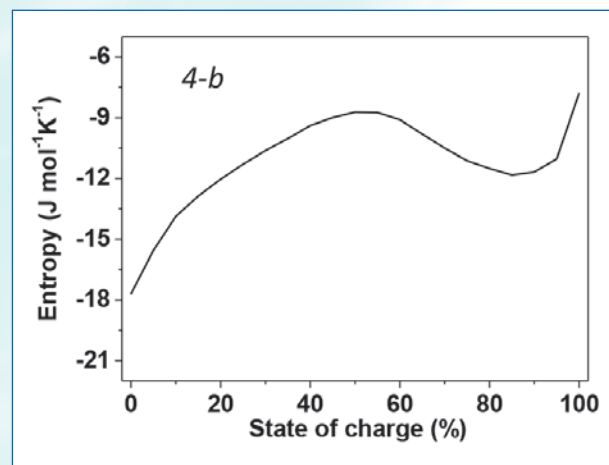
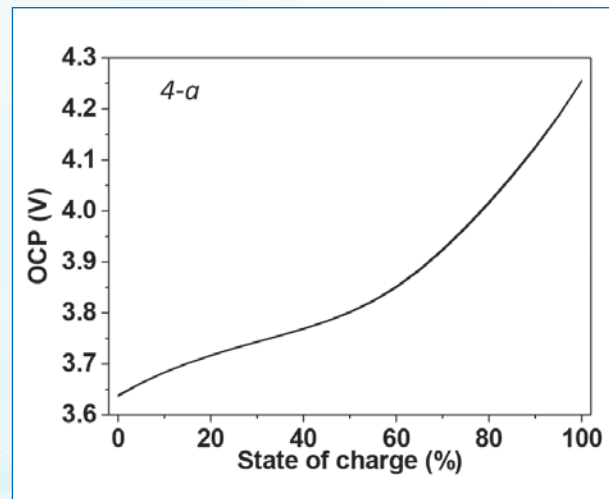
Le NMC a la même structure hexagonale que LCO, le lithium occupant l'espace de Van der Waals entre les feuillets  $(\text{NMC})\text{O}_2$ . Il est possible d'extraire plus de 0.5 Li/mole de NMC, ce qui confère à ce matériau une capacité massique supérieure à celle de LCO (~200 mAh/g pour NMC au lieu de ~140 mAh/g pour LCO). De ce fait la densité d'énergie d'une batterie à base de NMC est supérieure à celle à base de LCO (>200 Wh/kg vs. 150Wh/kg). Tenant compte en plus d'un moindre coût, NMC est appelé à graduellement remplacer LCO dans les 10 prochaines années.

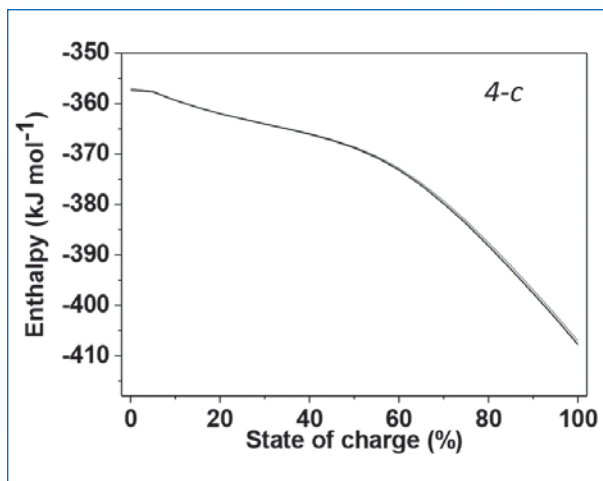
Les figures 4-a, 4-b et 4-c montrent respectivement les profils  $E^0(x)$ ,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  d'une demi-pile à base de  $\text{Li}_x\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ . Si le profil  $E^0(x)$  ressemble à celui de LCO, ceux de  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  en sont bien différents. En particulier, la transition hexagonale-monoclinique est absente dans NMC. Seul un maximum assez large dans le profil  $\Delta S(x)$  apparaît à un état de charge voisin de 60%. Ce maximum pourrait être associé au passage par un maximum et par

un minimum respectivement des paramètres 'c' et 'a' de la maille hexagonale vers 60% d'état de charge.

En plus de LCO, LMO et NMC, deux autres matériaux de cathode sont utilisés à grande échelle dans les batteries lithium-ion. Il s'agit de l'oxyde lithié de nickel-cobalt-aluminium ( $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$ ; 'NCA') et du phosphate lithié de fer  $\text{LiFePO}_4$  ('LFP'). Ces derniers représentent aujourd'hui environ 25% du total des batteries. Il est projeté que leur part du marché atteindra près de 40% en 2025. Cette progression se fera aux dépens de LCO (33% en 2014, 25% en 2025) et de LMO (19% en 2014 et 9% en 2025). NMC et NCA augmenteront respectivement leur part de marché de 23% à 25% et de 8% à 14% entre 2014 et 2025.

Figure 4 : Profils de  $E^0(x)$  (4-a),  $\Delta S(x)$  (4-b) et  $\Delta H(x)$  (4-c) d'une électrode  $\text{Li}_x\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$





### III. Entropimétrie des batteries au lithium

La différence entre une demi-pile et une pile complète est que cette dernière utilise deux électrodes de travail, une première; l'anode, fonctionnant à bas potentiel électrique, la seconde; la cathode, à plus haut potentiel. Généralement l'anode et la cathode sont à base de poudres de matériaux actifs liées entre elles par un liant polymère avec un additif de conductivité (souvent à base de carbone). Les films d'anode et de cathode sont déposés respectivement sur de fines feuilles en cuivre et en aluminium assurant le transport des électrons. L'anode et la cathode sont séparées par un polymère microporeux permettant la circulation des ions  $\text{Li}^+$  entre les électrodes.



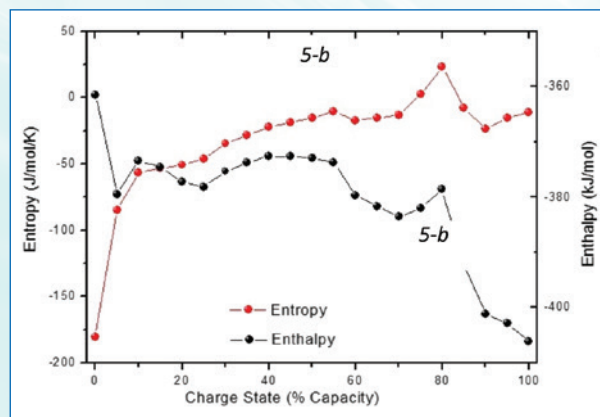
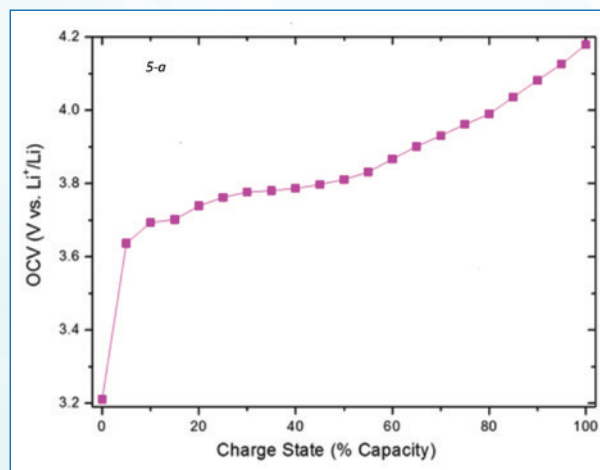
Système BA2000, analyseur entropimétrique de batteries

#### 1. Système graphite/LCO

Le couple carbone/LCO fut le premier à être commercialisé au Japon au début des années 90. Parmi les matériaux carbonés testés à l'anode, le graphite a montré les meilleures performances et il a été rapidement adopté comme matériau de choix et ce, à quelques exceptions minoritaires près (titanate de Li, anodes à base de silicium,...), pratiquement quelle que soit la nature de la cathode.

Les figures 5-a et 5-b montrent respectivement les profils  $E^0(x)$  et  $(\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x))$  d'une cellule graphite/LCO ( $x$ =état de charge) [1]. Il paraît clairement que les courbes  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  montrent plus de variations que la courbe  $E^0(x)$ . Les points particuliers montrant des minima et maxima dans les profils  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  correspondent à des transitions de phase dans l'anode et la cathode, décrites dans la section précédente. Une étude sur l'effet du vieillissement de la batterie graphite/LCO sur le comportement thermodynamique a montré que les points à  $x=5\%$  et  $80\%$  sont les plus sensibles à la détérioration de la structure l'anode et de la cathode, respectivement. Ces points seront utilisés dans la suite pour déterminer l'état de santé et de sécurités de ces batteries.

Figure 5 : Profils de  $E^0(x)$  (5-a),  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  (5-b) d'une batterie graphite/LCO

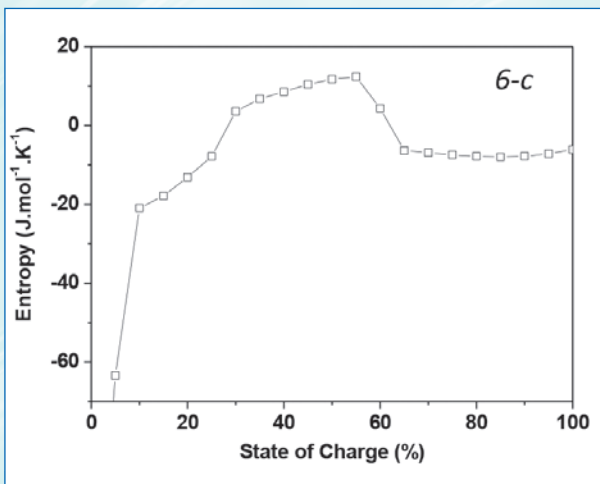
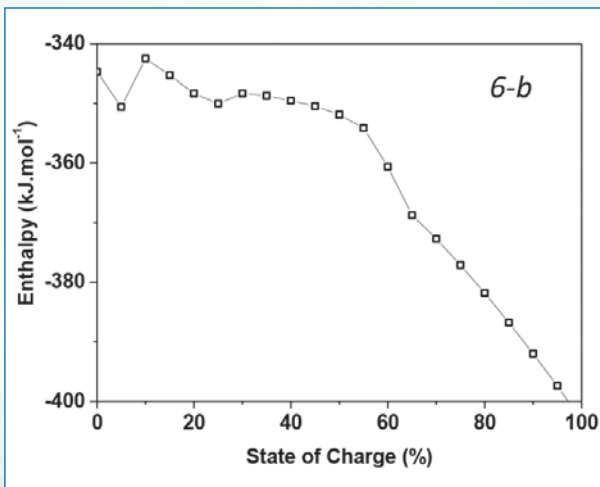
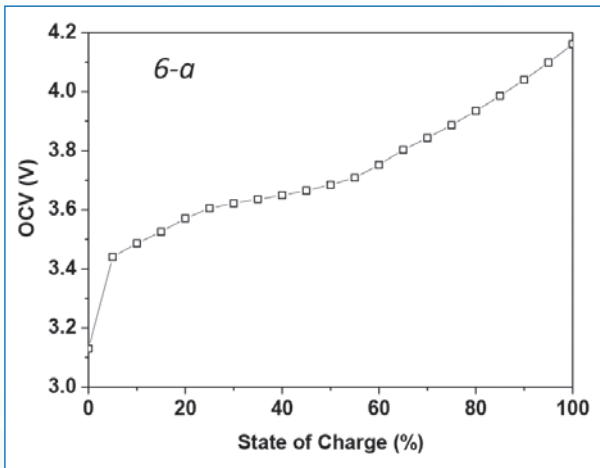


#### 2. Système graphite/MNC

Les Figures 6-a, 6-b et 6-c montrent respectivement les profils  $E^0(x)$ ,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  d'une cellule graphite/NMC de composition  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  ( $x$ =état de charge). Là aussi, les

courbes  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  montrent plus de variations que celle monotone de  $E^0(x)$  et par-là apportent plus d'information sur le comportement de cette batterie.

**Figure 6 :** Profils de  $E^0(x)$  (6-a),  $\Delta S(x)$  (6-b) et  $\Delta H(x)$  (6-c) d'une batterie graphite/NMC



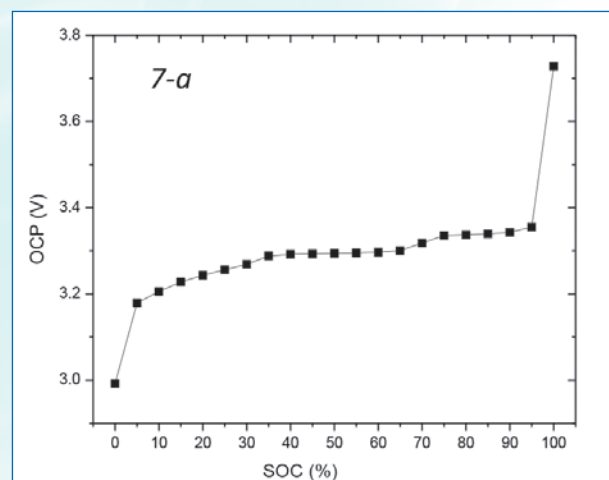
Autant le profil  $E^0(x)$  est proche de celui de la batterie graphite/LCO, ceux de  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  en sont bien distincts. Ceci est une conséquence de la différence entre les diagrammes de phase de NMC et de LCO. On remarque un minimum sur le profil  $\Delta H(x)$  à  $x \sim 5\%$  et un maximum dans  $\Delta S(x)$  vers  $x = 60\%$ . Comme nous l'avons déjà évoqué, ces 'anomalies' portent les traces de la transition et du changement de phase dans le graphite et dans NMC, respectivement.

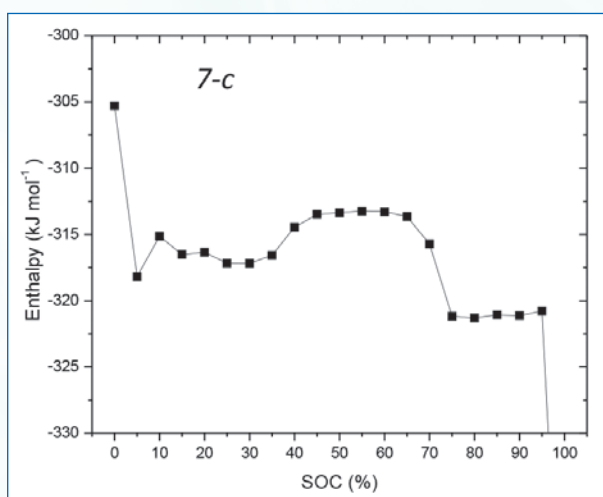
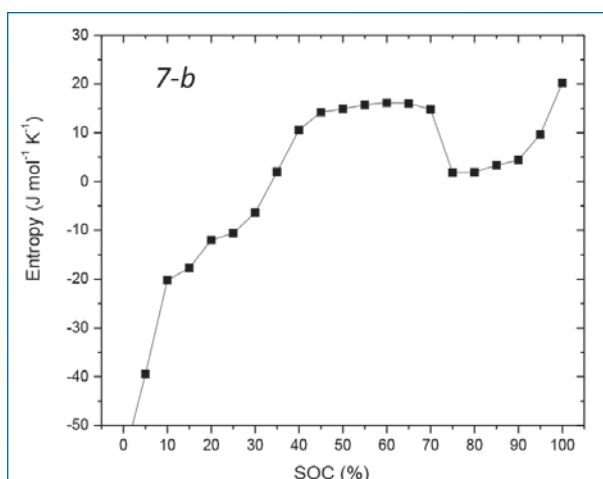
### 3. Système graphite/LFP

La cathode LFP est le stéréotype d'un système biphasé à base de  $\text{LiFePO}_4$  et de  $\text{FePO}_4$ . Ces deux phases cristallisent dans le même système de symétrie rhomboédrique [5]. De ce fait, la demi-pile Li/LFP (qui n'est pas présentée dans cet article) montre un plateau de potentiel vers 3.4V sur un large domaine de stœchiométrie  $0.1 < x < 0.9$  dans  $\text{Li}_x\text{FePO}_4$  rendant ainsi inexploitable la mesure de  $E^0(x)$  pour déterminer un état de charge.

Cependant, comme le montrent les Figures 7-a, 7-b et 7-c des profils respectifs de  $E^0(x)$ ,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  d'une cellule graphite/LFP, ces profils sont loin d'être plats, en particulier ceux de  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$ . L'entropie varie considérablement entre 10% et 40% d'état de charge alors que la courbe de l'enthalpie montre un minimum à 5% associé à l'anode en graphite.

**Figure 7 :** Profils de  $E^0(x)$  (5-a),  $\Delta S(x)$  (5-b) et  $\Delta H(x)$  (5-c) d'une batterie graphite/LFP





#### IV. Applications de l'entropimétrie

La majeure partie des applications de l'entropimétrie a fait l'objet de brevets dont la liste de ceux déposés aux Etats-Unis est donnée en [6].

##### 1. Détermination de la nature chimique des matériaux d'électrode

Le fait que les profils  $E^0(x)$ ,  $\Delta S(x)$  et  $\Delta H(x)$  sont des caractéristiques spécifiques d'un matériau d'anode et de cathode en association avec leurs diagrammes respectifs, il devient possible grâce à l'analyse 'in-situ' et non destructrice par entropimétrie de révéler la composition chimique d'un matériau d'électrode dans une demi-pile et de celles de l'anode et de la cathode dans une cellule complète.

Jusqu'à présent, les méthodes d'investigation in-situ les plus communément utilisées pour étudier une cellule lithium ion commerciale mettent en œuvre des moyens très coûteux de diffraction et de diffusion inélastique de particules de haute

énergie tels les rayons X, les rayons gamma, les neutrons,... capables de traverser la cellule. L'avènement de l'entropimétrie électrochimique constitue un pas important dans les moyens d'étude plus accessibles des matériaux d'électrodes dans une demi-pile ou dans cellule complète.

Durant les dix dernières années, nous avons réalisé une banque de données thermodynamiques sur plusieurs types de matériaux d'anode et de cathode issus aussi bien de nos recherches sur les nouveaux matériaux que de ceux déjà utilisés par l'industrie ainsi que sur plusieurs batteries commerciales. En appliquant les Eq. (11) et (12), il est possible de construire à partir de la banque de données, les profils d'entropie et d'enthalpie de toute cellule complète ayant une anode et une cathode bien définies. Inversement, partant d'une cellule de composition inconnue, il devient possible par comparaison avec la banque de données de remonter à la composition des électrodes. La présentation de ces résultats très conséquents demanderait un traitement à part.

##### 2. Etat de charge: le postulat des batteries

La détermination précise de l'état de charge d'une batterie est l'un des problèmes les plus anciens et les plus récurrents de l'ingénierie des batteries. Les algorithmes utilisés aujourd'hui sont loin d'être satisfaisants comme tout utilisateur d'un appareil électronique portable et d'un véhicule électrique peut aisément constater.

En principe, chaque fabricant de batterie peut assez facilement réaliser le profil d'entropie et d'enthalpie de son produit. Avec ces données, il devient plus facile de déterminer l'état de charge d'une cellule par la mesure simultanée de l'entropie et de l'enthalpie. Il suffit pour cela de disposer un voltmètre et d'un thermomètre de précision suffisante.

Le principe de la détermination de l'état de charge par entropimétrie découle d'un postulat que l'auteur a émis en 2009. Ce postulat peut être énoncé ainsi :

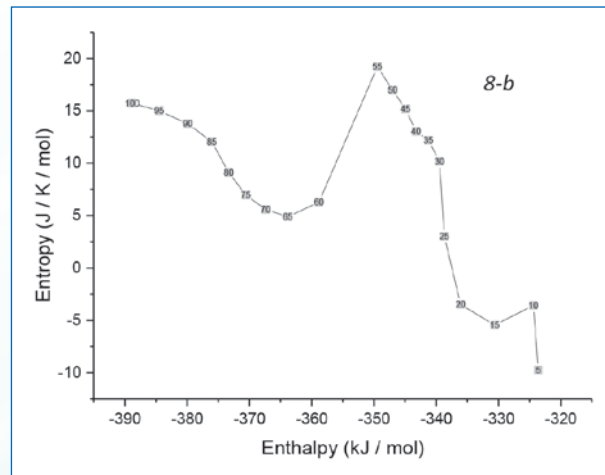
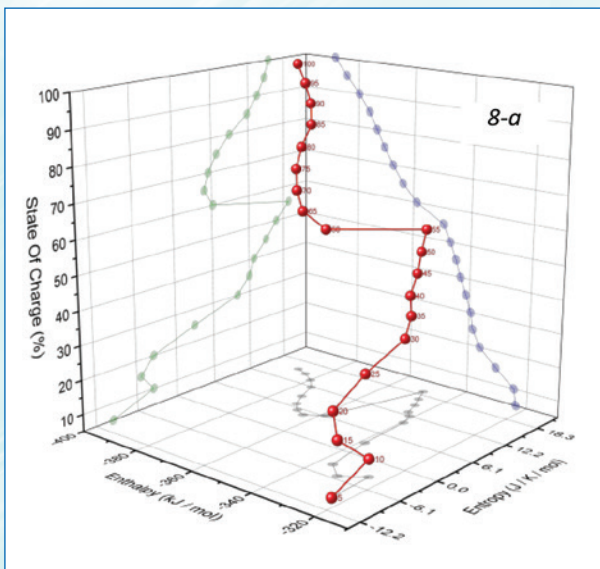
*«Dans une batteries rechargeable et hermétiquement fermée, deux états de charge différents ne peuvent pas avoir simultanément les mêmes valeurs d'entropie et d'enthalpie»*

Ce postulat a pour corollaire l'unicité du trinôme (état de charge, entropie, enthalpie). En d'autres termes, pour un couple (entropie, enthalpie) donné, il n'existe qu'un et un seul état de charge qui lui soit associé.

Dans la pratique, si l'utilisateur dispose au préalable des profils entropie et enthalpie de sa batterie, il lui suffirait de mesurer la force électromotrice à l'équilibre (courant nul) dans un domaine de température de quelques degrés pour en déterminer l'état de charge. Récemment, nous avons développé une puce électronique capable de stocker les données thermodynamiques d'une batterie et d'en mesurer avec haute précision la tension et la température à l'équilibre. Cette puce que nous avons brevetée permet de mesurer l'état de charge avec une précision supérieure à 5% dans le domaine allant de 5% à 95%.

Afin d'illustrer le principe de la mesure de l'état de charge par entropimétrie, la **figure 8** montre sur une représentation en 3D ayant pour axes l'entropie, l'enthalpie et l'état de charge le parcours thermodynamique d'une batterie commerciale lors d'une décharge complète (100% à 0%). Cette courbe (de couleur rouge) est projetée sur les trois (entropie, état de charge), enthalpie, état de charge) et (entropie, enthalpie). Cette dernière est représentée dans la **fig. 8-b**. Elle respecte bien notre postulat selon lequel cette courbe projetée ne peut pas faire une boucle (i. e. deux états de charge ayant les mêmes valeurs d'entropie et d'enthalpie).

**Figure 8 :** diagrammes 3D (entropie, enthalpie, état de charge) (8-a) et 2D (entropie, enthalpie) (8-b) permettant la détermination de l'état de charge d'une batterie commerciale.



### 3. Etat de santé

L'état de santé d'une batterie est lié aux pertes de performances en stockage de l'énergie et en puissance résultant de son vieillissement. Ce dernier se manifeste par la dégradation des matériaux d'anode et de cathode ainsi que par la décohésion des électrodes et par des phénomènes de surface des électrodes dus à la réactivité avec l'électrolyte tendant à augmenter la résistance interne de la cellule.

Il existe plusieurs définitions de l'état de santé d'une batterie. Celle que nous adopterons ici consiste à déterminer la variation relative de l'énergie délivrée par une batterie sous un régime de décharge déterminé avant et après vieillissement. En effet, suite à un vieillissement, une batterie voit sa capacité de décharge ( $q(t)$  en Ah) et sa tension ( $E(t)$  en (V)) diminuer. L'énergie  $W$  fournie lors d'une décharge sous courant constant  $I$  est donnée par l'équation :

$$\begin{aligned} W &= \int_{\text{décharge}} E(t) dq \\ &= \int_{\text{décharge}} E(t) i(t) dt \\ &= I \int_{\text{décharge}} E(t) dt \end{aligned} \quad (14)$$

L'état de santé  $\Psi$  (ou SOH en anglais) est défini ici par l'équation :

$$\Psi = 100 \frac{W(\text{vieille})}{W(\text{fraiche})} \quad (15)$$

L'entropie est sensible au désordre structurel des électrodes qui augmente naturellement avec le nombre de cycles charge/décharge ainsi qu'avec les conditions d'utilisation et de stockage de la batterie. Parmi les facteurs accélérant le



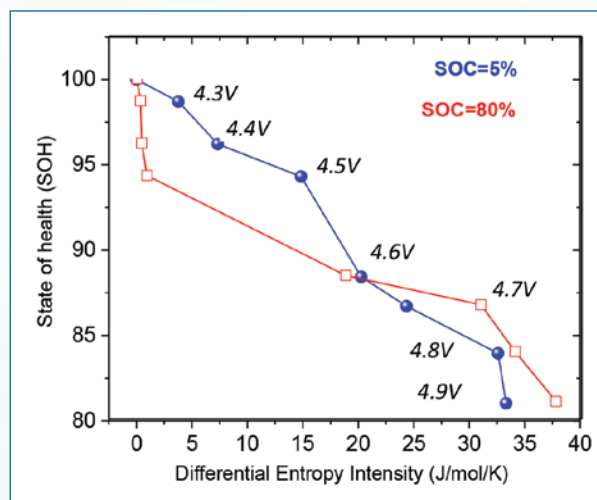
vieillesse d'une batterie, les principaux sont : une température trop élevée ou trop basse, une surcharge, une surdécharge, une charge et/ou une décharge trop rapide et enfin les vibrations et chocs mécaniques.

Dès lors, l'entropimétrie peut contribuer à déterminer non seulement l'état de santé d'une batterie mais aussi apporter des indications sur les conditions de son vieillissement. En effet, nous avons mis à l'évidence l'aspect 'mémoire' thermodynamique du vieillissement d'une batterie. Nos tests effectués sur plusieurs types de batteries lithium ion ont montré que pour chacune d'elles, il existe des points particuliers de l'état de charge ou de l'OCV pour lesquels la variation de l'entropie et/ou de l'enthalpie due au vieillissement est plus importante qu'ailleurs. Ces points à sensibilité accrue correspondent en réalité à ceux où une transition de phase se déclenche à l'anode ou à la cathode et qui se produisent à des valeurs bien précises de leurs états de charge respectifs. L'analyse de l'évolution de l'entropie et de l'enthalpie à ces points particuliers permet d'établir une corrélation avec l'état de santé de la batterie. Pour cela, nous utilisons une nouvelle grandeur thermodynamique appelée entropie ou enthalpie différentielle ( $dS$  et  $dH$ ) qui mesure la variation relative de l'entropie et de l'enthalpie de la batterie à un point particulier avant et après vieillissement.

Ceci est illustré dans la **Figure 9** qui montre pour une batterie graphite/LCO vieillie par surcharge les courbes «SOH- $dS$ » obtenues à 5% et à 80% de l'état de charge. La surcharge consiste à appliquer une tension de fin de charge comprise entre 4.2V et 4.9V par incréments de 100mV, sachant que 4.2V est la tension normalement utilisée pour charger cette batterie. A la fin de chaque test, l'augmentation de l'entropie à 5% et à 80% de l'état de charge ainsi que l'état de santé ont été mesurés. Les états de charge particuliers de 5% et de 80% correspondent à ceux pour lesquels l'entropie varie le plus avec la surcharge. Ils sont associés respectivement à des transitions de phase dans l'anode et dans la cathode comme nous l'avons déjà exposé.

Comme le montre la **Fig. 9**, l'état de santé baisse avec la tension appliquée d'une manière différente à 5% et à 80% suggérant que l'anode et la cathode vieillissent différemment au cours du test de surcharge.

**Figure 9 :** Evolution de l'état de santé avec l'entropie différentielle mesurée à 5% et 80% d'état de charge d'une batterie graphite/LCO soumise à une surcharge entre 4.2V et 4.9V.



#### 4. Autres applications de l'entropimétrie

##### i. Etat de sécurité

La sécurité des batteries au lithium devient un thème central tant le nombre d'incidents thermiques est en constante augmentation avec dans certains cas des conséquences sérieuses. Aujourd'hui, il n'existe pas de tests non destructifs permettant de mesurer l'état de sécurité d'une batterie au lithium. Cela pose problème aux fabricants de batteries et à leurs utilisateurs en particulier dans des domaines d'application utilisant un grand nombre de cellules montées en série et en parallèle comme celle des véhicules électriques et le stockage stationnaire de l'énergie.

Nous avons établi une première corrélation entre l'augmentation de l'entropie à 5% et à 80% d'états de charge d'une batterie graphite/LCO vieillie et sa vitesse maximale d'auto-chauffe obtenue par Accelerating Rate Calorimetry (ARC). Il est connu par ailleurs que plus la vitesse d'auto-chauffe est élevée, plus le risque d'emballement thermique de la batterie augmente et par conséquent, plus son état de sécurité est bas. Notre étude préliminaire devrait être poursuivie car elle permettrait à partir d'une mesure non destructive par entropimétrie d'obtenir une information généralement acquise par un test ARC destructif. La mesure en temps réel de l'entropie d'une batterie devrait permettre de renseigner l'utilisateur de son état de sécurité.

## ii. Etats de charge partiels

Une autre question qui reste encore à nos jours sans réponse est celle de connaître les états de charge partiels de l'anode et de la cathode pour un état de charge déterminé d'une batterie à différents états de santé de celle-ci. Idéalement, les états de charge d'une batterie et de ses électrodes devraient être égaux. Dans la pratique, cette égalité n'est pas vérifiée et la différence évolue avec le vieillissement.

Grace à une étude comparative des grandeurs thermodynamiques d'une cellule complète et de demi-piles à base de l'anode et de la cathode d'une batterie graphite/NMC et au développement d'un logiciel de calculs, nous avons pu déterminer avec précision la stœchiométrie de l'anode et de la cathode pour chaque état de charge de la batterie. Nous avons aussi établi les limites de stœchiométrie de l'anode et de la cathode entre 0 et 100% de l'état de charge de la batterie.

## V. Conclusion

Même si les premières mesures de l'entropie dans une cellule électrochimique remontent au début des années 80, l'application de l'entropimétrie à la caractérisation des matériaux d'électrode et des batteries est une science relativement récente. La liste des applications de l'entropimétrie augmente régulièrement et s'adresse à des questions fondamentales encore mal élucidées telle la détermination précise de l'état de charge, de l'état de sécurité et de l'état de santé des batteries modernes. Ces connaissances permettront d'améliorer les performances des batteries comme par exemple l'extension de leur durée de vie en développant de nouveaux algorithmes de mode de charge des batteries adaptés à leur état de santé. La sécurité des batteries est aussi un sujet crucial dans l'avenir des voitures électriques, de l'aéronautique et du stockage de l'énergie ; ce stockage ayant un impact important sur l'environnement.

## Références

- [1] Thèse Yvan Reynier, Institut Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [2] K. Misushima, P.C. Jones, P.J. Wiseman and J.B. Goodenough, Mater. Res. Bull. 15 (1980) 783
- [3] T. Ohzuku, M. Kitagawa, T. Hirai, J. Electrochem. Soc. 137 (1990) 769.
- [4] B. J. Hwang, Y. W. Tsai, D. Carlier, G. Ceder, Che., Mat. 15(2003)3676.
- [5] A. K. Padhi, K. S. Nanjundaswamy, and J. B. Goodenough, J. Electrochem. Soc., 144 (1997) 1188-1194.
- [6] R. Yazami et al. US patents # 7,595,611 B2, # 2013/0322488 A1, # 9,065,292 B2, # 2012/0043929 A1, # 8,446,127 B2, # 8,901,892 B2, # 2010/0090650 A1, # 2013/0271089 A1, # 2014/0354233 A1, # 14/766,395, # 62/216,511 and # 14/937,718.

## Does Exchange Rate Misalignment Facilitate Export Diversification in Developing Countries?\*

Khalid Sekkat

Hassan II Academy of Science and Technology  
Strategic studies and economic development Section

### Abstract

*The impact of exchange rate misalignment on export diversification in developing countries is highly debated and the empirical evidence is conflicting. At the core of the problem with the previous studies is their focus on correlation instead of causality. The present paper uses causality analysis to investigate the link between misalignment and export diversification. While we found some support to the effect of undervaluation on the share of manufactures in total exports, no support is found for an impact of misalignment (neither over nor under valuation) on exports diversification within manufactures. The conclusion resists numerous robustness checks. The results imply that strategic policies like exchange rate misalignment are ineffective for achieving exports diversification. More structural policies might be needed.*

*Keywords: Exchange rate, Misalignment, Undervaluation, Exports diversification*

*JEL classification: O14, O24, O53*

### 1. Introduction



Diversification of production is an integral part of the development process (see e.g. Chenery and Taylor, 1968 and Imbs and Wacziarg, 2003)<sup>1</sup>. Interestingly, exports seem to play an important role in the dynamic of diversification and growth. Hausmann et al. (2007) suggest that a country could increase its growth by diversifying exports, in particular by exporting more to richer countries. Moreover, Hidalgo and Hausmann (2009) directly observe that the complexity of a country's exports is predictive of its future growth. Singer (1950) and Prebisch (1959) suggested that

the comparative advantage of countries at an early stage of development could lock them into a vicious circle. By specializing in exporting food and raw materials, they would reinforce the initial international division of labor and remain confined to low-growth sectors. Note that diversification is an issue not only for natural resource rich countries. It also concerns many countries that are poor in natural resources and have low or very low shares of sophisticated manufactures in total exports. Even countries with "fair" shares of manufactures in total exports still have a diversification problem since many of them are highly specialized in a few "traditional" manufacturing industries such as textiles, apparel and food. This also makes them vulnerable to external shocks.

Exchange rate is at the heart of the concerns about diversification in developing countries. While mainstream economics recommend keeping

(\*) This is an excerpt of the paper "Exchange Rate Misalignment and Export Diversification in Developing Countries" by Khalid Sekkat forthcoming in *The Quarterly Review of Economics and Finance*. The usual disclaimers apply.

1- While specialization has the advantage of exploiting scale economies and benefiting from learning by doing, it leads to the risk of a heavy dependence on shocks to the demand for a specific good. This is detrimental to factor accumulation and growth (see e.g. Fischer, 1993).

the actual exchange rate as close as possible to its equilibrium level, a number of economists (e.g. Rodrik, 2008; Freund and Pierola, 2012 and Rajan and Subramanian, 2011) suggest that a disequilibrium situation, generally referred to as misalignment (i.e. letting the actual exchange rate move away from its equilibrium level), might be a second best approach in countries facing other distortions which is the case of many developing countries. After their independence, many developing countries pursued an overvalued exchange rate strategy with the aim of fostering the diversification of their production. The export-oriented agricultural sector would be indirectly taxed while the industry would benefit from cheap imports of machinery and other inputs. Recently, a new view suggested that an undervalued currency can foster exports diversification when the country has a weak institutional framework (Rodrik, 2008). However, the empirical evidence has, so far, failed to establish a clear causal effect of exchange rate misalignment on export diversification. Agosin et al. (2012) and Levy-Yeyati et al. (2013) didn't support the existence of such an effect while Freund and Pierola (2012) and Rajan and Subramanian (2011) did. Following Henry (2008) one main problem with these studies is that they focus on correlation instead of causality.

The present paper seeks to address this criticism by investigating whether misalignment cause export diversification. The degree of exchange rate misalignment is assessed using the model-based approach of Edwards (1994). Exports diversification is assessed through four indicators: the Gini index, the Theil index, the Herfindahl index (each is based on 1345 manufactured products per country) and the ratio of total manufactured exports to total exports. The sample covers 55 low and middle income countries from different regions over the period 1985-2009 (see appendix A).

The rest of the paper is organized as follows. Sections 2 and 3 focus respectively on the estimation of misalignment and the measures of export diversification. Section 4 deals with the econometric analysis which addresses the objective of the paper. Section 5 provides the conclusion.

## 2. Exchange rate misalignment across time and regions

The first step of our analysis is to measure the degree of exchange rate misalignment across time and countries. To this end, we will compare

a country's observed exchange rate with the value it ought to have under the hypothesis that macroeconomic equilibrium is to be maintained. The observed exchange rate considered here is the real effective exchange rate (REER), which is the most commonly used metric in this respect. As for the exchange rate compatible with macroeconomic equilibrium, we use the model-based approach of Edwards (1994).

We compute the REER as:

$$\text{Log}(\text{REER}) = \sum_{j=1}^{j=10} [w_j \cdot \text{Log}(e_j \cdot (\text{CPI}_j / \text{CPI}_i))] \quad (1)$$

where:

CPI is the Consumer Price Index of the country;

CPI<sub>j</sub> is the Consumer Price Index of the country's partner j;

e<sub>j</sub> is the nominal bilateral exchange rate of the country as regards partner j;

w<sub>j</sub> is the weight of the j-th partner in the country's total trade with its 10 largest trading partners.

The weighting refers to the 10 largest trading partners over the period 1999-2003 excluding oil exporters (i.e. countries where petroleum-related products make up at least 50% of exports). An increase in the REER means an appreciation.

Over the last thirty years, the economic literature on exchange rates has developed in a way that makes it possible to determine the influence of a limited range of variables affecting a currency's long-run real value (e.g. Williamson, 1994; Edwards, 1998). These variables, called "fundamentals", include external factors (e.g. the international terms of trade) as well as internal factors (e.g. government expenditure). The impact of these determinants can be estimated through an econometric regression and are used to calculate the equilibrium real effective exchange rate (EREER). To estimate the impact of these factors, we use the following empirical model (Edwards, 1994):

$$\begin{aligned} \text{Log}(\text{REER}) = & \alpha_0 + \alpha_1 \text{Log}(\text{Open}) \\ & + \alpha_2 \text{Log}(\text{Cap}) + \alpha_3 \text{Log}(\text{ToT}) \\ & + \alpha_4 \text{Log}(\text{rDebt}) + \alpha_5 \text{Log}(\text{Gov}) \\ & + \alpha_6 \text{Log}(\text{BalSam}) + \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

For clarity, we do not mention the year or and the country indices. The REER is defined in Equation 1, *ToT* is the terms of trade (the ratio of export to import prices); *Open* is the ratio of exports plus imports to GDP; *Cap* is the net capital inflow scaled by GDP; *Gov* is government consumption as a percentage of GDP; *rDebt* is the country's debt service (including interest payments and reimbursements as a share of GDP), and *Balsam* is the ratio between the country's real per capita GDP and the geometric mean (weighted similarly to the exchange rate) of the same variable in the 10 major trading partners.

As explained above, the EREER concerns the long-term relationship between the REER and fundamentals. To determine such a relationship, therefore, it is necessary to use co-integration methodology, which makes it possible to separate the long term from the short term relationships between the REER and the fundamentals. The empirical approach used to compute misalignment is the same as in Noura and Sekkat (2012). The resulting long-term relationship between the REER and the explanatory variables is given in Table 1. The overall quality of fit is good, and all the coefficients, except the one of capital inflow which is insignificant, are significant with the expected sign.

**Table 1:** Panel-cointegration estimation results of the REER (1985-2009)

Variables	Estimates
Capital Inflow / GDP	0.00 (0.25)
Openness	-0.36 (8.69)***
Balassa Samuelson	0.33 (5.38)***
Debt Service	-0.07 (8.60)***
Government Consumption / GDP	0.04 (5.01)***
Terms of Trade	0.11 (5.92)***
Adjusted R <sup>2</sup>	0.54

Note: Absolute t-statistics are in parentheses.  
\*\*\* = significant at 1%

Using the coefficients in Table 1, we can compute the extent of the REER misalignment. Recall that misalignment refers to the difference between the observed REER and the estimated EREER  $\widehat{EREER}$ . The latter is given by the fitted values using the estimates in Table 1 together with the long-run values of the explanatory variables. We define misalignment as:

$$Mis = (REER / (\widehat{EREER}) - 1) \quad (3)$$

The positive values correspond to overvaluation and the negative values to undervaluation. Table 2 describes the misalignment series we obtained. On average, exchange rates have been overvalued by around 3 percentage points but with high variations across countries and time. The standard deviation was around 35 percentage points. The episodes of undervaluation account for a majority of observations between 1985 and 2009, but overvaluation episodes nonetheless represent an important share (33%), thus allowing us to examine the different impacts of over and under valuation on diversification.

**Table 2:** Descriptive Statistics of Misalignment 1985-2009

Mean %	3.30
Standard Deviation	35.58
Minimum %	-64.20
Maximum %	484.69
Negative Values	794
Positive Values	532

### 3. Export diversification across time and countries

We measure the diversity of exports using the SITC database, Revision 2, at the 5-digit level of decomposition. We thereby distinguish 1345 goods. That level of disaggregation is a compromise between having the finest disaggregation possible while keeping the maximum number of developing countries and the longest time period in the sample. The idea is that diversification might be slow to emerge. Then, we need to consider a time period long enough for the potential effects to appear. We thereby end up with 55 low and middle income countries from different regions, over 25 years (i.e. 1985-2009; see appendix A).

There is no single measure of diversity, so we use four standard indicators in turn. Here we use four indicators of diversification. These are the Herfindahl, Theil and Gini indices and the share of manufactured exports in total exports. The latter is a limited indicator of diversification since it concerns just the relative importance of manufactures and non-manufactures in total exports. In contrast to the three first indices, it doesn't say anything about the relative importance of the various manufactured goods within total manufactured exports. In spite of this, we consider the share of manufactured exports in total exports for comparison purpose because it is similar to an indicator (i.e. the share of manufactured exports in GDP) which has been widely discussed in the literature dealing with the impact of exchange rate misalignment.

The first three indicators (Herfindahl, Theil and Gini indices) are generally used to measure concentration. We adapt the definition to make our results reflect diversification. The first of those indexes is the Herfindahl, defined as:

$$H = 1 - \frac{\sum_k (s_k)^2 - 1/n}{1 - 1/n} \quad (4)$$

where  $s_k$  is the share of good  $k$  in total exports, and  $n$  the number of goods. When export inflows are spread more evenly across goods, the share of each good decreases, and so does its square. For equal shares ("complete" diversification), the index equals 1. At the opposite end of the spectrum, if exports are entirely concentrated on a single good, its share will be equal to one, and the Herfindahl index will equal 0. The index therefore ranges from zero to one, with lower values signaling low diversified exports. The second index is the Theil defined as:

$$T = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{\bar{x}} \ln\left(\frac{x_k}{\bar{x}}\right), \quad (5)$$

where  $\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k}{n}$

where  $x_k$  is the volume of exports of good  $k$ .

If the volume of exports is evenly spread across goods, the ratio of the exports of each good to average exports will tend to one, its logarithm

will be zero, and the index will equal 1. If a good dominates, the ratio will decrease. The third index is the Gini, constructed as follows. We denote  $s_k$  the share of good  $k$ , and rank goods by order of decreasing share. The Gini index is then:

$$G = 1 - \sum_{k=2}^n \left[ \frac{1}{n} (S_k - S_{k-1}) \right] \quad (6)$$

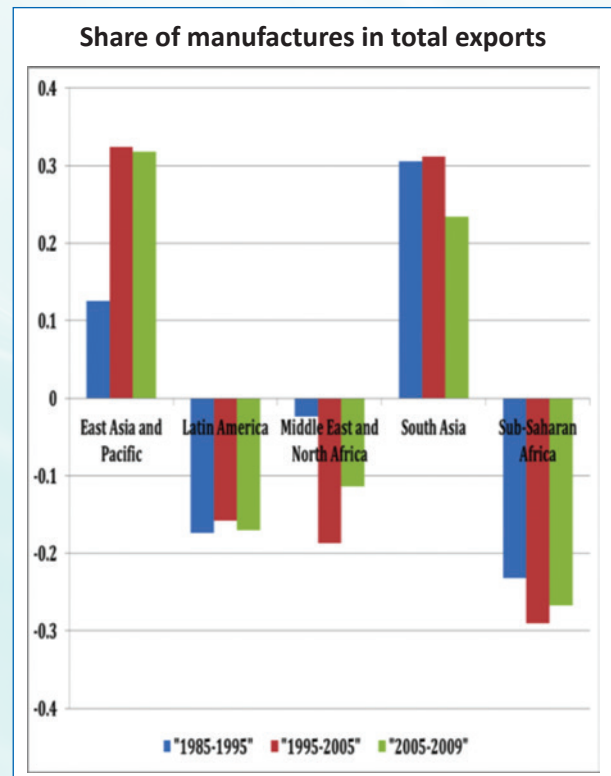
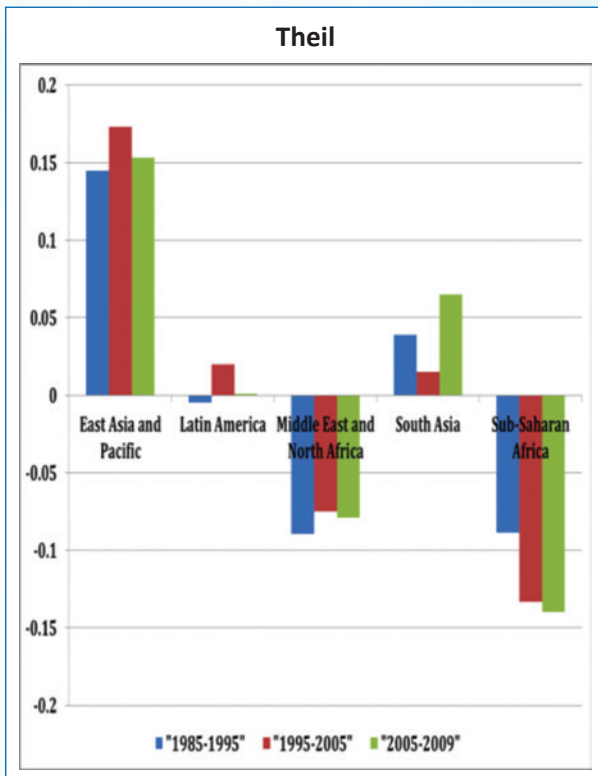
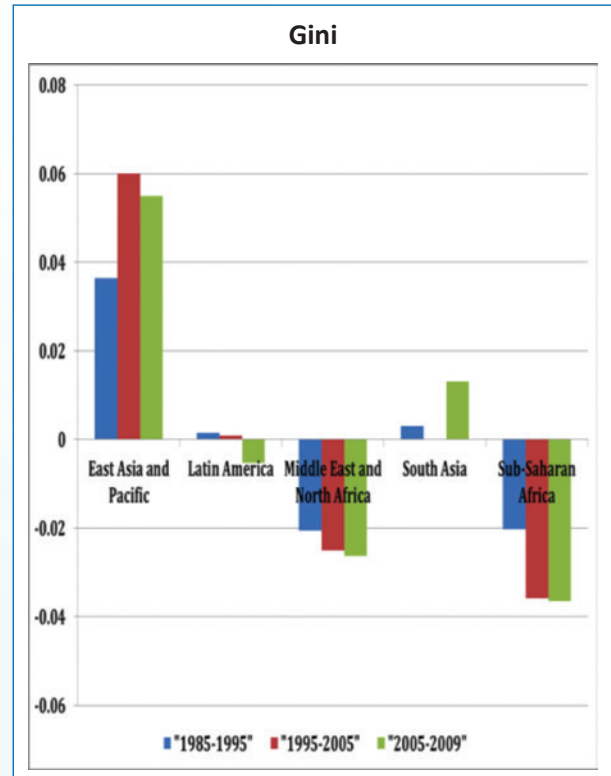
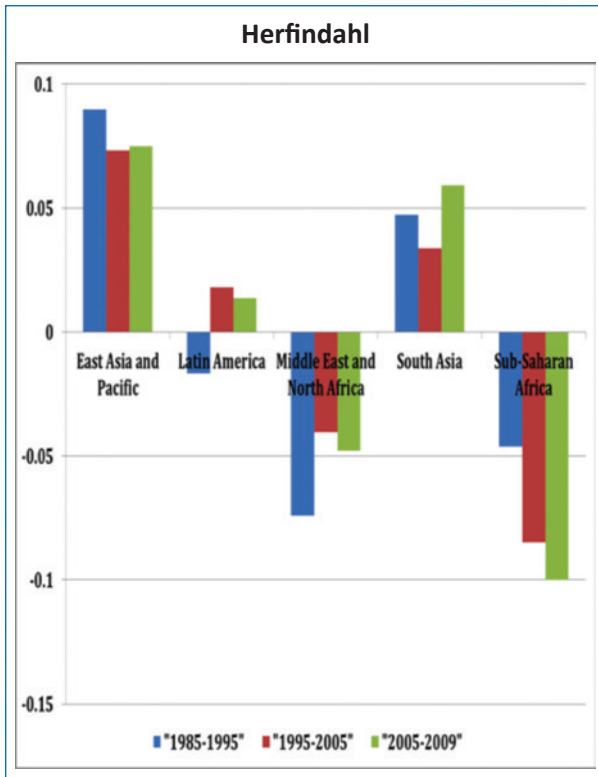
where  $S_k$  is the sum of shares from good 1 to  $k$ .

The main difference between the Herfindahl and the Theil indexes is that the former is a concave function on the shares of total export flows while the latter is a convex function of the shares. The Herfindahl index emphasizes the importance of larger shares by assigning them a greater weight than smaller ones. It gives almost no weight to goods with very small shares in total exports. The Theil index assigns higher weights to those goods with small shares in total exports. This implies that the Herfindahl index is influenced more by changes in the share of the most exported goods, whereas the Theil index is influenced more by changes in the share of the least exported goods.

The main shortcoming of the Herfindahl and Theil indexes for the research presented here is that they are sensitive to the number of observations. Although this may be a desirable property, it can be misleading here because the number of goods also varies with the availability of data. The Gini index is not subject to that shortcoming. Regardless of the number of goods in the sample, a change in their number does not affect the value of the indicator. The weight granted to each good in the Gini coefficient depends on its rank, not its absolute value. Consequently, the Gini coefficient is sensitive to variations in rank more than in export share. If the share of an exported good increases but does not affect ranking of the goods, it will not be fully translated in the index.

Instead of presenting the absolute values of the indexes, we give their standardized values. These are the value of a given index in a given region and a given period minus the world average of the index for the corresponding period. This allows better highlighting the difference in diversification across regions of the world. Figure 1 shows that irrespective of the index and the period under consideration, the exports of East Asian and Pacific countries are the most diversified. Again irrespective of the index and the period, the least diversified countries are those in the Middle East and North Africa and Sub-Saharan Africa.

**Figure 1:** Normalized diversification indexes by region of the world



### 4. Causality analysis

We use the concept of Granger causality which has been extended to a panel data framework by Dumitrescu and Hurlin (2012). The methodology comprises two major steps. First, test whether the variables are stationary. Second, test causality.

Among the existing tests for stationarity, the one devised by Pesaran (2007) is the most suitable because it is targeted on a situation where the number of individuals (N) is higher than the number of years (T). In addition, the test makes it possible to analyze non-stationarity within a heterogeneous panel framework, i.e. a panel in which each country is allowed to evolve according to its own dynamics. The test builds on the well-known augmented Dickey-Fuller regressions. Practically, consider  $y_{it}$  pertaining to the individual  $i$  at time  $t$ . For each individual  $i$ , run the regression:

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \rho_i y_{it-1} + \gamma_i \bar{y}_{t-1} + \delta_i \Delta \bar{y}_t + \vartheta_{it} \quad (7)$$

where  $\bar{y}_t$  is the average of  $y_{it}$  over all individuals at time  $t$ . Then, take the calculated Student statistics of  $\rho_i$ ;  $t_i$ . The statistics:

$$CIPS(N,T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (8)$$

is used to test for stationarity, but it does not have a normal distribution. We follow Pesaran (2007) and simulate the critical values using the Monte Carlo approach. If the computed statistic (CIPS) is above the critical value, one cannot reject the null hypothesis of stationarity.

**Table 3:** Test of the stationarity of the variables

Variable	Stationarity in	
	Level	First difference
Misalignment	-2.32	-4.54**
manufactured exports/ GDP	-2.27	-4.79**
Gini	-2.40	-4.29**
Herfindhal	-2.47	-4.57**
Theil	-2.43	-4.29**
Critical value at 5%	-3.43	-3.43

Note: \*\* = significant at 5%

Table 3 presents the results. The tests show that all variables are stationary in first difference. Hence, the causality tests will concern the impact of the change in misalignment on the change in the diversification indices. Consider series  $x_{it}$  and  $y_{it}$  which were found to be stationary in first difference i.e.  $\Delta x_{it}$  and  $\Delta y_{it}$  are stationary. To test the null hypothesis that  $\Delta x_{it}$  does not cause  $\Delta y_{it}$ , run the following regression for each individual  $i$ :

$$\Delta y_{it} = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} \Delta y_{it-1} + \alpha_{2i} \Delta x_{it-1} + \mu_{it} \quad (9)$$

Compute a Wald statistic ( $W_i$ ) pertaining to the significance of  $\alpha_{2i}$ . Then, calculate the average of  $W_i$  over  $i$ :

$$W_{N,T}^{Hmc} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \quad (10)$$

When  $N$  and  $T$  tend to infinity, Dumitrescu and Hurlin (2012) show that this simple mean converges to a normal distribution. For finite  $N$  and  $T$ , the author provides critical values.

**Table 4:** Results of the causality tests  
From  $\Delta$ Misalignment to  $\Delta$  (diversification indicator)  
Null hypothesis: No causality

	Whole sample	Low quality of institutions	High quality of institutions	Low financial development	High financial development
Manufactured exports/ Total exports	1.83**	1.42	2.30**	1.17	2.45**
Theil	1.45	1.29	1.64	1.12	1.54
Gini	1.47	1.51	1.44	1.17	1.55
Herfindhal	1.41	1.02	1.86*	1.14	1.71
Critical value					
5%	1.78	1.99	1.99	1.99	1.99
10%	1.60	1.74	1.74	1.74	1.74

Note: \*\* = significant at 5%, \* = significant at 10%



The first column of Table 4 reports the results of the causality tests performed on the whole sample. Except for the ratio of manufactured exports to total exports, the null hypothesis that exchange rate misalignment does not cause export diversification is never rejected at the 5% level. Misalignment seems to cause the change in the division of exports between manufactures and non-manufactures but does not change the shares of the various goods (inside the manufactures division) in total exports.

The implication of the above findings is that misalignment is not a cause of export diversification in all countries. However, the literature suggests that this might be the case in some types of countries. For instance, some evidence shows not only that the quality of institutions impacts on country growth, exports and FDI, but also that the effect on exports varies across category of goods (e.g. Méon and Sekkat, 2008 and Ranjan and Lee, 2007). Low-quality institutions affect the volume of trade in general, but the impact is larger for differentiated goods. Hence, it might be the case that the impact of misalignment on export diversification depends on the level of institutional quality. To check for such a possibility, we divided our data set in two sub-samples based on the observed median of the quality of institutions. One sub-sample includes countries with low-quality institutions while the other includes countries with high-quality institutions. Causality tests similar to those above were applied to each sub-sample (Columns 2 and 3 in Table 4). We use the political risk indicator drawn from the International Country Risk Guide (ICRG). Its aim is to provide a means of assessing countries' political and institutional frameworks. The indicator is a simple average over 12 components<sup>2</sup>, with a numerical value assigned to each one. The scale awards the highest value to the lowest risk and vice versa. Surprisingly, misalignment has no causal effect on export diversification in the low-quality sub-sample but it does affect the high-quality sub-sample in two cases out of four (the ratio of manufactured exports over total exports at the 5% level and the Herfindhal index at the 10% level).

Another possibility to consider is that the causal effect of misalignment on export diversification depends on the level of financial development. This is motivated by the findings of Aghion et al.

(2009) and El Badawi et al. (2012), although their focus was not on export diversification. Aghion et al. showed that real exchange rate flexibility can have a significant impact on productivity growth but that the actual extent depends on a country's level of financial development. El Badawi et al. (2012) found that financial development reduces the negative consequences of overvaluation on growth. We therefore proceed in the same way as for the quality of institutions: based on the observed median, we divide the data set into two sub-samples of countries, one highly financially developed, the other not, and we apply causality tests to each (Columns 4 and 5 in Table 4). The ratio of credit to GDP is used as indicator of financial development. The results show that misalignment has no causal effect on export diversification in the low financial development sub-sample. It does have an effect in the high-quality sub-sample, but only when the ratio of manufactured exports to total exports is considered.

## 5. Conclusion

In search of economic growth, many developing countries seek to diversify their exports. A strand of the literature suggests that real exchange rate misalignment might help diversifying exports. However, the empirical evidence is mixed about the impact of exchange rate misalignment on export diversification. At the core of the problem with previous studies is that focus on correlation instead of causality. The present paper used causality analysis to investigate the link between misalignment and export diversification.

While we found some support to the effect of undervaluation on the share of manufactures in total exports, no support is found for an impact of misalignment on exports diversification within manufactures. The conclusion resists robustness checks. It follows that strategic policies like exchange rate misalignment are ineffective for achieving exports diversification. More structural policies might be needed.

## References

Aghion, P., Bacchetta, P., Ranciere, R., & Rogoff, K. (2009). Exchange rate volatility and productivity growth: the role of financial development. *Journal of Monetary Economics*, 56(4), 494-513.

2- There are 12 components: government stability, socioeconomic conditions, investment profile, internal and external conflicts, corruption, military in politics, religion in politics, law and order, ethnic tensions, democratic accountability, and bureaucratic quality.

Agosin, M. R., Alvarez, R., & Bravo-Ortega, C. (2012). Determinants of export diversification around the world: 1962–2000. *The World Economy*, 35(3), 295-315.

Chenery, H. B., & Taylor, L. (1968). *Development patterns*. Bobbs-Merrill Company, College Division.

Dumitrescu, E.-I. & Hurlin, Ch. (2012). «Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels,» *Economic Modelling*, 29(4), pages 1450-1460

Edwards, S. (1994). *Real and Monetary Determinants of Real Exchange Rate Behavior: Theory and Evidence from Developing Countries*. J. Williamson (editor), *Estimating Equilibrium Exchange Rates*, Washington, D.C.: Institute for International Economics.

Edwards, S. (1998). *The Mexican Peso Crisis: How Much Did We Know? When Did We Know It?*, NBER WP 6334.

Fischer, S. (1993). The role of macroeconomic factors in growth. *Journal of monetary economics*, 32(3), 485-512.

Freund, C., & Pierola, M. D. (2012). Export surges. *Journal of Development Economics*, 97(2), 387-395.

Hausmann, R., Hwang, J., & Rodrik, D. (2007). What you export matters. *Journal of economic growth*, 12(1), 1-25.

Henry, P. B. (2008). Comments on the Real Exchange Rate and Economic Growth. *Brookings Papers on Economic Activity*, 413-420.

Hidalgo, C. A., & Hausmann, R. (2009). The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(26), 10570-10575.

Imbs, J., & Wacziarg, R. (2003). Stages of diversification. *American Economic Review*, 63-86.

Levy-Yeyati, E., Sturzenegger, F., & Gluzmann, P. A. (2013). Fear of appreciation. *Journal of Development Economics*, 101, 233-247.

Méon, P. G., & Sekkat, K. (2008). Institutional quality and trade: which institutions? Which trade?. *Economic Inquiry*, 46(2), 227-240.

Nouira, R., & Sekkat, K. (2012). Desperately seeking the positive impact of undervaluation on growth. *Journal of Macroeconomics*, 34(2), 537-552.

Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312.

Prebisch, R. (1959). Commercial policy in the underdeveloped countries. *The American Economic Review*, 251-273.

Rajan, R. G., & Subramanian, A. (2011). Aid, Dutch disease, and manufacturing growth. *Journal of Development Economics*, 94(1), 106-118.

Ranjan P. & J. Y. Lee (2007). *Contract Enforcement And International Trade*, Economics and Politics, 19(2), 191-218.

Rodrik, D. (2008). The real exchange rate and economic growth. *Brookings papers on economic activity*, 2008(2), 365-412.

Singer, H. W. (1950). The distribution of gains between investing and borrowing countries. *The American Economic Review*, 473-485.

Williamson, J. (1994), *Estimating Equilibrium Exchange Rates*, Washington, D.C.: Institute for International Economics.

**Appendix A: Countries in the sample**

Africa	Latin America	Asia
Algeria	Argentina	Bangladesh
Benin	Bolivia	China
Burkina-Faso	Brazil	India
Cameroon	Chile	Indonesia
Chad	Columbia	Iran
Comoros	Costa-Rica	Jordan
Congo, Rep	Ecuador	Malaysia
Cote d'Ivoire	Guatemala	Pakistan
Egypt	Haiti	Philippines
Gabon	Honduras	Sri Lanka
Gambia	Mexico	Syria
Ghana	Nicaragua	Thailand
Guinea-Bissau	Panama	
Kenya	Paraguay	
Lesotho	Uruguay	
Madagascar	Venezuela	
Malawi		
Mali		
Mauritania		
Mauritius		
Morocco		
Niger		
Rwanda		
Senegal		
Sierra-Leone		
Swaziland		
Tunisia		



## **Focus**

**Journée en hommage au mathématicien  
Alexandre GROTHENDIECK**

## Présentation

Le textes qui suivent sont issus d'exposés qui ont été faits le 9 novembre 2015 à Rabat lors d'une journée d'hommage à Alexander Grothendieck, organisée par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Nous espérons que ces textes seront accessibles à un lecteur non-mathématicien, quitte à ce qu'il élude certains termes techniques, qu'il peut prendre comme s'il s'agissait de noms d'espèces animales exotiques. Plusieurs notes de bas de pages apportent, soit des compléments ou des éclaircissements, soit quelques indications mathématiques complémentaires.

Il va sans dire que c'est un grand honneur pour moi que l'Académie Hassan II m'ait confié l'organisation scientifique de cette journée. C'est à l'occasion de l'École de printemps EDP non-linéaire (qui a eu à Essaouira du 27 au 30 avril 2015), que j'ai fait la connaissance des professeurs Youssef Ouknine et Abdelghani Bellouquid, respectivement directeur et directeur adjoint du collège de la modélisation et de l'information. Et c'est de manière fortuite que nous avons commencé à discuter de Grothendieck. MM Ouknine et Bellouquid m'ont fait part de leur souhait d'organiser une journée d'hommage à Grothendieck. C'est alors que je leur ai parlé des deux soirées-débat autour de Grothendieck que j'avais organisées à Nancy en février 2014 et février 2015, dans le cadre du cycle de conférences "Sciences et société" (<http://iecl.univ-lorraine.fr/Cycle-Conferences-Sciences-et-Societe/>) que je dirige. Ils ont alors souhaité me confier l'organisation de cette journée, ce que j'ai accepté avec enthousiasme, en étant conscient du grand honneur qu'ils me faisaient.

Il se trouve que beaucoup d'articles de qualité et d'intérêts divers ont été écrits sur Grothendieck, surtout après son décès le 13 novembre 2014. Mais lorsqu'on a l'avantage et le privilège comme moi de connaître personnellement des témoins directs de la vie de Grothendieck, de sa carrière, du climat de sa pensée, de l'intensité de sa réflexion, il m'a paru évident qu'il fallait leur donner la parole. Ainsi, pour moi, le choix des conférenciers et du programme s'imposait de lui-même. Plus précisément, j'ai proposé à chacun de parler de la période où il a fréquenté Grothendieck :

- 1956-1973 : Michel Demazure. Professeur émérite de l'École Polytechnique, il est le premier élève de Grothendieck et a dirigé avec lui le fameux séminaire Grothendieck entre 1962 et 1964.

- 1973-1991 : Jean Malgoire. Enseignant-chercheur à l'université de Montpellier 2, il a suivi les cours, puis a préparé sa thèse sous la direction de Grothendieck et il était l'un de ses rares amis. Et lorsque Grothendieck s'est retiré du monde en 1991, c'est à Jean Malgoire qu'il a confié cinq précieux cartons contenant plus de 20.000 pages manuscrites que l'université de Montpellier 2 est en train de numériser sous sa direction.
- Alexandre Grothendieck, l'écrivain, le visionnaire par Leila Schneps (directrice de recherche CNRS à l'université Paris 6).
- Quelques remarques sur l'itinéraire mathématique de Grothendieck par Pierre Lochak (chargé de recherche CNRS à l'université Paris 6).

Leila Schneps et Pierre Lochak ont réalisé un miracle: ils ont pu entrer en contact avec Grothendieck pendant cette longue période encore mal connue, où il refusait tout contact avec le monde extérieur. Ils ont su l'approcher, gagner sa confiance et faire ce que personne n'espérait : aller le trouver chez lui, lui parler, et maintenir une correspondance avec lui.

Restait à évoquer la première période de la vie d'Alexander Grothendieck (1928-1956), de son enfance chaotique à ses premiers "coups de maître" mathématiques à Nancy. La plupart de ceux qui l'ont alors côtoyé ou connu nous ont quittés, ou ne peuvent plus guère envisager le voyage à Rabat. J'ai donc retracé moi-même cette période que je n'ai évidemment pas vécue. Pour cela, j'ai rassemblé des textes autobiographiques de Grothendieck (Récoltes et Semailles), des témoignages de mathématiciens de l'époque (dont L. Schwartz, un de ses directeurs de thèse), des lettres, des journaux...

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à M. le secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sans qui cette journée n'aurait pu avoir lieu. Je voudrais aussi adresser mes vifs et chaleureux remerciements à M. le Chancelier de l'Académie, M. le directeur et M. le directeur adjoint du collège de la modélisation et de l'information. Comme je tiens à remercier vivement l'ensemble des services de l'Académie.

L'organisation de cette journée doit beaucoup au professeur Abdelghani Bellouquid, directeur adjoint du Collège de la modélisation et de l'information, trop tôt disparu le 31 août 2015. Je tiens à rendre hommage à sa disponibilité et son sourire, et je lui dédie cet opus. Que Dieu ait son âme.

**EI Haj LAAMRI**

## Hommage au Pr. Alexander Grothendieck \*

Pr. Omar FASSI-FEHRI

Secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

**Mesdames Messieurs,  
Chers collègues**

Nous sommes ici aujourd'hui pour rendre hommage à un génie des mathématiques qui est le professeur Alexander Grothendieck, salué comme l'un des mathématiciens les plus influents du XX<sup>ème</sup> siècle, et considéré comme le fondateur de la géométrie algébrique. Ses pairs le placent au niveau d'Albert Einstein, dont il partage l'aversion pour l'apprentissage scolaire, l'indépendance de pensée et une puissance de travail stupéfiante. Son ambitieux programme de fusion entre l'arithmétique, la géométrie algébrique et la topologie continue de structurer les mathématiques modernes. On dit de lui, qu'il apprend pas les maths, il les fait et les refait. Par ses capacités pédagogiques et scientifiques, il a stimulé des milliers d'étudiants universitaires et de chercheurs dans plusieurs pays notamment en France et au Maroc.

Alexandre Grothendieck est né en 1928 à Berlin. D'origine juive, il a connu pendant deux ans le camp de Rieucros, avec sa mère. De cette époque, il apprend le goût de l'école mais connaît aussi celui de la souffrance qui ne le quittera jamais. Il arrive en France en 1939 pour échapper au régime nazi. Il poursuit sa scolarité au collège cévenol du Chambon-sur-Lignon et ira jusqu'au bac. Avec son bac, il s'inscrit à la fac de Montpellier. Devenu un étudiant brillant, il se consacre aux mathématiques et réalisera ses études avec les plus grands mathématiciens français de l'époque.

Après avoir suivi ses premières études universitaires à la Faculté des sciences de Montpellier, il monte à Paris en 1948 pour rencontrer Henri Cartan à qui on a confié la tâche de reconstruire l'école française de mathématiques. Ce dernier lui conseille de se rendre à Nancy où la jeune garde des mathématiques modernes s'est repliée et où se trouvaient les mathématiciens de renommée tels que Laurent Schwartz (médaillé Fields 1950) et Jean Dieudonné qui l'accueillaient avec curiosité. Très vite son talent de génie s'est déclaré, puisque en quelques mois, Alexandre Grothendieck va rédiger l'équivalent de six thèses de doctorat. Pour un doctorant solide, mieux vaut compter trois ou quatre ans pour aller au bout d'une seule. L'effort est si considérable qu'il ne viendrait à personne l'idée de rédiger deux thèses en parallèle. Il a tout simplement ouvert un domaine de recherche, «les espaces vectoriels topologiques», dont se serviront les spécialistes de la mécanique quantique, pour le refermer aussitôt.

Entré au CNRS en 1950, il a été une personnalité centrale de l'Institut des Hautes Etudes Scientifiques (IHES) dès sa fondation en 1958.

La portée de ses travaux a marqué de manière décisive l'histoire de l'Institut, et a largement contribué à sa renommée internationale.

Son génie s'est exprimé dans le domaine de la géométrie algébrique, qu'il a transformée. Il obtiendra pour ce travail la médaille Fields en 1966 à l'âge de 38 ans, soit l'équivalent du prix Nobel, qu'il revendra aux enchères pour soutenir le Vietnam dans sa lutte contre l'impérialisme.

Les événements de mai 1968 vont le marquer profondément, il quitte l'IHES et rejoint le Collège de France, où il va poser sa question folle : «allons-nous continuer la recherche scientifique?». Devenu trop gauchiste pour le Collège de France, sa chaire fut supprimée.

Le génie des mathématiques, Alexandre Grothendieck, passera encore un an à Orsay et retournera à Montpellier, où il deviendra simple professeur à l'Université Montpellier 2 de 1973 jusqu'à son départ en retraite, en 1988.

À partir de la fin des années soixante-dix, il s'est éloigné de la communauté scientifique parce qu'il considérait que la recherche était financée par le capitalisme. Il inventera avec d'autres militants écologistes l'écologie radicale. Arrivé au sommet de son art, Alexandre Grothendieck, préfère l'ombre à la lumière et refuse, en 1988, le prix de Crafoord. Puis il est parti s'installer en Ariège dans les Pyrénées pour des raisons politiques, écologiques et spirituelles.

Après sa mort, il lègue à l'université de Montpellier 20000 pages manuscrites. Ces pages recèlent sans doute bien des secrets de ces langages improbables et multiformes que sont «les mathématiques», qui ont fait et font tant pour que le progrès, les progrès, du/des savoirs deviennent des réalités qui aident l'humanité tout entière,... et chacun de nous.

Son premier élève, Michel Demazure, résume Alexandre Grothendieck dans ces phrases :

*«Alexandre Grothendieck représente le cas extrême du mathématicien qui cherche une approche globale, une compréhension totale. Il ne veut pas s'enfermer dans des cas précis, des exemples qui vont limiter sa réflexion ou la portée de son travail».*

Pour terminer, je saisi cette occasion pour présenter mes remerciements et mes félicitations, au Collège des Sciences de la Modélisation et de l'Information de l'Académie pour l'organisation de cette rencontre en hommage au Pr. Alexander Grothendieck et pour souhaiter plein succès aux travaux de cette journée d'étude en hommage à ce grand mathématicien.

\* Ce discours a été précédé d'un hommage vibrant à la mémoire du Pr. Abdelghani BELLOUQUID.

## D'une enfance chaotique à une thèse qui a fait de Grothendieck l'un des meilleurs mathématiciens du monde

El Haj LAAMRI

Maître de conférences à l'Université de Lorraine



En me basant sur un maximum de témoignages, je vais décrire, à travers ce texte, le parcours de Grothendieck, de sa naissance le 28 mars 1928 jusqu'à sa nomination comme maître de recherche au CNRS à Paris en 1956. J'essaierai de souligner l'importance de son passage à Nancy<sup>1</sup> (de 1949 à 1953) pour préparer son doctorat, où il connût des conditions intellectuelles exceptionnelles au contact de mathématiciens de premier ordre. J'insisterai aussi sur son éclosion en tant que mathématicien et aborderai rapidement comment et pourquoi il est passé de l'Analyse Fonctionnelle à la Géométrie Algébrique à partir de 1955.

### Enfance chaotique de Grothendieck

Comme l'a écrit Winfried Scharlau<sup>2</sup>, l'un de ses biographes :

*"on ne peut comprendre la vie de Grothendieck, à supposer qu'on puisse la comprendre, sans connaître la vie de ses parents."*

### Père de Grothendieck

Alexander Schapiro (dit Sascha), issu d'une famille juive pratiquante, est un éternel révolutionnaire. Il est né en 1890 à Novozybkov, en Russie, près de la frontière ukrainienne. Voilà ce qu'a dit Grothendieck de son père dans une conférence au CERN en 1970 :

"... A l'âge de quatorze ans, il prenait le large pour rejoindre un des groupes anarchistes qui sillonnaient le pays, en prêchant la révolution, le partage des terres et la liberté des hommes, de quoi faire battre un coeur généreux et hardi! C'était en Russie tsariste, en 1904. Pendant

deux ans, Il partage la vie mouvementée d'un groupe qu'il avait rejoint, puis, cerné par les forces de l'ordre et après un combat acharné, il est fait prisonnier avec tous ses camarades. Tous sont condamnés à mort, et tous, sauf lui, sont exécutés. Pendant trois semaines, il attend jour après jour qu'on le ramène au peloton. Il est finalement grâcié à cause de son jeune âge, et sa peine commuée en celle de prison à perpétuité. Il reste en prison onze ans de l'âge de 16 à l'âge de 27 ans, avec des épisodes mouvementés d'évasions, révoltes, grèves de la faim... Il est libéré par la révolution en 1917, puis participe très activement à la révolution, en Ukraine surtout où il combat, à la tête d'un groupe autonome de combattants anarchistes bien armés, en contact avec Makhno, le chef de l'armée ukrainienne des paysans. Condamné à mort par les bolcheviques, il a réussi à s'enfuir pour atterrir d'abord à Paris. Au cours des quatre dernières années écoulées d'activités militante et combattante, il a d'ailleurs une vie amoureuse assez tumultueuse, dont est issu un enfant, mon demi-frère Dodek."

Après son exil Parisien, Sascha revient à Berlin pour s'y "installer". Il gagne sa vie en tant que photographe de rue et fréquente les milieux anarchistes.

### Mère de Grothendieck

Hanka, Hanka Grothendieck, la mère d'Alexander, née en 1900 au nord de l'Allemagne, est issue d'une famille bourgeoise protestante de Hambourg. Voulant s'affranchir de son éducation traditionnelle, elle vient dans les années 1920 à Berlin, haut lieu des avant-gardes culturelles et révolutionnaires. Hanka était mariée à Alf Raddatz et le couple avait déjà une fille (Maidi).

### Naissance d'Alexander Grothendieck

C'est dans ces milieux anarcho-libertaires que Hanka et Sacha se rencontrent. D'après Winfried

1. Nancy était la "capitale" mondiale de l'Analyse dans les années 1930, 1940 et 1950.

2. Winfried Scharlau : Who is Alexander Grothendieck ? Notices of the AMS, vol. 55, no. 8 (2008).

Scharlau, lorsque Sascha rencontre Alf, il lui annonce tout de go qu'il va lui "voler sa femme". Le petit Alexander (dit aussi "Shourik" pour les intimes) est né de cette idylle le 28 mars 1928 et gardera le nom de sa mère et sa langue.

La famille, formée de Sascha, Hanka, Alexander et Maidi (la fille de Hanka et Alf), n'a vécu réunie que pendant cinq ans. En effet, l'arrivée des nazis au pouvoir contraint Sascha à s'enfuir à nouveau à Paris en mai 1933. Hanka le rejoint début 1934, après avoir placé son fils Alexander (de cinq ans) dans la famille d'un pasteur de Hambourg, Wilhelm Heydorn, et sa fille Maidi chez ses grands-parents. En 1936, le couple part pour l'Espagne où il s'engage auprès du Front populaire. Après la victoire franquiste, le couple retourne en France.

### Grothendieck arrive en France à l'âge de 11 ans

En 1939, la situation de l'enfant devient dangereuse, du fait que ses parents adoptifs s'opposent au régime nazi. Pour sauver le petit Alexander, les Heydorn l'envoient en France en avril 1939 à ses parents. En octobre 1939, Sascha (comme d'autres réfugiés antifascistes, émigrés d'Espagne ou d'Allemagne) est arrêté et est envoyé au camp du Vernet, en Ariège, où il est interné. D'ailleurs pas très loin du village de Lasserre où Grothendieck allait finir sa vie. Déporté à Auschwitz, Sascha meurt en août 1942, ce que Alexander et sa mère n'apprendront que plus tard.

D'après plusieurs témoignages, Alexander Grothendieck vouera à son père une grande et durable admiration bien qu'il n'ait vécu avec lui que peu de temps. L'image du héros révolutionnaire ne faiblira pas : le portrait à l'huile de Sascha, réalisé par un codétenu du camp du Vernet, trônera longtemps dans son bureau de l'IHES (Institut des Hautes Etudes Scientifiques).

### Hanka et Alexander Grothendieck internés

Début 1940, Hanka, citoyenne allemande, donc d'un pays ennemi, est placée avec son fils au camp de Rieucros. Le petit Alexander peut tout de même aller au collège. Voici comment Grothendieck évoque cette période dans son autobiographie<sup>3</sup> "Récoltes et Semaines" : "La première année de lycée en France, en 1940, j'étais interné avec ma mère au camp de concentration à Rieucros près de Mende. C'était la guerre, et on était des étrangers -des "indésirables"-, comme on disait. Mais l'administration du camp fermait un oeil pour

les gosses du camp, tout indésirables qu'ils soient. On entraînait et on sortait un peu comme on voulait. J'étais le plus âgé, et le seul à aller au lycée, à quatre ou cinq kilomètres de là, qu'il neige ou qu'il vente, avec des chaussures de fortune qui toujours prenaient l'eau."

En février 1942, le camp de Rieucros est fermé et tous les prisonniers sont transférés au camp de Brens, à 200Km de là. C'était donc fini pour le collège. Mais en juin 1942, il a été permis au petit Alexander de quitter le camp de Brens et d'aller se réfugier au village de Chambon-sur-Lignon grâce à la CIMADE (association d'aide aux réfugiés). Chambon-sur-Lignon est une agréable station de vacances qui abrite un lycée privé appelé "Collège Cévenol". Alexander fut pensionnaire au Foyer Suisse (c'est un foyer qui accueille des enfants juifs réfugiés) et élève au lycée.

Mais sa vie dans le foyer est une angoisse permanente, comme il le raconte très simplement dans "Récoltes et Semaines" :

"Quand on était averti par la police locale qu'il y aurait des rafles de la Gestapo, on allait se cacher dans les bois pour une nuit ou deux, par petits groupes de deux ou trois, sans trop nous rendre compte qu'il y allait bel et bien de notre peau."

Malgré ces conditions difficiles et le fait qu'il ait intégré le collège en 5<sup>ème</sup>, il a réussi à décrocher son bac en juin 1945 avec mention très bien. Voici ce que rapporte une note au collège le concernant:

*"Alexandre Grothendieck, dit "Alex le poète". Allemand ? Russe ? Mère internée. Enfant très intelligent, toujours plongé dans ses réflexions, ses lectures, très bon joueur d'échec [...] réclame le silence quand il écoute la musique. Sinon tapageur, nerveux, brusque."*

### Études à l'Université de Montpellier (1945-1948)

Après la fin de la guerre, Grothendieck et sa mère s'installent à Mayrargues, un village au nord de Montpellier. Il s'inscrit en mathématiques à la faculté des sciences de Montpellier à partir de novembre 1945 (l'année universitaire à l'époque commençait en novembre) et bénéficie d'une bourse d'études. La mère et le fils vivent modestement grâce à la bourse du fils, à des travaux saisonniers dans les vignes et les vergers ainsi qu'aux ménages que fait la mère quand

3. Autobiographie de Grothendieck intitulée Récoltes et Semaines : Réflexions et témoignages sur un passé de mathématicien, éditée la première fois, en 1985, par l'université des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier) et le CNRS. Le manuscrit est en ligne sur internet.

son état de santé le permet. En fait, Hanka avait contracté la tuberculose dans les camps.

Mais les cours et les livres de l'époque ne le satisfaisaient pas comme il le raconte dans "Récoltes et Semailles" :

"Ce qui me satisfaisait le moins, dans nos livres de maths, c'était l'absence de toute définition sérieuse de la notion de longueur (d'une courbe), d'aire (d'une surface), de volume (d'un solide). Je me suis promis de combler cette lacune, dès que j'en aurais le loisir. J'y ai passé le plus clair de mon énergie entre 1945 et 1948, alors que j'étais étudiant à l'Université de Montpellier. Les cours à la Fac n'étaient pas faits pour me satisfaire[...] Aussi je ne mettais les pieds à la Fac que de loin en loin, pour me tenir au courant du sempiternel "programme". Les livres y suffisaient bien, au dit programme, mais il était bien clair aussi qu'ils ne répondaient nullement aux questions que je me posais. A vrai dire, ils ne les voyaient même pas... Du moment où ils donnaient des recettes de calcul à tout venant, pour des longueurs, des aires et des volumes, à coups d'intégrales simples, doubles, triples (les dimensions supérieures à trois restant prudemment éludées...), la question d'en donner une définition intrinsèque ne semblait pas se poser, pas plus pour mes professeurs que pour les auteurs des manuels [...] Il n'y avait aucun doute en moi que je ne pourrais manquer d'y arriver, de trouver le fin mot des choses, pour peu seulement que je me donne la peine de les scruter, en mettant noir sur blanc ce qu'elles me disaient, au fur et à mesure. L'intuition du volume, disons, était irrécusable. Elle ne pouvait qu'être le reflet d'une réalité, évasive pour le moment, mais parfaitement fiable. C'est cette réalité qu'il s'agissait de saisir, tout simplement [...] En m'y mettant, à l'âge de dix-sept ans et frais émoulu du lycée, je croyais que ce serait l'affaire de quelques semaines. Je suis resté dessus pendant trois ans."

Ainsi Grothendieck a consacré beaucoup de temps à ses recherches sur l'intégrale de Lebesgue et n'a pas réussi à valider tous les certificats nécessaires pour obtenir sa Licence en 1947. Il était donc obligé de refaire une année de plus à Montpellier. Voilà ce qu'il en dit dans "Récoltes et Semailles" :

"J'ai trouvé même moyen, à force, de louper un examen, en fin de deuxième année de Fac – celui de trigonométrie sphérique (dans l'option "astronomie approfondie", sic) –, à cause d'une erreur idiote de calcul numérique. (Je n'ai jamais été bien fort en calcul, il faut dire, une fois sorti du lycée...) C'est pour ça que j'ai dû rester encore une troisième année à Montpellier pour y terminer ma licence, au lieu d'aller à Paris tout de suite – le seul endroit, m'assurait-on –, où j'aurais l'occasion de rencontrer les gens au courant de ce qui était considéré comme important, en maths."

En fait, son Professeur de Calcul différentiel (Mr Soula) lui a expliqué que la question avait été résolue par le mathématicien Henri Lebesgue <sup>4</sup>. Mais Grothendieck ne veut pas voir la solution dans un livre :

"... A aucun moment, je n'ai été effleuré par l'idée d'aller dénicher le livre de ce Lebesgue, dont Monsieur Soula m'avait parlé. Dans mon esprit, il n'y avait rien de commun entre ce que pouvait être un livre et le travail que je faisais, à ma façon, pour satisfaire ma curiosité."

raconte Grothendieck dans "Récoltes et semailles".

### Grothendieck passe l'année universitaire 1948-1949 à Paris

Après avoir eu sa licence en juin 1948, il monte à Paris, avec une lettre de recommandation pour Elie Cartan <sup>5</sup>, que son Professeur Jacques Soula lui a faite. Il a aussi réussi à décrocher une bourse après un entretien concernant ses projets d'études, avec André Magnier, inspecteur de math et surtout membre de l'Entraide Universitaire de France. Voilà ce qu'a écrit plus tard A. Magnier de cette rencontre dans le bulletin de l'ENS (Ecole Normale Supérieure) :

"A l'époque, en 1948, je faisais partie de l'Entraide Universitaire de France. Comme Grothendieck était dans une situation de dénuement total, nous lui avons proposé de présenter un projet d'études. Je le reçus chez moi. Je fus stupéfait. Au lieu d'un entretien de vingt minutes, il passa deux heures à m'expliquer comment il avait reconstruit, "avec les moyens du bord", des théories qui avaient mis

4. Henri Lebesgue (1875-1941) est un mathématicien français. Après sa réussite à l'agrégation en 1897, il enseigne quelques années en classes préparatoires à Nancy, et prépare simultanément sa thèse. Il la soutient en 1902, sous le titre intégrale, longueur, aire. Dans cette thèse, Lebesgue présente la théorie d'une nouvelle intégrale, appelée depuis intégrale de Lebesgue. Élu professeur au Collège de France en 1921 et membre de l'Académie des Sciences de Paris en 1922.

5. Élie Cartan (1869-1951) est mathématicien français. Ses principaux travaux portent sur les applications géométriques des groupes de Lie, la relativité (théorie Einstein-Cartan) et sur la théorie des spineurs. Élu membre de l'Académie des Sciences de Paris en 1931. Le laboratoire de Math de l'université de Lorraine porte son nom depuis 1953.



des siècles à se construire. Il montrait une sagacité extraordinaire. Je lui accordai immédiatement la bourse et le mis en contact avec Henri Cartan<sup>6</sup>, qui l'admit à son cours de l'Ecole Normale Supérieure. Grothendieck donnait l'impression d'un jeune homme extraordinaire mais déséquilibré par la souffrance et la privation."

Effectivement, c'est Henri Cartan, Directeur des études à l'ENS, qui a reçu Grothendieck. Il l'a accepté dans son cours et son séminaire, et il lui a aussi conseillé de suivre le cours de Jean Leray<sup>7</sup> au Collège de France. Voilà ce que raconte Grothendieck de cette année universitaire à Paris dans "Récoltes et Semailles" :

"J'ai découvert l'existence d'un monde mathématique en débarquant à Paris en 1948, à l'âge de 20 ans, avec dans ma maigre valise une Licence des Sciences de l'Université de Montpellier, et un manuscrit aux lignes serrées, écrit recto-verso, sans marge (le papier était cher!), représentant trois ans de réflexions solitaires sur ce qui (je l'ai appris après) était alors bien connu sous le nom de "théorie de la mesure" ou de "l'intégrale de Lebesgue". Faute d'en avoir jamais rencontré d'autre, je croyais bien, jusqu'au jour où je suis arrivé dans la capitale, que j'étais seul au monde à "faire des maths", le seul mathématicien donc. C'était pour moi la même chose, et l'est un peu resté jusqu'à aujourd'hui encore. J'avais jonglé avec les ensembles que j'appelais mesurables (sans avoir rencontré d'ailleurs d'ensemble qui ne le soit...) et avec la convergence presque partout, mais ignorais ce qu'est un espace topologique. Je restais un peu paumé dans une douzaine de notions équivalentes "d'espace abstrait" et de compacité, pêchés dans un petit fascicule (d'un dénommé Appert je crois, dans les Actualités Scientifiques et Industrielles), sur lequel j'étais tombé Dieu sait comment. Je n'avais pas entendu prononcer encore, dans un contexte mathématique du moins, des mots étranges ou

barbares comme groupe, corps, anneau, module, complexe, homologie (et j'en passe !), qui soudain, déferlaient sur moi tous en même temps. Le choc fut rude ! Si j'ai "survécu" à ce choc, et ai continué à faire des maths et à en faire même mon métier, c'est qu'en ces temps reculés, le monde mathématique ne ressemblait guère encore à ce qu'il est devenu depuis. Il est possible aussi que j'avais eu la chance d'atterrir dans un coin plus accueillant qu'un autre de ce monde insoupçonné. J'avais une vague recommandation d'un de mes professeurs à la Faculté de Montpellier, Monsieur Soula (pas plus que ses collègues il ne m'avait pas vu souvent à ses cours !), qui avait été un élève de Cartan (père ou fils, je ne saurais plus trop dire). Comme Elie Cartan était alors déjà "hors jeu", son fils Henri Cartan fut le premier "congénère" que j'aie eu l'honneur de rencontrer. Je ne me doutais pas alors à quel point c'était d'heureux augure ! Je fus accueilli par lui avec cette courtoisie empreinte de bienveillance qui le distingue, bien connue des générations de normaliens qui ont eu cette chance de faire leurs toutes premières armes avec lui. Il ne devait pas se rendre compte d'ailleurs de toute l'étendue de mon ignorance, à en juger par les conseils qu'il m'a donnés alors pour orienter mes études. Quoi qu'il en soit, sa bienveillance visiblement s'adressait à la personne, non au bagage ou aux dons éventuels, ni (plus tard) à une réputation ou à une notoriété... Dans l'année qui a suivi, j'ai été l'hôte d'un cours de Cartan à "l'Ecole" (sur le formalisme différentiel sur les variétés), auquel je m'accrochais ferme ; celui aussi du Séminaire Cartan<sup>8</sup>, en témoin ébahi des discussions entre lui et Serre<sup>9</sup> à grands coups de "Suites Spectrales" (brr !) et de dessins (appelés "diagrammes") pleins de flèches recouvrant tout le tableau. C'était l'époque de la théorie des "faisceaux", "carapaces" et de tout un arsenal dont le sens m'échappait totalement, alors que je me contraignais pourtant tant bien que mal à ingurgiter définitions et énoncés et à vérifier les

6. Henri Cartan (1904-2008) est un mathématicien français. Membre co-fondateur du groupe Bourbaki. Fils d'Élie Cartan, il est considéré comme l'un des mathématiciens français les plus influents de son époque. Élu à l'Académie des Sciences de Paris en 1974.
7. Jean Leray (1906-1998) est un mathématicien français. Il a commencé sa carrière comme professeur de mécanique des fluides à l'université de Nancy de 1936 à 1940 où il est devenu célèbre quand il a résolu le fameux problème de Navier-Stokes (NS) en dimension 2. Le problème (NS) en dimension 3 est toujours ouvert et fait partie des sept problèmes du millénaire dont la solution vaut un million de dollars. Emprisonné entre 1940 et 1945, J. Leray a été obligé de changer de sujet de recherche (voir le texte de M. Demazure). Professeur au Collège de France de 1947 à 1978, il est élu membre de l'Académie des Sciences de Paris en 1953 et lauréat de plusieurs prix nationaux et internationaux.
8. Le Séminaire Cartan a eu lieu à l'ENS de Paris de 1948 à 1964. Les textes de ce séminaire sont en ligne sur le site [www.numdam.org](http://www.numdam.org).
9. Né en 1926, Jean-Pierre Serre est un mathématicien français (l'un des plus grands mathématiciens du 20<sup>ème</sup> siècle). Il est le plus jeune lauréat de la médaille Fields (1954) et le plus jeune professeur au Collège de France (1955-1994). Membre du groupe Bourbaki. Élu membre de l'Académie des Sciences de Paris en 1974, il est aussi lauréat de la médaille d'or du CNRS ainsi qu'un maximum de prix prestigieux en Maths : Wolf, Abel, Balzan...

démonstrations. Au Séminaire Cartan il y avait aussi des apparitions périodiques de Chevalley<sup>10</sup>, de Weil<sup>11</sup>, et les jours des Séminaires Bourbaki<sup>12</sup> (réunissant une petite vingtaine ou trentaine à tout casser, de participants et auditeurs), on y voyait débarquer, tel un groupe de copains un peu bruyants, les autres membres de ce fameux gang Bourbaki<sup>13</sup>: Dieudonné<sup>14</sup>, Schwartz<sup>15</sup>, Godement<sup>16</sup>, Delsarte<sup>17</sup>. Ils se tutoyaient tous, parlaient un même langage qui m'échappait à peu près totalement, fumaient beaucoup et riaient volontiers, il ne manquait que les caisses de bière pour compléter l'ambiance - c'était remplacé par la craie et l'éponge-. Une ambiance toute autre qu'aux cours de Leray au Collège de France (sur la théorie de Schauder du degré topologique dans les espaces de dimension infinie, pauvre de moi!), que j'allais écouter sur les conseils de Cartan. J'avais été voir Monsieur Leray au Collège de France pour lui demander (si je me rappelle bien) de quoi traiter son cours. Je ne me rappelle ni

des explications qu'il a pu me donner, ni si j'y ai compris quoi que ce soit, seulement, que là aussi je sentais un accueil bienveillant, s'adressant au premier étranger venu. C'est cela et rien d'autre, sûrement, qui a fait que je suis allé à ce cours et m'y suis accroché bravement, comme au Séminaire Cartan, alors que le sens de ce que Leray y exposait m'échappait alors presque totalement."

On déduit du témoignage précédent que l'algèbre générale et l'algèbre linéaire ne faisaient pas partie du programme de la Licence de Mathématiques à l'époque.

Par ailleurs, Grothendieck évoque plusieurs noms. Tous sont des anciens élèves à l'ENS et formaient (ou allaient former) le noyau de l'élite mathématique française (voire mondiale) : Laurent Schwartz et Jean-Pierre Serre seront lauréats de la médaille Fields<sup>18</sup> respectivement en 1950 et 1954. Ils étaient également tous membres du groupe

10. Claude Chevalley (1909-1999) est un mathématicien français. Il est co-fondateur du groupe Bourbaki et co-fondateur avec Grothendieck de l'association écologiste radicale "Vivre et Survivre" (voir le texte de Jean Malgoire).

11. André Weil (1906-1998) est un mathématicien français. Membre co-fondateur du groupe Bourbaki, il est notamment connu par ses conjectures. En effet, les conjectures de Weil ont largement influencé les géomètres algébristes depuis 1950. Grothendieck a passé beaucoup de temps pour les démontrer (voir le texte de M. Demazure).

12. Voir la note sur Bourbaki.

13. Bourbaki : nom d'un groupe de mathématiciens formé en 1935 dont l'objectif premier était la rédaction d'un traité d'analyse. Sa composition a évolué avec un renouvellement constant de générations. Sous le pseudonyme de Nicolas Bourbaki fut publiée une série d'ouvrages sous le titre *Éléments de mathématique*. Ces livres ont eu une influence notable sur l'enseignement ainsi sur l'évolution des mathématiques du 20<sup>ème</sup> siècle. Grothendieck sera membre du groupe Bourbaki de 1955 à 1961.

Le séminaire Bourbaki (<http://www.bourbaki.ens.fr/>) a lieu à Paris depuis 1948. C'est donc l'un des plus vieux (voire le plus vieux) séminaire dans le monde et l'un des plus réputés. Les textes des conférences sont rédigés à l'avance et distribués le jour des exposés. Le conférencier expose un travail de recherche de haut niveau qui n'est pas le sien, seul Grothendieck y a exposé ses propres travaux (voir le texte de M. Demazure).

14. Jean Dieudonné (1915-2002) est un mathématicien français et co-fondateur du groupe Bourbaki. Il a été professeur à l'université de Nancy (1948-1952) et à l'université du Michigan (1952-1959). Comme il a été le premier professeur permanent à l'I.H.E.S. (1959-1964). Président du Congrès International des Mathématiciens en 1970, il est considéré comme le dernier mathématicien capable de comprendre tout séminaire de son époque.

15. Laurent Schwartz (1915-2002) est le premier mathématicien français lauréat de la médaille Fields (1950) pour ses travaux sur la théorie des distributions. Professeur à l'université de Nancy (1945-1952), à l'université de Paris (1952-1958) et à l'Ecole Polytechnique (1958-1980). Élu membre de l'Académie des Sciences de Paris en 1973.

16. Né en 1921, Roger Godement a été professeur à l'université de Nancy (1946-1955) puis à l'université de Paris 7 (1955-1990). En plus des Maths, R. Godement est aussi connu pour son engagement contre la guerre d'Algérie, la guerre du Vietnam puis le lobby militaro-Industriel et la collaboration entre scientifiques et militaires.

17. Jean Delsarte (1903-1968) a fait toute sa carrière à l'université de Nancy. Il devient doyen de la faculté des sciences de Nancy de 1945 à 1949. Membre co-fondateur du groupe Bourbaki et son secrétaire général jusqu'à son décès. Recruteur hors pair : il attire à Nancy plusieurs brillants mathématiciens tels que J. Leray, J. Dieudonné, L. Schwartz, R. Godement, J.-P Serre (pour ne citer que ceux qui ont un lien étroit avec Grothendieck) ...

18. La médaille Fields est la plus prestigieuse récompense pour la reconnaissance de travaux en mathématiques, souvent considérée comme un équivalent du prix Nobel car il n'en existe pas pour cette discipline. Elle est attribuée tous les quatre ans au cours du congrès international des mathématiciens à, au plus, quatre mathématiciens de moins de 40 ans. Les lauréats se voient attribuer chacun une médaille et un prix de 15 000 dollars canadiens. C'est le mathématicien canadien, John Charles Fields, qui propose la création de cette médaille. A sa mort en 1932, il lègue ses biens à la science afin de contribuer au financement de la médaille. L'attribution des deux premières médailles a lieu en 1936. La seconde guerre mondiale interrompt la délivrance de la distinction jusqu'en 1950. Grothendieck sera lauréat de la médaille Fields en 1966.

Bourbaki, à l'exception de Jean Leray. En outre, Jean Delsarte, Jean Dieudonné, Roger Godement et Laurent Schwartz étaient professeurs à l'université de Nancy, Jean-Pierre Serre allait les rejoindre à partir de la rentrée universitaire 1952. Quant à Claude Chevalley et André Weil, ils étaient en poste aux États-Unis.

Comme on va le voir dans la suite de ce texte ainsi que dans le texte de M. Demazure, le chemin de Grothendieck va croiser celui de la majorité de ces mathématiciens, notamment J. Dieudonné, L. Schwartz et J.-P Serre.

Revenons maintenant à Grothendieck, et ainsi que le veut la tradition à l'époque, on va appeler désormais tous les mathématiciens par leur nom de famille.

### Grothendieck à Nancy à partir de Septembre 1949

Au Printemps 1949, Cartan conseille à Grothendieck d'aller préparer sa thèse à l'université de Nancy, sous la direction de Dieudonné et de Schwartz à partir de l'automne 1949 et lui suggère d'écrire à Dieudonné en lui mentionnant le travail qu'il avait déjà fait sur la théorie de la mesure et de l'intégration. Voilà l'essentiel de la réponse de Dieudonné : "J'ai lu avec intérêt votre lettre du 30 juin; elle témoigne d'une ardeur pour les mathématiques modernes dont je ne peux que vous féliciter ; et si vous venez à Nancy l'année scolaire prochaine, mes collègues et moi-même seront certainement heureux de guider vos recherches dans toute la mesure du possible..."

En fait, Cartan connaît bien Nancy à plusieurs titres. D'une part, il y est né et son illustre père Elie Cartan était professeur à l'université de Nancy entre 1903 et 1909. D'autre part, il connaît très bien tous les mathématiciens qui y enseignent. On trouve aussi à Nancy le secrétariat du groupe Bourbaki dirigé par Delsarte. Se trouvent à Nancy également des doctorants qui allaient devenir de grands mathématiciens : François Bruhat (1929-2010), Jacques-Louis Lions (1928-2001), Bernard Malgrange (1928) et Paul Malliavin (1925-2010). Ainsi Grothendieck va travailler dans un environnement mathématique exceptionnel.

### Premiers travaux de recherche de Grothendieck qui vont le sortir de l'anonymat

Grothendieck arrive à Nancy en octobre 1949.

Voilà ce que raconte Schwartz dans son autobiographie<sup>19</sup> de la première rencontre entre Dieudonné et Grothendieck :

"Il présenta d'abord à Dieudonné un article d'une cinquantaine de pages, sur "l'intégrale à valeurs dans un groupe topologique". C'était exact mais rigoureusement sans aucun intérêt. Dieudonné, avec l'agressivité (toujours passagère) dont il était capable, lui passa un savon mémorable, arguant qu'on ne devrait pas travailler de cette manière, en généralisant pour le plaisir de généraliser. Il fallait que le problème traité soit difficile, et susceptible d'applications dans le reste des mathématiques (ou d'autres sciences) ; ses résultats ne serviraient jamais à rien ni à personne."

Il se trouve qu'en cette année 1949, Dieudonné et Schwartz viennent de publier un article<sup>20</sup>. "L'article s'achevait sur quatorze questions, des problèmes que nous ne savions pas résoudre " écrit Schwartz dans son autobiographie.

Ainsi après cet accueil "chaleureux" (probablement bien étudié à l'avance et bien orchestré pour orienter le jeune néophyte vers des questions concrètes), Dieudonné a donné une copie du fameux article à Grothendieck, et lui a proposé de choisir certaines questions qui l'inspiraient et de revenir quand il aurait avancé.

Il paraît que la fameuse scène n'a fait ni chaud ni froid à Grothendieck. Il est parti tout simplement travailler et il est revenu quelques semaines après, surprenant tout le monde, à commencer par ses deux co-encadrants. Voilà ce qu'a écrit Schwartz dans son autobiographie des premiers résultats de Grothendieck :

"Nous ne le revîmes plus de quelques semaines. Lorsqu'il réapparut, il avait trouvé la solution de la moitié d'entre eux! Des solutions profondes et difficiles, nécessitant elles aussi des notions nouvelles. Nous étions émerveillés. Nous avions affaire, évidemment, à un mathématicien de tout premier ordre. Il publia cette manne de résultats et devint notre collaborateur."

Dieudonné est aussi émerveillé et il le fait savoir à tout le monde : "Le résultat dépassa nos espérances..."

En revanche, Grothendieck est surpris par l'attitude de Dieudonné, voilà ce qu'il en raconte dans "Récoltes et Semailles" :

19. Laurent Schwartz : Un Mathématicien aux prises avec le siècle, Odile Jacob, Paris, 1997.

20. J. Dieudonné ; L. Schwartz : La dualité dans les espaces (F) et (LF), Ann. Inst. Fourier Grenoble 1, (1949), p. 61-101.

“Si j’ai vu un mathématicien faire usage d’un puissant et élémentaire “pouvoir d’encouragement”, c’est bien lui! Je n’y ai jamais ressouffert avant cet instant, mais je me souviens que c’est dans ces dispositions aussi qu’il avait accueilli déjà mes tout premiers résultats à Nancy, résolvant des questions qu’il avait posées avec Schwartz.”

Ainsi quelques mois après son arrivée à Nancy, Grothendieck a publié son premier résultat. Il a aussi été invité comme cobaye au meeting Bourbaki qui avait lieu à Nancy du 3 au 7 février 1950.

La première publication a été suivie par quatre autres, ce qui a donné trois notes aux C.R.A.S (Comptes Rendus de l’Académie des Sciences) en 1950 et deux en 1951.

### La thèse qui va rendre Grothendieck célèbre au niveau mondial

Il va sans dire que les premières publications de Grothendieck étaient largement suffisantes pour soutenir une excellente thèse courant 1951. Mais il est apatride, il voyage avec un passeport Nansen<sup>21</sup>. Il ne peut donc postuler à un poste d’enseignant-chercheur en France (la nationalité française était nécessaire à l’époque) et il n’a pas l’intention de demander sa naturalisation pour ne pas accomplir de service militaire parce qu’il est antimilitariste. Dieudonné et Schwartz pensaient qu’il devrait profiter de sa bourse de thèse une année de plus puisqu’il n’avait aucun poste pour la suite. En fait, Grothendieck obtient, à partir de la rentrée 1950, une bourse en tant que “Attaché de recherches au CNRS” qu’il garde jusqu’à son départ définitif de Nancy. Par ailleurs, Dieudonné allait partir à l’Université du Michigan début septembre 1952, les deux éminents co-encadrants ont convenu que c’est Schwartz qui sera le directeur de thèse officiel et donc c’est lui qui propose un sujet de thèse. Voilà ce qu’en raconte Schwartz dans son autobiographie :

“Un sujet de thèse s’imposait. Je lui en proposai un, au printemps 1951, juste avant de passer l’été au Brésil... Preuve que je ne manipulais pas encore assez bien les espaces vectoriels topologiques. Grothendieck était l’homme tout désigné pour trouver une topologie tensorielle. Je reçus fin juillet, au Brésil, une lettre de lui, très déçue... je ne savais quoi lui répondre. Deux semaines après, je reçus un courrier triomphant.”

En fait, Grothendieck a trouvé les théorèmes fondamentaux l’été 1951. Il avait donc largement le temps pour rédiger sa thèse et préparer d’autres publications. Ainsi, en 1952, Grothendieck finit la rédaction de sa thèse, de plus 300 pages, intitulée produits tensoriels topologiques et espaces nucléaires et publiée également :

- un article intitulé Critères de compacité dans les espaces vectoriels généraux de 16 pages dans American Journal of Mathematics ;
- un article intitulé Résumé des résultats essentiels dans la théorie des produits tensoriels topologiques et des espaces nucléaires, de 41 pages dans les Annales de l’Institut Fourier de Grenoble. L’article commence ainsi :

“Cet article est destiné à donner un résumé, sans démonstration, des principaux résultats contenus dans mon travail produits tensoriels topologiques et espaces nucléaires qui sera publié dans les Mémoires of the American Mathematical Society.”

En outre, il soumet quatre grands articles qui seront publiés en 1953.

En ce qui concerne la soutenance de la thèse, elle a lieu, le 28 février 1953, devant le jury composé de Cartan (Président), Schwartz (rapporteur) et Choquet<sup>22</sup> (examineur). Et voilà ce que dit Schwartz de la thèse dans son autobiographie :

“... sa thèse était un monument de plus de 300 pages, un chef d’oeuvre de première grandeur... Il fallait la lire, l’apprendre, la comprendre, car tout était difficile et profond... J’y mis six mois à plein temps. Quel travail, mais quelle joie ! Les énoncés des théorèmes

étaient kilométriques, car il n’épargnait rien au lecteur. J’y appris quantité de choses nouvelles. Ce fut la plus belle de “mes” thèses. Je connaissais depuis longtemps les plaisirs de l’enseignement et de la recherche personnelle, mais la collaboration avec ce jeune homme si talentueux constitua une expérience fascinante et enrichissante. Grothendieck fût aussitôt reconnu à l’échelle mondiale comme le grand maître des espaces vectoriels topologiques.”

21. Le passeport Nansen est un document d’identité reconnu par de nombreux États permettant aux réfugiés apatrides de voyager.

22. Gustave Choquet (1915-2006) est un mathématicien français. Spécialiste de l’Analyse Fonctionnelle, il a été élu membre l’Académie des sciences de Paris en 1976.

Cette thèse sera ensuite publiée dans les Mémoires de l'American Mathematical Society en 1955 et fera partie des documents les plus cités pendant trois décennies. Dans la version publiée, Grothendieck ajouta une dédicace en allemand, qui n'apparaissait pas dans la version originale: "An meiner Mutter, Hanka Grothendieck, in Verehrung und Dankbarkeit"; ce qu'on peut traduire comme ceci :

"A ma mère, Hanka Grothendieck, avec vénération et reconnaissance."

### Rencontre Grothendieck et Serre ou la rencontre des géants

Serre est nommé à l'université de Nancy en septembre 1952, et c'est à partir de cette année que la coopération entre ces deux géants va commencer. Voilà ce qu'en dira Grothendieck plus tard dans "Récoltes et Semailles" :

"Je pourrais dire, en exagérant à peine, qu'entre le début des années cinquante jusque vers l'année 1966, donc pendant une quinzaine d'années, tout ce que j'ai appris en "géométrie" (dans un sens très large, englobant la géométrie algébrique ou analytique, la topologie et l'arithmétique), je l'ai appris par Serre, quand je ne l'ai pas appris par moi-même dans mon travail mathématique. C'est en 1952 je crois, quand Serre est venu à Nancy (où je suis resté jusqu'en 1953), qu'il a commencé à devenir pour moi un interlocuteur privilégié - et pendant des années -, il a été même mon seul interlocuteur pour les thèmes se plaçant en dehors de l'analyse fonctionnelle. La première chose je crois dont il m'ait parlé c'était les "Tor" et les "Ext", dont je me faisais un monde et pourtant, regarde donc, simple comme bonjour..., et la magie des résolutions injectives et projectives et des foncteurs dérivés et satellites, à un moment où le *diplodocus*<sup>23</sup> de Cartan-Eilenberg n'était pas publié encore. Ce qui m'avait attiré vers la cohomologie dès ce moment, c'étaient les "théorèmes A et B" qu'il venait de développer avec Cartan, sur les espaces analytiques de Stein. J'en avais déjà entendu parler je crois, mais c'est par un ou deux tête-à-tête avec Serre que j'ai senti toute la puissance, la richesse géométrique que recelaient ces énoncés cohomologiques tellement simples. Ils m'avaient d'abord totalement passé par dessus la tête, avant qu'il ne m'en parle, à un moment où je ne "sentais" pas encore la substance géométrique dans la cohomologie faisceautique d'un espace. J'étais enchanté au

point que pendant des années j'avais l'intention de travailler sur les espaces analytiques, dès que j'aurais mené à bonne fin les travaux que j'avais encore en train en analyse fonctionnelle, où décidément je n'allais pas m'éterniser ! Si je n'ai pas vraiment suivi ces intentions, c'est parce que Serre entretemps s'était tourné vers la géométrie algébrique et avait écrit son fameux article de fondements "FAC", qui rendait compréhensible et hautement séduisant ce qui auparavant m'était apparu rébarbatif au possible, si séduisant même que je n'ai pas résisté à ses charmes, et me suis dirigé alors vers la géométrie algébrique, plutôt que vers les espaces analytiques."

Et voilà la réponse qu'a donnée Serre, au printemps 2015, suite à la question d'un journaliste de la revue "la Recherche" :

"Nous avons commencé cette correspondance en 1955, alors qu'il était au Kansas, ne trouvant pas de poste en France. Il commença à s'immerger dans la géométrie algébrique et souhaitait apprendre l'algèbre homologique qu'il ne connaissait pas. Comme il n'aimait pas lire les livres et qu'il préférait discuter avec les gens, j'ai été en quelques sortes son inter-locuteur naturel et privilégié sur ce sujet. Quand nous étions dans des endroits différents, nous nous écrivions, et quand nous étions dans le même endroit, nous nous voyions ou nous nous téléphonions. Nous avons beaucoup échangé jusqu'au 1966, et la dernière lettre date de 1987."

### Grothendieck en poste au Brésil pour deux ans

Comme on l'a déjà évoqué plus haut, Grothendieck n'a pas la nationalité française et ne peut donc avoir un poste d'enseignant-chercheur en France. Ses deux illustres directeurs de recherche Dieudonné et Schwartz commencent, en automne 1952, à lui chercher un poste à l'étranger qui soit à son niveau. Schwartz, lauréat de la médaille Fields en 1950, est de notoriété mondiale et est bien connu au Brésil d'autant plus qu'il y a fait plusieurs séjours scientifiques. Quant à Dieudonné, il est aussi connu que Schwartz et a déjà été en poste au Brésil entre 1946 et 1948. Ainsi, ils n'ont aucun problème à lui décrocher un poste de deux ans au Brésil à l'université de Sao Paulo. De plus, ils ont négocié avec l'université de Sao Paulo pour que Grothendieck puisse revenir en France fin octobre assister aux séminaires parisiens de novembre

23. Homological Algebra : livre de H. Cartan et S. Eilenberg publié en 1956. Voir aussi le texte de M. Demazure.

à février. Précisons pour le lecteur que l'année universitaire au Brésil dure de mars à décembre. Ayant soutenu sa thèse le 28 février 53, Grothendieck arrive à Sao Paulo début mars et commence immédiatement son cours qu'il donne en Français. En effet, la majorité des membres du département de Math parlaient à l'époque français et avaient l'habitude de recevoir des célébrités françaises : Weil, Dieudonné, Schwartz,...

Et, à la demande du Chef du département de Math, Grothendieck rédige les notes de son cours sur les espaces vectoriels topologiques. Notes de cours qui ont été tapées par les soins du département de Maths et qui allaient être distribuées, les années suivantes, sous la forme d'un polycopié (un pavé de 240 pages).

En ce qui concerne la recherche, Grothendieck soumet plusieurs articles. Et comme Dieu- donnés le lui avait conseillé, il soumet notamment deux papiers au "Boletim Sociedade Matematica de Sao Paulo" qui sont publiés en 1953.

Mais d'après plusieurs lettres et témoignages, Grothendieck ne se plaisait pas au Brésil et ne faisait aucun effort pour s'intégrer, notamment lors de sa deuxième année. Il ne pensait qu'à son retour en France et essayait de récupérer le maximum de notes de cours des séminaires parisiens.

### Changement de sujets de recherche

Conscient du fait qu'il a résolu tous les problèmes intéressants en Analyse Fonctionnelle, Grothendieck commença à se préparer pour s'orienter vers un nouveau sujet de recherche à partir de 1954. Plusieurs témoins l'on vu, à la bibliothèque de l'université de Sao Paulo, chercher des livres de géométrie algébrique. Voilà ce qu'il en dit plus tard dans "Récoltes et Semailles" :

"Mes premières et solitaires réflexions, sur la théorie de la mesure et de l'intégration, se placent sans ambiguïté possible dans la rubrique "grandeur", ou "analyse". Et il en est de même du premier des nouveaux thèmes que j'ai introduits en mathématiques (lequel m'apparaît de dimensions moins vastes que les onze autres). Que je sois entré dans la mathématique par le "biais" de l'analyse m'apparaît comme dû, non pas à mon tempérament particulier, mais à ce qu'on peut appeler une "circonstance fortuite" : c'est que la lacune la plus énorme, pour mon esprit épris de généralité et de rigueur, dans l'enseignement qui

m'était proposé au lycée comme à l'université, se trouvait concerner l'aspect "métrique" ou "analytique" des choses.

L'année 1955 marque un tournant crucial dans mon travail mathématique : celui du passage de l'"analyse" à la "géométrie". Je me rappelle encore de cette impression saisissante (toute subjective certes), comme si je quittais des steppes arides et revêches, pour me retrouver soudain dans une sorte de "pays promis" aux richesses luxuriantes, se multipliant à l'infini partout où il plaît à la main de se poser, pour cueillir ou pour fouiller... Et cette impression de richesse accablante, au delà de toute mesure, n'a fait que se confirmer et s'approfondir au cours des ans, jusqu'à aujourd'hui même. C'est dire que s'il y a une chose en mathématiques qui (depuis toujours sans doute) me fascine plus que toute autre, ce n'est ni "le nombre", ni "la grandeur", mais toujours la forme. Et parmi les mille-et-un visages que choisit la forme pour se révéler à nous, celui qui m'a fasciné plus que tout autre et continue à me fasciner, c'est la structure cachée dans les choses mathématiques."

### Grothendieck à l'université du Kansas à partir de janvier 1955

Le contrat avec l'université de Sao Paulo va prendre fin en octobre 1954 et Grothendieck est très intéressé par un poste permanent en France. Mais sa candidature, à un poste de maître de recherches au CNRS, avait été rejetée en juillet 54. Il n'y avait pas d'autre solution à part trouver un poste à l'étranger.

Très inquiet par la situation de Grothendieck et voulant toujours l'aider, Dieudonné lui écrivait :

"Puisque le CNRS vous a refusé une maîtrise de recherche (je crois que vous êtes hélas victime de la réaction anti-Bourbaki !), et que je présume que vous n'avez pas l'intention de vous incruste au Brésil, envisageriez-vous maintenant de venir aux USA? Il y a naturellement l'obstacle du voyage de votre mère, mais Schwartz me dit que vous ne l'avez pas emmenée avec vous cette fois, d'où je présume que vous accepteriez peut-être de venir dans les mêmes conditions aux États-Unis ?"

Effectivement, Grothendieck est invité par l'université de Kansas, en tant que "Professeur Visiteur", à partir de janvier 1955. Et voilà comment sa venue a été annoncée :

“News announcement from the K.U. News Bureau, January 11, 1955 : Alexandre Grothendieck, brilliant young French mathematician, has arrived at the University of Kansas for a six months assignment as a visiting research associate professor. Grothendieck is an expert on the theory of linear topological spaces. A large research project, partially government sponsored, has been in progress at K.U. in that field for several years.

We sought Professor Grothendieck's services a year ago as he was highly recommended by the best French mathematicians, “said Dr. G. Baley Price, department chairman”. However he was still on a 2-year engagement in Sao Paulo, Brazil.”

Les conditions de travail à l'Université du Kansas sont excellentes et Grothendieck est très bien payé. D'autres universités américaines profitant de son séjour au Kansas l'invitent pour y donner des séminaires.

Durant cette période, Grothendieck rédige ses derniers travaux en Analyse Fonctionnelle (il va en publier deux ou trois) et travaille sur l'algèbre homologique. Au printemps 1955, il envoie à Serre une copie d'un manuscrit qu'il a intitulé "classes abéliennes" en lui disant : “J'ai déjà la conviction que la façon bourbachique de faire de l'algèbre homologique, c'est de changer de classe abélienne à tout instant, comme on change le corps des scalaires, ou la topologie en Analyse Fonctionnelle.”

Serre montre le manuscrit aux membres du groupe à l'occasion du congrès Bourbaki qui a lieu au mois de juillet 1955. Et voilà ce qu'il a écrit à Grothendieck après le congrès : “Ton papier sur l'algèbre homologique a été lu soigneusement, et a converti tout le monde (même Dieudonné, qui semble complètement fonctorisé !) à ton point de vue. Eilenberg<sup>24</sup> a décidé de faire une rédaction dans ce sens (pour Bourbaki), avec pour Chapitre I, la théorie générale de l'homologie dans les classes abéliennes, Chapitre II l'application aux modules et Chapitre III l'application aux faisceaux. Il se mettra en rapport avec toi pour les questions de rédaction et de démonstrations.”

Quant à Dieudonné, il lui a écrit :

“Serre a dû vous donner des nouvelles du Congrès Bourbaki, où vos classes abéliennes ont soulevé l'enthousiasme ! On compte sur vous pour le Congrès d'Octobre et on espère que vous nous ferez un rapport rupeux sur les fonctions analytiques.”

Mais, malgré son “exil” doré aux États-Unis, Grothendieck veut revenir en France à n'importe quel prix et le plus tôt possible. Voilà ce qu'il en dit dans une lettre à Serre : “J'ai appris qu'on créait en France une centaine de postes de professeurs associés, et qu'ils étaient aussi accessibles aux étrangers. Es-tu renseigné si la chose a fait du progrès, si éventuellement il y aurait une chance pour moi de décrocher un poste, et comment et quand on pose sa candidature ? Ça m'intéresse énormément, car il ne peut être question pour moi de rester aux États-Unis, et je préfère nettement rester en France que d'aller en Allemagne ou même en Amérique du Sud !” Serre lui répond avec délicatesse et bienveillance :

“Nous n'avons aucun détail sur la question des professeurs associés. Combien y en aura-t-il pour toute la France? Mystère. A Paris, Cartan a un candidat tout trouvé : Chevalley (confidentiel !). Y aura-t-il des postes en province ? En tout cas, tu peux être tranquille, s'il y a une possibilité pour toi, on bondira dessus. Les gens de Strasbourg avaient d'ailleurs plus ou moins pensé à toi, à un moment où ils se figuraient avoir un poste.”

Malheureusement, Grothendieck doit patienter. Schwartz lui avait envoyé une lettre en mai 56 lui annonçant que sa deuxième candidature à un poste au CNRS allait être acceptée. Voilà la réponse de Grothendieck à la lettre de Schwartz :

“Merci pour la bonne nouvelle du CNRS : à vrai dire, je ne compterai avec que quand j'aurai une lettre officielle du CNRS m'instituant maître de recherches, mais il semble qu'il y ait bon espoir.”

Effectivement, la lettre officielle ne tarda pas à arriver et Grothendieck plia bagage pour revenir à Paris où il est nommé Maître de Recherches au CNRS à Paris à partir de la rentrée 1956.

24. Samuel Eilenberg (1913-1998) est un mathématicien américain d'origine polonaise. Professeur à l'université de Columbia à New York de 1947 à 1982. Il a aussi été un membre-collaborateur du groupe Bourbaki.

### En guise de conclusion

L'enfance de Grothendieck a été marquée par le nazisme, la guerre d'Espagne et la deuxième guerre mondiale. Et pourtant, il est devenu à l'âge de 25 ans un éminent mathématicien connu à l'échelle mondiale.

Voici le premier paragraphe du rapport<sup>25</sup> qu'a fait Serre, en 1965, au comité Fields sur les travaux de Grothendieck. Ce paragraphe est entièrement consacré aux travaux qu'avait Grothendieck sur les *evt* (espaces vectoriels topologiques) durant la période 1952-1955 : "L'une des idées directrices de Grothendieck dans ce domaine a été d'"expliquer" les phénomènes d'*evt* rencontrés par L. Schwartz en théorie des distributions. Dans le travail<sup>26</sup>, il montre que la catégorie des (LF) introduite par Dieudonné-Schwartz possède quantité de propriétés pathologiques; parmi les résultats positifs qu'il obtient, on peut citer le théorème disant que le bidual d'un espace de Fréchet est un espace de Fréchet (ce n'est nullement trivial), et l'introduction de deux espaces de nouveaux types, les espaces (DF) et les espaces de "Schwartz".

C'est dans la thèse<sup>27</sup> que sont faits les progrès décisifs. Il y définit deux produits tensoriels complétés  $E \otimes_{\varepsilon} F$  et  $E \otimes_{\pi} F$  d'*evt*. Ces deux produits tensoriels, distincts en général, coïncident lorsque  $E$  appartient à une nouvelle catégorie d'*evt*, celles des espaces nucléaires. Il montre que cette catégorie possède des propriétés de stabilité remarquables. De plus la plupart des espaces fonctionnels que l'on rencontre en théorie des distributions sont nucléaires : ce fait constitue une forme particulièrement commode du "théorème des noyaux" de Schwartz.

Parmi les idées nouvelles introduites par Grothendieck en théorie des *evt*, on peut citer :

(a) la technique  $E_V$  et  $E_A$  associés à un *evt*  $E$  et à un voisinage de 0 convexe  $V$  (resp. à une partie bornée convexe  $A$ ) de  $E$ .

(b) l'utilisation des espaces  $L^p$  et  $C(K)$  dans la théorie générale des *evt* (notamment pour l'étude des applications intégrales ou nucléaires).

(c) l'application des produits tensoriels complétés à une "formule de Künneth" vectorielle-topologique (cf. séminaire de Schwartz 53-54 consacré d'ailleurs entièrement à la thèse de Grothendieck). Cette formule permet de ramener certains problèmes de dimension  $> 1$  à ceux de dimension 1. Cette technique a été utilisée par Grothendieck lui-même (trivialité de la  $d^{\text{dd}}$ -cohomologie locale) et par R. Bott (Annals, 5).

(d) les résultats "fins" de la théorie métrique des espaces tensoriels d'espaces de Banach, exposés dans son article<sup>28</sup>.

On ne saurait mieux dire.

25. J.-P Serre : Rapport au comité Fields sur les travaux de Grothendieck, K-theory 3 (1989), 199-204.

26. A. Grothendieck : Sur les espaces (F) et (DF), Summa Brasil. Math. 3 (1954), 57-123.

27. A. Grothendieck : Produits tensoriels topologiques et espaces nucléaires, Mem. Amer. Math. Soc. no. 16, (1955), 140 pp.

28. A. Grothendieck : Résumé de la théorie métrique des espaces vectorielles topologiques, Bol. Soc. Mat. Sao Paulo 8 (1953), 1-79.



## La «révolution» mathématique de Grothendieck

**Pr. Michel DEMAZURE**

*Professeur Emérite de l'Ecole Polytechnique, Paris*



La période de la vie de Grothendieck dont je vais parler se divise en gros en trois parties, avant, pendant et après ce que j'appellerai sa «période d'or» à l'Institut des Hautes Études Scientifiques (I.H.É.S.)

### 1956-1959

Si les travaux de Grothendieck en analyse fonctionnelle, démarrés dans sa période nancéenne (voir l'exposé de El Haj Laamri) et symbolisés par ses deux monographies<sup>1</sup> «EVT» et «PTT», l'ont installé comme un mathématicien exceptionnel et le meilleur spécialiste de cette discipline, il faut bien voir que – en grande partie de son fait, et il le mentionne d'ailleurs lui-même dans «Récoltes et semailles» – le domaine était alors en fin de développement, donc hors des feux de l'actualité, de sorte que la réputation de Grothendieck n'en avait guère franchi les limites.

Au contraire, la période qui s'ouvre en 1956 va voir ses capacités et sa créativité exceptionnelles à l'œuvre dans un domaine «chaud» et dans un environnement parisien propice, lui aussi exceptionnel.

En 1956, il est en effet nommé maître de recherches au CNRS et revient à Paris. Cela coïncide avec son basculement thématique, il ne publiera plus qu'un ou deux articles d'analyse fonctionnelle et va se consacrer à l'algèbre homologique et à la géométrie algébrique.

Il retrouve à Paris Henri Cartan, ses séminaires de l'École Normale Supérieure et les nombreux jeunes mathématiciens qui gravitent autour, dont Jean-Pierre Serre qui vient d'être nommé au Collège de France. L'environnement parisien de ces années est un extraordinaire terreau mathématique. Plusieurs thèmes, qui relèvent de la topologie algébrique et plus précisément des diverses théories de la cohomologie, s'y rencontrent. L'histoire en commence une dizaine d'années auparavant.

### Paris 1946-1956

Le premier thème a son origine dans les notes que Jean Leray publie en 1946, issues des travaux de sa période de captivité<sup>2</sup>. Il y introduit simultanément trois éléments qui s'avéreront essentiels : les faisceaux d'anneaux et de modules, la cohomologie des dits faisceaux et les suites spectrales. Séparés, reformulés, améliorés entre 1947 et 1951 dans ses séminaires par Henri Cartan et ses élèves, ils vont constituer ce que Raoul Bott appellera «the French revolution».

Le second thème est celui de la géométrie analytique complexe. Cartan montre en 1951 comment ces éléments permettent de formuler et de démontrer des versions beaucoup plus puissantes de ses résultats antérieurs : ce sont les fameux «théorèmes A et B». Bientôt généralisés et complétés par Cartan et Serre en 1953, ils démontrent à l'envi la puissance de l'approche «cohomologie des faisceaux» en géométrie analytique.

Parallèlement, se développe l'étude spécifique des mécanismes algébriques à l'œuvre en cohomologie. Après des articles et des ouvrages

1. EVT pour «Espaces vectoriels topologiques» (1954) et PTT pour «Produits tensoriels topologiques et espaces nucléaires» (1955).

2. Leray est prisonnier de 1940 à 1945 dans l'Oflag XVII A à Edelbach en Autriche. Il y organise et dirige une université pour les prisonniers. Désirant dissimuler aux Allemands ses compétences en mécanique des fluides de peur d'être contraint de participer à l'effort de guerre, il décide de s'attaquer aux questions de topologie algébrique qu'il a rencontrées dans ses travaux antérieurs d'analyse.

d'Eilenberg, Mac Lane et Steenrod, ces mécanismes sont dégagés, clarifiés et développés dans le magistral traité «Homological Algebra» de Cartan et Eilenberg, dont le manuscrit est disponible également en 1953<sup>3</sup>.

Le pas suivant est dû à Serre. Dans l'article fondateur «Faisceaux algébriques cohérents» (baptisé FAC), terminé en octobre 1954, il montre que les énoncés cohomologiques de la géométrie analytique ont leur pendant exact en géométrie algébrique.

C'est sur ces bases que Grothendieck va démarrer, comme il le dira dans l'exposé-programme dont nous parlerons un peu plus loin.

### Trois textes majeurs

Les «début» de Grothendieck en algèbre homologique et géométrie algébrique se traduiront par trois textes majeurs.

Il s'agit d'abord du rapport «Classes de faisceaux et théorème de Riemann-Roch», écrit en 1957. Malgré le considérable pas en avant que constituait ce travail, qui a fait beaucoup de bruit dans la communauté, Grothendieck ne l'a pas publié<sup>4</sup>, considérant qu'il n'avait pas la généralité souhaitable.

Le second est un article de 1957 au Journal de l'Université du Tohoku intitulé «Sur quelques points d'algèbre homologique». Il y fait sauter un verrou majeur de la théorie des faisceaux qui avait arrêté tout le monde (y compris Cartan), libérant ainsi dans ce cadre toute la puissance de l'algèbre homologique. Citons-en l'introduction, bien dans la manière de Grothendieck :

«Ce travail a son origine dans la tentative d'exploiter l'analogie formelle entre la théorie de la cohomologie d'un faisceau et la théorie des foncteurs dérivés de foncteurs de modules, pour trouver un cadre commun permettant d'englober ces théories et d'autres.»

Je m'arrêterai un peu plus longuement sur le troisième texte, son exposé au Congrès International d'Edinbourg en 1958. Disons d'abord un mot de ces congrès.

Les Congrès Internationaux des Mathématiciens

L'Union Mathématique Internationale organise tous les quatre ans un Congrès International des Mathématiciens où interviennent sur invitation, les meilleurs mathématiciens du moment.

Le deuxième Congrès, celui de 1900 à Paris, est fameux pour l'exposé de David Hilbert donnant une liste de 23 problèmes, qui vont animer la recherche jusqu'à nos jours, et dont cinq ne sont toujours pas résolus. Le Congrès de 1936, à Oslo, verra les premières médailles Fields être délivrées. Le suivant, après la guerre, aura lieu en 1950 à Cambridge (États-Unis). Les Congrès de 1954 à 1978 scanderont l'histoire qui nous occupe. Qu'on en juge :

- 1954, Amsterdam : Serre reçoit la médaille Fields<sup>5</sup>.
- 1958, Edinbourg : Grothendieck présente son exposé-programme.
- 1962, Stockholm : la conférence de Serre, intitulée «Géométrie algébrique», est essentiellement consacrée aux travaux de Grothendieck.
- 1966, Moscou : Grothendieck reçoit la médaille Fields, mais refuse de se rendre au Congrès<sup>6</sup>.
- 1970, Nice : Grothendieck affiche sa rupture avec la communauté mathématique.
- 1974, Vancouver : David Mumford, collaborateur de Grothendieck, reçoit la médaille Fields.
- 1978, Helsinki : Pierre Deligne, élève de Grothendieck, reçoit la médaille Fields.

### Le programme de 1958 : vers la théorie des schémas

Dans son exposé au Congrès International d'Edinbourg (1958), intitulé «The Cohomology Theory of Abstract Algebraic Varieties»,

4. Se basant sur ce rapport, Borel et Serre en ont rédigé une version publiée sous leur nom en 1958. Le texte initial sera publié dans SGA 6 (voir plus loin), séminaire dans lequel il établira une version bien plus générale encore que celle qu'il avait souhaitée initialement.

5. À chaque Congrès sont attribuées de 2 à 4 médailles, je ne cite que celles qui ont un rapport avec mon sujet.

6. Deux remarques à ce sujet. Il accepte cette médaille, contrairement au prix Crafoord, qui lui sera attribué en 1988 conjointement avec Deligne et qu'il refusera. Par ailleurs, il y a beaucoup de raisons à son refus d'aller à Moscou ; par exemple, son père y a été condamné deux fois à mort, une fois par le tsar, une fois par les bolcheviques.

Grothendieck présente son programme de travail. L'exposé commence par (je mets en gras certaines parties) :

"It is less than four years since cohomological methods (i.e. methods of Homological Algebra) were introduced into Algebraic Geometry in Serre's fundamental paper [FAC], and it seems already certain that they are to overflow this part of mathematics in the coming years, from the foundations up to the most advanced parts."

Après avoir décrit les différents thèmes qu'il entend aborder, Grothendieck conclut sur l'annonce de ce qui sera les EGA (voir ci-dessous) : un traité qui «réécrit toute la géométrie algébrique dans le cadre des schémas» qu'il a créé :

"As a quite general fact, it is believed that a better insight in any part of even the most classical Algebraic Geometry will be obtained by trying to re-state all known facts and problems in the context of schemata. This work has now begun, and will be carried on in a treatise on Algebraic Geometry which, it is hoped, will be written in the following years by J. Dieudonné and myself, and which is expected to give a systematic account of all the questions touched upon in this talk".

### La «période d'or» 1959-1970

C'est aussi en 1958 que Léon Motchane<sup>7</sup> fonde l'Institut de Hautes Études Scientifiques, sur le modèle de l'Institute for Advanced Study de Princeton. L'IHÉS est au départ réduit à quatre personnes, le directeur, sa secrétaire et deux mathématiciens, Grothendieck et Jean Dieudonné, l'ancien «tuteur» de Grothendieck à Nancy, rentré du Michigan, qui va se mettre à son service et l'assister<sup>8</sup> dans la rédaction des EGA.

Autour de Grothendieck vont se constituer des duos. À côté du duo «productif» Grothendieck-Dieudonné, le duo «prospectif» Grothendieck-Serre, les duos «collaboratifs» avec de multiples collègues de par le monde (notamment, mais pas uniquement, à Harvard), les duos

«d'apprentissage» entre le maître Grothendieck et chacun de ses élèves<sup>9</sup>, la relation privilégiée avec Pierre Deligne. Citons Pierre Cartier<sup>10</sup>:

«L'entreprise de Grothendieck fonctionne grâce à des synergies inespérées : la puissance de travail et de synthèse de Dieudonné promu scribe, l'esprit rigoureux, informé et rationaliste de Serre, le savoir-faire des élèves de Zariski en géométrie et en algèbre, la fraîcheur juvénile du grand disciple Pierre Deligne, feront contrepoids à l'esprit aventureux, visionnaire et démesurément ambitieux de Grothendieck».

En une dizaine d'années, il en résultera une œuvre colossale, qui aura une influence bien au-delà de la géométrie algébrique proprement dite. «Colossale», qu'on en juge par le volume des publications :

- EGA : Éléments de Géométrie Algébrique (avec Dieudonné), 1960-67, ch. I à IV, huit volumes, créant ab ovo la théorie des schémas.
- SGA : Séminaire de Géométrie Algébrique (avec divers collaborateurs), 1960-69, sept séminaires, treize volumes.
- Une trentaine d'exposés de séminaire originaux (séminaire Cartan, séminaire Bourbaki).
- Autres articles.

À ces publications, il faudrait ajouter bien d'autres choses, les versions préalables des chapitres à venir des EGA, les thèses de ses élèves, la correspondance mathématique, des manuscrits, etc.

Grosso modo, on peut décrire cette production comme un système emboîté, à plusieurs composantes, du plus lourd et plus lent, au plus léger et plus rapide.

### Les EGA

A la base, le traité des Éléments, tâche lourde et épuisante. Certes, l'ambition formulée à Edinbourg n'a pas été menée à son terme (l'objectif initial

7. Né à Saint-Petersbourg en 1900, émigré en Suisse en 1918, puis installé en France en 1924, Léon Motchane, industriel et résistant, reprendra des études mathématiques après la guerre et soutiendra une thèse. Après avoir créé l'IHÉS, il le dirigera jusqu'en 1971.

8. Significativement, les EGA paraîtront dans les Publications de l'IHÉS, sous la signature de Grothendieck «avec la collaboration de Jean Dieudonné». Il n'y a guère qu'en mathématiques où l'on peut voir une telle inversion hiérarchique. C'est en outre significatif de l'extraordinaire modestie de Dieudonné, par ailleurs directeur des dites Publications.

9. Pendant cette période de l'IHÉS, Grothendieck dirigera douze thèses. J'ai moi-même bénéficié entre 1962 et 1964 de cette relation régulière en tête-à-tête, à la fois généreuse et (oh combien) directive.

10. Dans Un pays dont on ne connaîtrait que le nom (Grothendieck et les «motifs»).

«réécrire tout» était évidemment inatteignable, même pour un duo aussi extraordinairement efficace), mais la partie publiée contient quantité de notions et de résultats nouveaux, bien au delà de l'idée même de réécriture, et qui sont maintenant d'usage constant.

## Les SGA

Puis les SGA. Année après année, s'ajoutent des pans énormes de géométrie algébrique, dans une forme plus légère que les *Éléments*, mais presque définitive. Si les SGA 1 et 2 (1960-62) relèvent plutôt du domaine des EGA, chacun des suivants ouvre un nouveau territoire. SGA 3 (1962-64) fonde la théorie des schémas en groupes, SGA 6 (1966-67) reprend Riemann-Roch et l'établit dans le cadre le plus général, SGA 7 (1967-69) étend la théorie de la monodromie à la géométrie algébrique. Quand aux SGA 4 et 5 (1963-66), ils développent la solution (presque totale) des conjectures de Weil, dont il nous faut parler maintenant.

## Les conjectures de Weil

En fait, au cœur du programme du 1958, se trouve déjà le problème de la «cohomologie de Weil». En 1948, André Weil avait énoncé des conjectures, relevant de la géométrie algébrique et de l'arithmétique, qui résulteraient de propriétés spécifiques d'une nouvelle théorie cohomologique restant à créer. La cohomologie de Weil est le Graal dont la quête sous-tendra toute la recherche de Grothendieck dans cette période et qui au fond justifiera le «détour de production» constitué par l'énorme chantier des schémas. Revenons en 1958. Dans le programme d'Edinbourg, juste après l'introduction, il écrit

“Therefore the initial aim was to find the ‘Weil cohomology’ of an algebraic variety...”

puis, après une courte discussion des tentatives infructueuses antérieures :

“... the Weil cohomology has to be defined by a completely different approach. Such an approach was recently suggested to me by [...] This has been the starting point of a definition of the Weil cohomology [...], which seems to be the right one, and which gives clear suggestions how Weil's conjectures may be attacked by the machinery of Homological Algebra.”

Construire la cohomologie de Weil, c'est à quoi il consacra l'essentiel de son activité entre 1962 et 1966. Comme on l'a dit, les SGA 4 et 5 y sont consacrés. Il y démontre du coup toutes les conjectures de Weil, sauf la dernière, de nature plus arithmétique, qui lui résiste. La démonstration sera achevée par Pierre Deligne en 1973.

## Et aussi...

EGA et SGA sont bien loin de couvrir sa production. Cette double machine n'allant pas assez vite, il multiplie les exposés parallèles. Entre 1956 et 1966, il fait treize exposés au séminaire Bourbaki<sup>11</sup>, où il présente des choses qui figureront ensuite dans les EGA ou les SGA, mais aussi bien d'autres dont ce sera l'unique rédaction publique. Le séminaire Cartan 1960/61 sera en fait un «séminaire Grothendieck». S'y ajoute une quinzaine d'articles tout aussi riches de contenu.

Dans ses écrits<sup>12</sup>, Grothendieck manie la langue avec un rare bonheur. Il est pointilleux, pour lui comme pour ses élèves : les énoncés doivent être «serviables», selon l'adjectif qu'il a créé et qu'il affectionne, c'est-à-dire rédigés de façon à en faciliter l'utilisation. Il baptise les notions qu'il dégage de façon extraordinairement créative et suggestive.

Au-delà de cette production écrite, et sans doute plus impressionnant encore, c'est le quatrième niveau, libéré des contraintes, ce foisonnement d'idées qui remplissent ses manuscrits, alimentent ses conversations et sa correspondance, et dont il parlera dans ses écrits ultérieurs. Il m'est impossible dans ce court texte d'en dire plus que la mention d'un thème qui apparaît en 1964, celui des «motifs», ce paysage qui se cache derrière la cohomologie de Weil, qui inspire toujours la recherche et reste mystérieux 50 ans après.

## Un révolutionnaire

Après Grothendieck, la géométrie algébrique n'est plus la même, comme cela a été le cas pour l'analyse fonctionnelle. Non seulement on dispose d'une énorme quantité de notions, d'outils et de théorèmes nouveaux, mais la façon de voir et de faire de Grothendieck a imprégné toute la discipline. Et pas seulement elle ; c'est par exemple le cas pour l'algèbre homologique, révolutionnée par l'introduction des «catégories dérivées», bien au-delà de l'article de 1958.

11. Il y présente ses propres travaux, contrairement à la pratique usuelle de ce séminaire.

12. Je parle ici des écrits mathématiques, mais c'est encore plus vrai dans les autres.

De manière générale, Grothendieck fait preuve d'une capacité extraordinaire à dégager les bonnes notions et à les nommer. Il faut bien voir qu'au-delà des tours de force (et son œuvre en regorge) que les progrès ultérieurs digèrent, et parfois banalisent, c'est cette capacité qui assure aux mathématiciens une influence anonyme et définitive. On utilise la décomposition en facteurs premiers, les sous-groupes distingués, la notation différentielle, sans se souvenir (ou même savoir) que l'on doit la chose à Euclide, Galois ou Leibniz. Il y a de même du Grothendieck caché dans bien des mathématiques actuelles.

### La rupture de 1970

La période dont nous parlons se termine par une rupture, rupture sur beaucoup de plans et rupture drastique.

Beaucoup a été écrit là-dessus, notamment par lui-même dans Récoltes et Semailles. De nombreux éléments s'y conjuguent. Sans doute, un épuisement progressif devant le chantier mathématique qui grossit sans fin. Des événements de sa vie personnelle, sans doute aussi. Et l'époque a changé ; dans la page de Wikipedia qui lui est consacrée, on trouve «un voyage au Viêt Nam en 1967, le printemps de Prague et Mai 68 le poussent vers les milieux contestataires».

C'est en juillet 1970 que Grothendieck fonde «Survivre et Vivre», le premier mouvement d'écologie radicale, avec Pierre Samuel et Claude Chevalley<sup>13</sup>. Si on en reste aux mathématiques stricto sensu, les deux épisodes majeurs ont lieu en septembre 1970. D'une part, il démissionne de l'IHÉS. D'autre part, il se rend au Congrès international de Nice pour y promouvoir sa nouvelle passion et y expliquer, sans grand succès, qu'il ne faut plus faire de mathématiques. Cela consacra sa rupture avec son «scribe de luxe» Dieudonné, alors doyen de la Faculté des Sciences de Nice, et organisateur principal du congrès.

Les quelques années qui suivent seront une période d'errance. Ayant quitté l'I.H.E.S., il occupera plusieurs fonctions temporaires, au Collège de France, puis à l'université d'Orsay. Il quitte sa famille, divorce, crée une communauté. En 1973, il s'installe à Villecun et est nommé professeur à Montpellier. Une nouvelle période va s'ouvrir.

13. Deux algébristes, coïncidence ou corrélation ?

## Période «montpellièraine» de la carrière de Grothendieck

Pr. Jean MALGOIRE

*Maître de Conférences à l'Université de Montpellier*



### PRÉAMBULE

Alexandre Grothendieck est doublement lié à Montpellier et sa région et en particulier à l'Université des Sciences : tout d'abord comme étudiant de 1945 à 1948 et ensuite, après plus de vingt années (principalement à l'IHES) d'une extraordinaire fertilité mathématique, comme professeur de 1973 jusqu'à sa retraite en 1988.

Pour tous les mathématiciens son nom est associé à une oeuvre immense et son portrait définitivement accroché au panthéon de ceux qui ont, chacun à leur manière, marqué leur époque et fait avancer significativement leur discipline. Mais pour ceux qui ont eu la chance de le côtoyer<sup>1</sup>, c'était aussi une personne extrêmement attachante. Un enthousiasme communicatif et une énergie inépuisable s'appliquaient aussi bien à ses cours et séminaires qu'à la propagation de l'écologie radicale dont il a été un pionnier; affabilité à l'égard de tous sans distinction hiérarchique et disponibilité légendaire pour ses étudiants jointe à une exigence pointilleuse. Il a été d'un grande générosité autant pour les idées mathématiques qu'il distribuait sans réserve, que pour l'aide financière dont a profité plus d'un étudiant dans le besoin.

Nous le voyions arriver chaque semaine dans sa vieille 2CV, sandales aux pieds par tout temps, pantalon trop large à bretelles et panier d'osier

rempli de pains complets à offrir ou à partager à l'occasion des repas pris en commun dès que le temps le permettait sur la pelouse près du bâtiment de Mathématiques.

La dernière image que je garde de lui date de l'été 95. Je l'avais retrouvé dans les Pyrénées où il protégeait depuis 4 ans déjà sa solitude: il m'avait reçu très amicalement; il avait l'air paisible, toujours actif intellectuellement. J'étais reparti avec un manuscrit de 2300 pages et un pot de compote de sa fabrication...

### PREMIÈRES RENCONTRES

Mon premier contact avec Alexandre Grothendieck<sup>2</sup> eut lieu l'année académique 1971-72 lors d'une conférence donnée à l'Université des Sciences à Montpellier. Il s'agissait d'une conférence *Survivre et Vivre*<sup>3</sup>. La forme de ces conférences est déjà significative de la démarche du militant de l'écologie radicale qu'était alors devenu Grothendieck : devant un grand amphithéâtre (bien rempli) il donne immédiatement la parole à la salle et ne se décide à entrer dans le débat qu'après un long silence gêné suivi d'interventions plutôt confuses qui ont conduit une bonne partie de l'assistance vers la sortie.... J'ai peu de souvenirs de l'argumentation développée ensuite par l'orateur invité, sur le thème "Allons-nous continuer la recherche scientifique?" et la dénonciation des liens étroits entre le monde de la recherche et celui du complexe militaro-industriel; je garde par contre l'image d'un homme sans concession, avec une vision assez apocalyptique du monde présent et à venir, ainsi que de l'état de la science, mais

1. J'ai eu des contacts avec Alexandre Grothendieck entre 1972 et 1999 ; ceux-ci ont été très réguliers de sept. 76 à déc. 81 période durant laquelle j'étais l'un de ses élèves.
2. De lui je ne savais à peu près rien sauf que j'avais pu entendre à cette occasion qu'il était un formidable mathématicien et cela aurait suffi à me captiver, mais le fait qu'il soit en plus en décalage total par rapport au système institutionnel le rendait complètement fascinant à l'étudiant de deuxième année que j'étais alors, "gauchiste" et très intéressé par les mathématiques.
3. Mouvement fondée à Montréal en juillet 1970 par AG et quelques amis (surtout mathématiciens) avec pour mission d'alerter la société (et en premier lieu le monde de la recherche) sur les désastres écologiques à venir, la responsabilité des chercheurs, et de proposer des moyens pour essayer d'y remédier.

très déterminé à réagir et convaincre autour de lui <sup>4</sup>.

Ma deuxième rencontre avec le maître eut lieu pendant l'année académique 1973/74 et fut plus personnelle. Il avait quitté Paris et sa banlieue avec une partie des adeptes de l'association Survivre et Vivre et avait créé l'été 73 une communauté agricole près de la petite ville de Lodève à 50km au nord est de Montpellier; ville qu'il avait connue étudiant et où il revenait maintenant comme professeur. Ses cours de deuxième année étaient souvent suivis de discussions informelles et ouvertes à tous, (voire de repas improvisés) sur la pelouse du campus. C'est là, par l'intermédiaire d'une de ses élèves (Christine P.), camarade militante comme moi dans un groupe d'extrême gauche, que je rentrai en contact avec lui. Les discussions avaient comme thème privilégié l'écologie dans un sens très large.

Il nous a proposé (à Christine et moi) de venir passer le week-end suivant chez lui dans son village de Villecun, au-dessus de Lodève. Il projetait de nous montrer un outil qui devait servir à construire les futurs bâtiments de la communauté agricole : il s'agissait, nous expliqua-t-il, d'un instrument permettant de compacter la terre pour en faire des briques de terre crue. Il avait fait venir cette presse des États Unis et en attendait une aide précieuse pour ses futurs projets de constructions.

Le voyage de Montpellier à Villecun (60km) se déroula à la tombée de la nuit sous un violent orage. Il conduisait (sans permis ?) une vieille 2cv. Pris par la discussion animée, il accordait peu d'attention à la conduite <sup>5</sup>...

Sa maison, dans le hameau de Villecun était très modeste (par choix et non par nécessité), petite, sombre et sans commodité ; elle était en parfait accord avec son mode de vie volontairement "spartiate" : éclairage à la lampe à pétrole, toujours par choix, car la maison disposait quand

même de l'électricité (réservée à l'alimentation de sa perceuse...). J'ai le souvenir d'un repas frugal (pain complet, fruits secs, thé...) mais chaleureux. Le lendemain, visite de la communauté agricole à Olmet et démonstration de la presse <sup>6</sup>.

Trois années plus tard, (1976), je venais de passer l'agrégation de mathématique, quand je tombe par hasard sur Grothendieck entouré par un groupe d'étudiants assis sur la pelouse du campus, il me demande quels sont mes projets et quand je lui réponds que je me préparais à partir pour la capitale en vue de préparer un DEA (diplôme de 5<sup>ème</sup> année) en analyse complexe, il me dit textuellement :

"L'analyse, j'en ai fait quand j'étais petit, mais l'algèbre c'est plus amusant ; si tu veux, tu peux rester ici préparer un DEA avec moi".

Bien entendu j'accepte avec enthousiasme.... Il me présente alors Christine Voisin qui venait de suivre un cours de maîtrise avec lui (elle avait déjà suivi son cours de deuxième année en 73/74) et m'explique qu'il va faire ce cours de DEA pour éviter à Christine de s'ennuyer avec le professeur initialement prévu pour cet enseignement...

## LE PROFESSEUR

Après la rupture radicale avec le monde mathématique "officiel" et son retour à la terre, on peut s'étonner du fait que Grothendieck ait souhaité exercer un emploi de professeur d'université ; bien qu'il n'en ait jamais parlé dans ses écrits, la raison était clairement financière : son salaire<sup>7</sup> servait à faire vivre sa famille (Mireille et ses trois enfants) ainsi que, fort généreusement, la communauté d'Olmet. Malgré sa radicalité il gardait quand même une certaine dose de réalisme....

Cela ne signifie pas qu'il n'ait pas pris son rôle de professeur au sérieux<sup>8</sup>. En fait, c'est même plutôt avec enthousiasme et passion que je l'ai toujours vu

4. J'ai été particulièrement frappé par la voix au timbre métallique, assez aiguë avec un accent que je n'avais pas perçu alors comme un accent germanique teinté de notes méridionales.

5. J'ai encore le souvenir de l'angoisse ressentie, tout au long du parcours, de ne pas en sortir vivant...

6. Dans "La Clef des Songes", 15 ans plus tard, AG parle de cette époque : "J'avais aussi le projet de construire un grand dôme en argile, sans charpente, à la façon traditionnelle nubienne, pour nous y installer par la suite" [avec sa compagne et leur bébé]. En fait les constructions projetées ne virent jamais le jour (même si la presse fut utilisée plus tard par diverses personnes). Malgré son enthousiasme et sa détermination Alexandre n'est jamais devenu un vrai cultivateur, activité peu compatible avec la vie qu'il menait.

7. En fait assez modeste par manque d'ancienneté dans la fonction publique car c'était un professeur presque "débutant".

8. Grothendieck a toujours pris les tâches qui lui étaient confiées ou qu'il s'était fixées avec le plus grand sérieux.

faire ses cours (au moins jusqu'en 81). Les premières années il avait visiblement souhaité enseigner à un niveau élémentaire (je suppose qu'on lui avait donné le choix...). Son cours de deuxième année<sup>9</sup> est passé assez rapidement au-dessus du niveau moyen de l'auditoire qui s'est réduit sensiblement au cours de l'année ; mais après les récriminations de l'amphi il a accepté de rédiger un polycopié dont il a conservé quelques exemplaires (consacrés aux fonctions analytiques). Si ses cours étaient finalement assez classiques, ses propositions de modalités d'examens et de notations étaient par contre beaucoup moins orthodoxes...

### Liste (très partielle) d'enseignements donnés par Grothendieck à Montpellier :

Année académique 73/74 : cours de deuxième année avec un programme d'analyse classique. En 74/75 répétition de ce cours rapidement interrompu par un accident de mobylette (!). En 74/75 (probablement) répétition de ce même cours. En 75/76 cours de maîtrise (4<sup>ème</sup> année) d'introduction à la topologie algébrique : essentiellement, le groupe fondamental et la classification des surfaces topologiques compactes, plus cours d'option de première année sur l'icosèdre.

En 76/77 cours de DEA sur le cube (en toutes dimensions) et l'icosèdre<sup>10</sup> (je l'ai suivi ainsi

que Christine Voisin) ainsi qu'un cours d'option de première année sur les polygones et le théorème de Jordan. En 77/78 et 78/79 cours de DEA + option.

J'ai le souvenir qu'une année il s'est retrouvé chargé d'un cours de préparation à l'agrégation...

## LE SÉMINAIRE

Il démarre en 77/78 sur un rythme hebdomadaire, assez confidentiel bien qu'ouvert à toute personne intéressée, en général dans son bureau du

Département de Mathématiques, devant un auditoire de un<sup>11</sup> à six ou sept auditeurs. Le plus souvent c'était lui l'orateur mais il pouvait aussi demander aux participants (thésards ou collègues) d'exposer.

Ses exposés, sous une apparente forme d'improvisation (pas de note la plupart du temps) étaient en fait parfaitement préparés et structurés. Les notions introduites étaient clairement motivées et les définitions données dans une généralité jamais gratuite, avec un grand soin de ne pas introduire de manière artificielle des choix arbitraires<sup>12</sup>.

Lorsque ce n'était pas lui qui exposait on le sentait souvent assez mal à l'aise, manifestant une certaine difficulté à rentrer dans le point de vue de l'orateur, l'interrompant fréquemment et n'hésitant pas à passer à son tour "à la planche" pour refaire les choses à sa manière.

C'était peut être une de ses faiblesses que de ne pas pouvoir se mettre tant soit peu "à la place des autres"; de n'accepter d'avancer dans un domaine des mathématiques qu'après l'avoir absorbé dans sa propre vision, dans son propre langage, avec l'assurance - rarement mise en défaut il est vrai - qu'il avait la bonne vision et le bon langage...

Le séminaire était suivi par un repas "sorti du sac" pris en commun à l'extérieur sur la pelouse si la météo le permettait et sinon dans la salle dite "de réunion". Chaque habitué du séminaire avait droit à une miche hebdomadaire de pain bio fournie par le maître....

Après le repas, le travail mathématique reprenait, éventuellement sur la pelouse : Grothendieck, pour un ou deux thésards autour de lui, se lançait par la voix et l'écriture très rapide sur des feuilles A4 pliées en deux, à des explications détaillées ou à l'exposition d'un programme de travail dans une suspension du temps comme si aucune fatigue ne pouvait l'arrêter ou même le ralentir, alors qu'elle affectait manifestement ses auditeurs.

9. Que je n'ai pas suivi (j'étais alors en 4<sup>ème</sup> année) mais dont j'ai eu la description par plusieurs de ses élèves et en particulier par Christine Voisin.

10. [traduction d'extraits d'une lettre d'A.G. à un ami allemand.]: "Les polyèdres (prend juste le cube ou même l'icosèdre) sont une source inépuisable de réflexions mathématiques à tous les "niveaux" .[...] Mais je me sens carrément stupide en suggérant qu'il s'agit de thèmes mathématiques "élémentaires" parce que leur amplitude semble si écrasante pour moi, comme si je me trouvais dans une prairie incommensurable et que quelqu'un me demandait si je voulais bien lui montrer un brin d'herbe."

11. Si la mémoire ne me fait pas défaut, j'ai été l'année académique 1980/81 son seul auditeur assidu...

12. Parmi les nombreux thèmes qui ont été abordés j'ai le souvenir par exemple d'une série d'exposés sur la théorie du degré topologique de Brouwer.



C'était assurément une grande chance de pouvoir suivre ce séminaire et nous en étions conscients. L'amicale familiarité dans nos rapports avec Grothendieck allait de pair avec une profonde admiration pour le mathématicien exceptionnel.

Le séminaire prit une tournure particulière en 80/81 : d'une part il avait été déserté par la plupart des fidèles habitués : Christine Voisin, sans revenu ni perspective visible de poste à Montpellier,<sup>13</sup> était partie pour l'année en Equateur, Yves Ladegedaille et Carlos Contou-Carrère étaient fâchés avec le maître (ou bien le contraire...), et quelques thésards avaient disparus corps et biens (voir les causes possibles dans le paragraphe suivant). D'autre part Grothendieck était dans une période d'intense activité mathématique<sup>14</sup> : il a rédigé (en particulier...) de janvier à juillet 81 le manuscrit de 1300 pages "La Longue Marche à travers la Théorie de Galois". Et cette année là, il avait choisi ce thème pour ses exposés. Je me suis donc retrouvé un peu seul face à un très brillant orateur avançant à "brin de zinc" (pour reprendre une de ses expressions...) et qui ne faisait plus guère d'effort pour se mettre au niveau de son modeste (à tous les sens du terme) auditoire.

## LE DIRECTEUR DE THÈSE

Grothendieck a été à Montpellier, comme sans aucun doute dans toute sa carrière, un directeur de thèse très consciencieux (et très directif...). Il était aussi très disponible et passait beaucoup de temps avec ses élèves thésards (ou même avant leur thèse pour un travail original de DEA). Il ne prêtait par ailleurs aucune attention au niveau mathématique des étudiants qui se présentaient à lui mais ce n'était pas sans conséquence. Il l'assumait complètement, tant il était convaincu qu'être créatif en mathématique (comme ailleurs) est surtout une question d'attitude ; il développe longuement ce thème dans Récoltes et Semaines<sup>15</sup> (noté par la suite RetS) :

**"La découverte est le privilège de l'enfant"**

(RetS, tome1, page 1)

L'aspect "technique" était finalement pour lui, sinon secondaire, du moins pas un véritable

obstacle pour celui qui était dans une bonne disposition mentale. De fait, malgré tous les efforts du maître et la bonne volonté de la plupart des thésards, les thèses commencées n'ont pas toutes abouti à une soutenance, et même dans ce cas, ce n'était pas toujours sous sa direction qu'elles se terminaient.

### Thèses "encadrées" par Grothendieck et soutenues entre 1975 et 1987.

(exceptées celles de **Huàng Xuân Sinh** et de **Pierre Dampousse** elles ont été soutenues à Montpellier). (Je détaillerai plus bas le pourquoi des guillemets).

**Huàng Xuân Sinh** : Gr catégories. 1975 Orsay (doctorat d'état).

**Amadou Diallo** : Sur les ouverts affines des schémas affines. 1975 (thèse de spécialité).

**Yves Ladegaille** : Découpe et isotopies en théorie des surfaces. 1977 (doctorat d'état).

**Jean Malgoire et Christine Voisin** : Factorisation de Stein topologiques, découpes. 1979 (thèses de 3<sup>ème</sup> cycle).

**Olivier Leroy** : Groupe fondamental et théorème de Van Kampen en théorie des topos. 1979 (thèse de 3<sup>ème</sup> cycle).

**Marcos Wanderley** : Théorie inductive de l'orientation. 1980 (thèse de 3<sup>ème</sup> cycle).

**Carlos Contou-Carrere** : Géométrie des groupes semi-simples, résolutions équivariantes et lieu singulier de leurs variétés de Schubert. 1983 (doctorat d'état).

**El Aouni Allal** : Etude d'une configuration remarquable d'un système de 9 pseudo-droites. 1984 (thèse de 3<sup>ème</sup> cycle).

**Pierre Dampousse** : Cartographie topologique 1981 (thèse de 3<sup>ème</sup> cycle soutenue à Orsay sous la direction de Norbert A Campo).

**Mohammed Mellak** : Système de pseudo-droites. 1987 (thèse de 3<sup>ème</sup> cycle).

**Philippe Delobel** : Combinatoire. 1987 (thèse de 3<sup>ème</sup> cycle).

13. Pas de recrutement en maths pures (25<sup>ème</sup> section...) depuis 1970 au Dépt. de Math.

14. Voir le texte "Esquisse d'un Programme".

15. Voir aussi l'introduction à un cours de maîtrise rédigée en 1984 : "en guise de programme".

Il faut préciser quelques points concernant ces différentes thèses :

Grothendieck n'apparaît comme "directeur de thèse" officiel que pour les thèses de Huang Xuân Sinh<sup>16</sup>, Mamadou Diallo, Yves Ladegaillerie, El Aouni Allal et dans celle de Carlos Contou-Carrère. Il a été aussi directeur effectif de ces thèses à l'exception peut être de la thèse de Carlos Contou-Carrère pour laquelle il a fait office de "directeur de secours" (voir le détail dans RetS).

En 1979, un procès "pour hébergement d'étranger en situation irrégulière"<sup>17</sup>, lui est intenté à Montpellier. Grothendieck décide alors de faire une sorte de "grève du zèle" en n'assurant plus officiellement le rôle de directeur de thèse<sup>18</sup>. En fait (sauf erreur) cette règle ne s'est appliquée que pour Christine Voisin et moi ; notre patron, d'officiel est devenu officieux bien que présent à nos soutenance.

Par la suite, il a accepté à nouveau d'être directeur de thèse (officiel) en 1983 pour la thèse d'état de Carlos Contou-Carrère et en 1984 pour celle de 3<sup>ème</sup> cycle d'El Aouni Allal.

Quant à Olivier Leroy, il a travaillé seul pendant deux ans sur un sujet proposé par Grothendieck en 1977, et son directeur officiel (et ami) était Carlos Contou-Carrère<sup>19</sup>.

Pour les autres thèses, Grothendieck avait proposé les sujets, encadré la recherche mais au bout d'un certain temps, il s'était soit fâché avec son thésard, soit s'était découragé devant la lenteur

dans l'avancement du travail. Le thésard par la suite avait abandonné ou était parti finir la thèse (souvent sur le même sujet) avec un autre patron.

### THÈMES DE RECHERCHE PROPOSÉS

A l'exception des thèses de Huang Xuân Sinh, (dont le sujet avait été proposé par Grothendieck en 1967, lors de son voyage au Nord Viêt-Nam), celles de Mamadou Diallo et de Contou-Carrère, (toutes les deux portant sur des questions de géométrie algébrique) et celle d'Olivier Leroy en théorie des topos, les autres traitent principalement de thèmes topologico-combinatoires tournant autour des surfaces topologiques.

C'était peut être une manière pour Grothendieck de tourner la page des mathématiques très sophistiquées et abstraites qui l'avaient occupé pendant deux décennies. C'était aussi une source de problèmes que l'on pouvait attaquer sans avoir à assimiler par exemple les considérables développements récents de la géométrie algébrique (qu'on lui devait en grande partie...). Il s'en explique d'ailleurs dans Esquisse d'un Programme (1984) :

"Les exigences d'un enseignement universitaire, s'adressant donc à des étudiants (y compris les étudiants dits "avancés" au bagage mathématique modeste (et souvent moins que modeste), m'ont amené à renouveler de façon draconienne les thèmes de réflexion à proposer à mes élèves, et de fil en aiguille et de plus en plus, à moi-même également."

16. Sujet donné sous les bombes en 1967 au Nord Viêt Nam. Gros travail solitaire (plus de 500 pages...) qui n'a pas été publié à ma connaissance (peut être en partie dans une revue de mathématique vietnamienne ?)

17. Ce procès a pour origine l'hébergement, quelques mois auparavant, d'un moine japonais par Grothendieck. Le visa de celui-ci avait expiré et il se trouvait donc en situation "irrégulière". Le procès qui suivit fut très médiatisé grâce à la vigoureuse réaction de Grothendieck reprenant pour l'occasion son costume de militant. Je me rappelle son intervention à Paris dans les couloirs de l'IHP à l'occasion du Séminaire Bourbaki de février 79, où je l'avais aidé à distribuer des tracts dénonçant la loi (qui avait été promulguée par le régime de Vichy) et pour laquelle il était poursuivi, ainsi que sa magnifique plaidoirie (il avait souhaité assurer lui même sa défense) lors du procès à Montpellier...Il fut très déçu de ne pas avoir été condamné à de la prison ferme car cela lui aurait permis de donner encore plus de retentissement à son action de dénonciation.

18. Il avait estimé en effet que la loi inique réprimant l'hébergement d'étrangers en situation irrégulière, prise à la lettre, lui imposait de vérifier la situation administrative des étudiants étrangers qui souhaitaient travailler avec lui...

19. Au moins deux pages de RetS sont consacrées à Olivier Leroy (décédé à 41 ans en 1996), reconnu très vite comme un esprit exceptionnel par Grothendieck, après seulement deux heures de conversation mathématique.

[R et S] "C'était un jeune gars de vingt ans peut-être, qui devait avoir tout juste une teinture de schémas, un peu de topologie et de topos, c'était trois fois rien, pour tout dire, et avec ça il arrivait à remplir quand-même tous les blancs et "sentir" sans effort ce que moi, vieux vétéran, lui racontait à toute allure en deux heures ou trois sur la base d'une familiarité de quinze ans avec le sujet. Je n'avais jamais rien rencontré de tel, ou tout au plus chez Deligne.[...]"

## UN NOUVEAU STYLE D'ÉCRITURE POUR DE NOUVEAUX TEXTES

A partir de la fin des années 70, Grothendieck s'est mis à écrire de longs textes mathématiques, (et envisageait même de les publier sous cette forme), en laissant complètement apparaître la démarche en cours, comme si la pensée s'inscrivait directement sur le papier avec la dimension temporelle du déroulement de cette pensée ; à l'opposé des canons (bourbachiques ?) de la rédaction des articles mathématiques où l'on efface toute trace des chemins suivis....

[Esquisse d'un programme] "[...] et je compte bien dans l'écriture des "Réflexions Mathématiques"<sup>20</sup> commencée depuis février 1983, laisser apparaître clairement au fil des pages la démarche de la pensée qui sonde et qui découvre, en tâtonnant dans la pénombre bien souvent, avec des trouées de lumière subites quand quelque tenace image fautive, ou simplement inadéquate, se trouve enfin débusquée et mise à jour, et que les choses qui semblaient de guingois se mettent en place, dans l'harmonie mutuelle qui leur est propre."

### Liste des principaux textes écrits à partir de 1980

**La Longue Marche à travers la Théorie de Galois.** Janvier-juin 1981 (1300 pages environ,) suivie de manuscrits autour de Teichmüller (plus de 500p).

**Pursuing Stacks.** 1983 (600p).

**Récoltes et Semilles.** Sous titré : Réflexions et témoignage sur un passé de mathématicien. (Incontournable...) 1985-86 (1500 pages environ).

Esquisse d'un programme. Juin 1984(50p)  
Texte écrit en vue de motiver sa demande de détachement au CNRS pour les 4 années qui le séparent de la retraite.

Ce texte très dense est, lui aussi, fondamental pour comprendre la vision qu'a eue Grothendieck sur les années passées à Montpellier. On y trouvera à la fois un bilan de son activité d'enseignement et

la description de ses projets de recherche pour les années à venir. Le bilan assez sombre qu'il tire sur ses rôles d'enseignant et de directeur de recherche contraste violemment avec l'enthousiasme manifesté dans la présentation d'un véritable feu d'artifice de thèmes de recherche qu'il se propose de développer.

Vers une géométrie des formes. Juin 1986 (600p),

Ce travail, réalisé en un un mois seulement<sup>21</sup>, et qui n'était pas annoncé dans Esquisse d'un

Programme, propose une nouvelle approche de la topologie...

La Clef des Songes. (1987)(400p) texte de nature philosophique et mystique.

Les Dérivateurs. 1991 (2300p), qui relève comme Pursuing Stacks (dont c'est une sorte de suite) du domaine de l'algèbre homotopique.

En plus de ces textes ont été écrites plus de 2700 pages sur des thèmes souvent liés à son enseignement ou aux travaux de thèses qu'il dirigeait.

### JUILLET 90 ou LE DÉMÉNAGEMENT

En juillet 90, Grothendieck, avec qui j'avais depuis mon retour de Madagascar en 86 des rapports cordiaux mais très épisodiques, m'appella pour me demander si j'accepterais de venir récupérer chez lui aux Aumettes<sup>22</sup> sa bibliothèque mathématique, car il projetait de déménager et souhaitait profiter de l'occasion pour s'alléger; il me recommanda surtout de venir avec un véhicule spacieux. Arrivé sur place le lendemain je trouvai Alexandre très exalté, heureux de se projeter dans une nouvelle vie, avec des propos pleins de références mystiques. Il me proposa, en plus de sa bibliothèque, d'emporter tous ses manuscrits mathématiques et m'aïda à remplir (jusqu'au toit!) le break prêté pour l'occasion par des amis. Il me montra aussi un bidon de 200 litres remplis de

20. Texte qui aura pour titre "Pursuing stacks".

21. [extrait d'une lettre à Christian Leger :] " [...]Ca fait une dizaine de jours que je travaille d'arrache pied pour mettre sur pied le langage de base pour "une géométrie des formes", dans la direction, j'imagine souhaitée ou pressentie ou entrevue par Soury. Ca m'a empoigné à tel point, qu'il me faut me forcer à manger et à dormir, voire même à écrire des lettres, comme celle-ci." Pierre Soury était un mathématicien proche de Jacques Lacan le célèbre Psychanalyste.

22. Mazet au milieu des vignes au pied du Mont Ventoux où il habitait depuis dix ans environ.

endre<sup>23</sup> où il avait, me dit-il, brûlé de nombreux papiers personnels mais, il ajouta, avoir mis de côté tout ce qui était mathématique en prévision de ma venue. Il montrait, dans son élan mystique<sup>24</sup>, un parfait détachement pour ces documents et il me l'a précisé en me recommandant, je le cite :

“Si tu souhaites un jour t'en débarrasser ne les abandonne pas au bord d'une route mais amène les dans un centre de récupération de papier...”

Il passera en fait encore une année aux Aumettes, année consacrée (en partie tout au moins) à la rédaction de la théorie des dérivateurs. Dans une lettre datée du 19 mai 91 il me parle de son travail.... “[...] qui avance bon train. Il est vrai que je prévois que d'ici quelques semaines ou quelques mois, il s'arrêtera net, et cette fois définitivement pour cette vie-ci du moins. Alors que je suis loin encore d'avoir “bouclé” mon programme, avec mes 1500 à 2000 pages de notes manuscrites...”

## AOÛT 91 ou LE DÉPART POUR LA SOLITUDE

Au mois d'août 91 il quitte définitivement sa maison des Aumettes pour l'Ariège sans laisser d'adresse après m'avoir écrit le 24 juillet me demandant (en particulier) d'informer le secrétariat du laboratoire à l'université de ne plus lui faire suivre son courrier.

Dans l'été (juillet ?) 95, comme j'avais l'intention de diffuser le contenu transcrit de “La Longue Marche à travers la Théorie de Galois”<sup>25</sup>, je décidai de partir à sa recherche en vue de lui demander un accord pour la diffusion de ce texte et par la même occasion de faire le point sur l'ensemble des documents confiés en juillet 90. Ma quête

aboutit rapidement : lorsque je l'eus localisé et frappé à sa porte, il fut assez surpris de me voir et m'accueillit avec la phrase :

“Normalement je ne reçois personne, mais comme tu es là...” et m'a invité à entrer et offert du thé avec beaucoup de gentillesse. Je lui ai fait part de mon souhait de diffusion avec son accord de la “Longue Marche”; il a alors rédigé un pouvoir qui allait beaucoup plus loin que ma demande car il s'appliquait à tous les manuscrits donnés en 90, avec l'argument :

“Tu n'auras pas à te (ou me?) déranger chaque fois que tu souhaiteras diffuser un texte.”

Il m'a aussi donné d'autres documents “oubliés en 90” ainsi que le manuscrit de “la théorie des dérivateurs”<sup>26</sup>. Comme je lui demandais quelles étaient ses préoccupations actuelles, il m'a montré un assez gros paquet de feuilles A4 (200 pages environ) posées sur sa table de travail et affirmé que c'était le sommaire (!) de sa recherche actuelle sans rentrer plus dans les détails du contenu de cette recherche<sup>27</sup>.

Il était souriant, calme et serein, et se disait épanoui dans cette forme d'isolement<sup>28</sup>. Il m'a montré ses rosiers, fait visiter ses réserves, expliquer comment il conservait le pain plusieurs semaines dans un coffre, s'est presque excusé d'avoir adopté l'usage d'un réfrigérateur (vu son point de vue antérieur sur ce type d'objet...) et il m'a offert un pot de compote de sa fabrication! Il m'a raccompagné sur la route dans une magnifique lumière de fin d'après midi d'été avec en toile de fond une vue panoramique sur les Pyrénées ariégeoises. J'étais bien sûr très ému de l'avoir retrouvé<sup>29</sup> et d'avoir partagé avec lui ce moment amical.

23. En fait, comme me l'a fait remarquer récemment sa fille Johanna, ce bidon était utilisé par Alexandre pour recueillir les cendres et donc ne contenait probablement pas que les cendres des papiers brûlés la veille ou le matin même.

24. J'ai quelques scrupules à parler de délire mystique.

25. Texte écrit dans les années 80-81 et dont je détenais une copie depuis la même époque.

26. Ces 2300 pages environ ont été depuis déchiffrées et tapées par Matthias Künzer, mathématicien allemand (travail considérable), puis éditées par Georges Malsiniotis (avec mon aide) et accessible à la communauté mathématique depuis quelques années sur le site de Georges Malsiniotis à l'université de Paris 7.

27. Je crois me souvenir qu'il m'ait confié que l'objet de cette recherche n'était pas directement mathématique.

28. Isolement qui n'était pas encore aussi radical que ce qu'il allait devenir car il allait encore au marché de St Girons chaque semaine, rencontrait producteurs locaux ou boulanger écolo...

29. Comme quelques autres personnes : par exemple Leila Schneps et Pierre Lochak qui l'ont retrouvé peu de temps après moi...

C'était ma dernière rencontre avec lui. Par la suite, il m'a sollicité plusieurs fois<sup>30</sup> par courrier et même exceptionnellement par téléphone pour lui faire parvenir divers documents (par exemple des articles de physiques ou une encyclopédie d'astronomie) ou pour trouver quelqu'un qui pourrait faire des calculs numériques assez fins, ou des déterminations de primalité de nombres...). En 1999 il m'envoya de nouvelles questions qui mises ensembles, pouvait clairement se résumer en celle ci : "les étoiles proches du soleil n'auraient-elles pas la bonne idée de se situer sur les sommets d'un icosaèdre centré sur le soleil..."

Il se fâcha avec moi à cette occasion car les réponses à sa missive n'avaient pas été apportées assez rapidement à son goût...

En guise de conclusion <sup>31 32 33</sup> :

***"Je vous le dis : il faut encore porter en soi un chaos, pour pouvoir mettre au monde une étoile dansante"***

(Friedrich Nietzsche, Ainsi parlait Zarathoustra)

30. En particulier en 1997 pour des calculs numériques (qui ont été réalisés à ma demande par Patrick Redont) sur une fonction liée au problème du corps noir en physique, calculs qui l'avaient semble-t-il satisfait mais qui ne mettaient pas un point final à ses interrogations.

31. Empruntée à la biographie de Grothendieck écrite par Allyn Jackson : "Comme Appelé du Néant" en deux parties aux Notices de l'AMS (vol 51).

32. A citer une biographie, il faut citer aussi celle, (très documentée, passionnante et incontournable), écrite par Winfrid Sharlau (3 tomes) et Leila Schneps (1 tome à venir).

33. Incontournable lui aussi le site "Grothendieckcircle" créé et administré par Leila Schneps.

## Rencontres et correspondance avec Grothendieck

Pr. Leila SCHNEPS

Directrice de Recherche CNRS à l'Université Paris 6



Les écrits non mathématiques d'Alexandre Grothendieck comptent plusieurs milliers de pages et n'ont jamais été publiés, soit parce que les éditeurs potentiels les trouvaient trop longs ou trop lourds, voire trop honnêtes, soit, à partir des années 90, parce que

lui-même ne le souhaitait plus. Et aussi parce que pour certains, il s'agit de textes jamais destinés à la publication, tels par exemple des lettres ou des pages de journal-fleuve.

A part leur étonnante beauté – et j'espère illustrer à partir de plusieurs extraits combien son style très personnel emporte le lecteur et fait preuve d'une puissance de communication intime et intense, nourrie comme il est par des images universelles tirées de la nature et du corps humain – je voudrais aussi montrer l'analogie, voire l'identité frappante entre la vie de cet homme, qu'il a vécue et conçue comme une création comme toute vie a la possibilité de l'être, et ses plus fameuses mathématiques.

La créativité était un sujet de prédilection pour Grothendieck; la condition nécessaire à l'acte créatif était, pour lui, la simple curiosité qui nous pousse à nous poser des questions et chercher leurs réponses. Il y a consacré de nombreuses pages, mais certains de ses autres textes sont encore plus révélateurs de son attitude créative envers la vie elle-même: son refus presque violent de "laisser faire" ou "se laisser faire", sa détermination à combattre de toutes ses forces la passivité et l'obéissance aveugle à des rituels pré-établis, son désir de réveiller en lui-même et en les autres la curiosité endormie, et avant tout son admiration pour la simplicité absolue, la vérité rayonnante non encombrée de la moindre idée préconçue.

### En guise de programme

Je reproduis ici un court extrait d'un texte de 1978, long de deux pages, qui a été distribué par Grothendieck à ses étudiants à l'université de Montpellier lors du début d'un de ses cours de licence. Il avait déjà effectué quelques années d'enseignement au moment où il a écrit ce texte, et on sent qu'il commence à désespérer d'éveiller l'intérêt des élèves par un cours de maths standard, aussi bien structuré soit-il. Le texte "En Guise de Programme", offert aux élèves à la place de la description du cours habituel, sonne comme une ultime tentative de les sortir de l'état de léthargie et de passivité dans lequel il les voyait plongés.

Quand une curiosité intense anime une recherche, nous avançons comme portés par des ailes impatientes. Ne sommes-nous alors comme le téméraire esquif aux voiles tendues qui avidement laboure l'inépuisable océan? Oui, de toutes parts sommes-nous entourés de brumes mouvantes, sans cesse prenant corps et s'éclairant sous les yeux qui les fouillent, sans cesse se dérochant pour mieux nous provoquer à les pénétrer! Et nous exultons en le mystère de toute nouvelle énigme entrevue, par notre regard pressant dépouillée de ses voiles de brume, pour être connue féconde en mystères nouveaux...

L'ardente curiosité seule est créatrice, elle nous porte droit au cœur même de l'Inconnu. N'est-ce pas Elle notre seul et véritable héritage, déposé en chacun de nous dès avant que nous fussions enfantés? Graine imperceptible, dont pourtant naît la Fleur aux mille pétales comme l'Arbre à la ramure innombrable... Il n'y a rien qui ne naisse d'Elle. Et pour peu que nous la laissions s'épanouir en nous, il n'y a rien qui ne puisse enfanter notre seule Soif de connaître. Elle seule nous donne des ailes, Elle seule anime l'élan qui nous porte au cœur des choses. [...]

Que ferons-nous en cette nouvelle année, hélas académique qui commence, pour répondre aux desiderata d'un cours officiel, sans pour autant nous borner à reproduire le scénario immuable du maître d'école pérorant devant ses écoliers? Tout enseignement est castrateur, tout discours vain, qui ne s'adresse à des êtres dont la curiosité déjà ne soit en éveil. Quand la curiosité est absente, et effacé peut-être jusqu'au souvenir des temps reculés où elle était encore vivante en nous – que faire alors pour lui redonner vie?

L'histoire n'a pas retenu les réactions des élèves, mais elle a enregistré le fait que cinq ans plus tard Grothendieck a quitté l'enseignement supérieur avec la remarque suivante: "Depuis l'an dernier, je sens qu'au cours de mon activité d'enseignant universitaire, j'ai appris tout ce que j'avais à en apprendre et enseigné tout ce que je peux y enseigner, et qu'elle a cessé d'être vraiment utile, à moi-même comme aux autres. M'obstiner sous ces conditions à la poursuivre encore me paraîtrait un gaspillage, tant de ressources humaines que de deniers publics..." [Esquisse d'un Programme, p. 50].

### Récoltes et Semailles

Ce qu'à écrit Grothendieck au sujet des mathématiques (sans compter bien entendu, ses livres et articles de recherche) se trouve surtout dans son œuvre monumentale Récoltes et Semailles, texte de quelque deux mille pages écrit de 1983 à 1985. Il y décrit longuement les différents types de mathématiques (les aspects métriques ou analytiques, géométriques et arithmétiques) et parle aussi à plusieurs endroits de ses propres travaux, dont il tente de décrire la nature, la portée et la saveur sans entrer dans les détails techniques. Mais les lignes les plus expressives qu'il ait écrites sur ce sujet qui a occupé quinze ans de sa vie à l'exclusion de tout le reste sont peut-être celles où il tente de saisir l'acte mathématique lui-même, essentiel et commun à tous les mathématiciens.

Parmi les mille-et-un visages que choisit la forme pour se révéler à nous, celui qui m'a fasciné plus que tout autre et continue à me fasciner, c'est la structure cachée dans les choses mathématiques. La structure d'une chose n'est nullement une chose que nous puissions "inventer". Nous pouvons seulement la mettre à jour patiemment, humblement en faire connaissance, la "découvrir".

S'il y a inventivité dans ce travail, et s'il nous arrive de faire œuvre de forgeron ou d'infatigable bâtisseur, ce n'est nullement pour "façonner", ou pour "bâtir", des "structures". Celles-ci ne nous ont nullement attendus pour être, et pour être exactement ce qu'elles sont! Mais c'est pour exprimer, le plus fidèlement que nous le pouvons, ces choses que nous sommes en train de découvrir et de sonder, et cette structure réticente à se livrer, que nous essayons à tâtons, et par un langage encore balbutiant peut-être, à cerner. Ainsi sommes-nous amenés à constamment "inventer" le langage apte à exprimer de plus en plus finement la structure intime de la chose mathématique, et à "construire" à l'aide de ce langage, au fur et à mesure et de toutes pièces, les "théories" qui sont censées rendre compte de ce qui a été appréhendé et vu. Il y a là un mouvement de va-et-vient continu, ininterrompu, entre l'appréhension des choses, et l'expression de ce qui est appréhendé, par un langage qui s'affine et se re-crée au fil du travail, sous la constante pression du besoin immédiat.

L'utilisation d'un vocabulaire qui lui est propre et qui est non seulement précis, mais imagé et extrêmement évocateur, constitue une constante de toute l'œuvre de Grothendieck, que ce soit dans ses mathématiques, dans son travail écologique ou dans ses écrits autobiographiques et mystiques. Jean-Pierre Serre dira de Grothendieck que son véritable apport aux mathématiques était de nommer les objets; cela peut paraître superficiellement dérisoire, mais en réalité, comme le dit Grothendieck dans cet extrait, l'acte de nommer fait partie de l'acte essentiel créatif en mathématiques, qui est fondamentalement un acte de découverte, tout comme le choix de nom pour chaque créature au jardin d'Eden confère à Adam une part de cette même créativité, celle qui est liée à l'exploration et à la découverte du monde.

### La Clef des Songes

En 1987, peu après avoir terminé Récoltes et Semailles, Grothendieck a entrepris un nouveau livre. Celui-ci, sans aucun rapport avec les mathématiques, était censé à l'origine rendre compte de ce qu'il considérait comme l'une des grandes découvertes de sa vie: le fait que Dieu communique avec nous par le moyen de nos rêves, et qu'il suffit de les écouter et de les analyser

avec la plus grande honnêteté pour recevoir et comprendre le message.

Ce livre, intitulé *La Clef des Songes*, n'a jamais été terminé. Nous avons sept chapitres sur les douze mentionnés dans la table des matières; sept chapitres qui forment un total de 351 pages. Mais Grothendieck a dévié de son intention originale en écrivant le texte. Il parle finalement très peu de rêves, se concentrant plutôt sur la vision des hommes qu'il a développée pendant sa décennie de méditation (1976-1986), une vision basée sur l'idée que l'Ego, qu'il appelle l'Image de soi-même, forme un écran mental presque opaque qui nous empêche de nous réaliser pleinement en réfrénant notre curiosité enfantine et donc notre créativité.

Pour accéder à notre créativité enfouie, il faut redevenir simple, comme les enfants sont simples, et pour cela, il faut se libérer de notre adoration de l'Image et notre besoin de la préserver à tout prix contre tout ce qui pourrait la menacer: le ratage, la confusion, le ridicule, l'inconnu. Pour la plupart des gens cela nécessite un travail difficile et long, mais essentiel, travail que Grothendieck ne se lassait jamais de recommander à tout un chacun.

Sa compréhension du rôle de l'Image dans la stagnation spirituelle des hommes venait de son observation des gens qui l'entouraient, lui le premier. Dans des pages émouvantes il raconte comment il a pris conscience de sa propre cécité, petit à petit, lors de l'écroulement du couple qu'il formait avec une jeune américaine, la mère de son dernier enfant.

Je crois pouvoir dire que pour pouvoir réellement voir la "dévastation intérieure" en moi-même, telle qu'elle était vraiment, alors que je venais déjà de voir clairement celle de ma vie – pour cela la soif de vérité qui était en moi en ces jours et qui est la chose essentielle pour connaître la vérité, à elle seule pourtant ne suffisait pas. Vu l'état de la psyché, avec la structure fortement charpentée du moi et celle de la sacrosainte Image, et vus les mécanismes de résistance d'une force immense et longuement rodés, mobilisés pour la protéger – pour "déboulonner" l'Image (et à moins d'un miracle peut-être, qui n'eût pas lieu) il fallait de plus un travail. Faute de le savoir, et faute de plus d'une motion intérieure qui m'aurait poussé au

travail en dépit de mon ignorance (comme ce fut le cas en octobre 1976, deux ans et demi plus tard), l'Image devait rester indemne. Ou pour le dire autrement: la vieille, très vieille "plaisanterie" devait continuer."

Grothendieck a mis des années de travail pour voir clair dans ce qu'il appelle "la vieille plaisanterie". Et même quand il avait le sentiment d'avoir compris de quoi il s'agissait, il se rendait bien compte que les forces de l'Ego continuait à travailler en lui; voir clair nécessitait, à chaque fois de nouveau, un travail serré pour briser l'écran égotique. Il avait une très grande admiration pour les personnes qui l'avait précédé sur ce chemin, soit en vertu d'une simplicité naturelle (il parle longuement d'un tel homme, dénommé Rudy, qu'il a connu dans son enfance), soit par un véritable travail sur soi similaire à ce qu'il effectuait pour lui-même. Il appelle ces personnes des "mutants", et pendant la rédaction de *La Clef des Songes* en a dressé une liste partielle avec des commentaires fournis. Ainsi les Notes à *La Clef des Songes* totalisent 700 pages, le double de la longueur du livre lui-même.

Parmi les mutants il cite par exemple Gandhi, Walt Whitman, Krishnamurti, Freud, Rudolf Steiner, Fujii Guruji et A.S. Neill, fondateur de l'école libre de Summerhill. Il s'agit de personnes qui ont pu dépasser l'influence néfaste des règles sociales qui contraignent l'individu à construire une Image artificielle, pour introduire sur la terre au moins une poche de vie entièrement dénuée de toute hiérarchie, domination, oppression ou répression, fût-elle religieuse, sociale ou financière. Grothendieck lui-même avait tenté à deux reprises de vivre en communauté, mais il avait fini par renoncer car sa pulsion d'exploration et de méditation nécessitait de très longues heures de solitude et un espace privé. Mais cela ne diminuait en rien son admiration pour ceux qui y ont réellement réussi.

### Le Problème du Mal

A partir de 1991 et pendant toute la dernière partie de sa vie, passée dans une réclusion voulue et une solitude quasi totale mis à part une certaine correspondance, Grothendieck n'a plus écrit que pour lui-même, et ne s'est plus occupé que d'un seul et unique sujet, qu'il baptisait "le problème du Mal".



Il tournait autour du pourquoi de cette plaisanterie diabolique constatée des années auparavant: la domination de l'Image qui aveugle les adultes à toutes les beautés et les mystères de leurs propres vies et de la Terre entière. Plus que la violence, la torture, la cruauté, la faim, la mort, ce qui l'horrifiait était notre capacité à vivre à côté de tout cela sans réagir, en se concentrant, encore et toujours, sur notre bien-être, en particulier celui assuré par une bonne conscience tranquille, une Image satisfaisante.

Être dans cet état aveugle, pour Grothendieck, signifiait être possédé ou dominé par le Mal, ou par le Diable.

Après des années d'efforts pour s'affranchir de cet écran égotique qui pourtant nous sert aussi de protection, en nous empêchant de nous dissoudre dans la souffrance d'autrui, Grothendieck ne supportait plus de vivre dans le monde. Même la solitude ne lui apportait aucun soulagement. Du fond de sa réclusion, il se tourmentait jour et nuit, écrivant des dizaines de lettres et des milliers de pages. Il était persuadé, et c'est compréhensible, que le jour viendrait où la domination du Mal prendrait fin, et où tout le monde verrait les mêmes vérités qu'il voyait, lui, avec la même évidence éclatante. Plus personne ne pourrait vivre entouré de misère sans le voir; chacun comprendrait combien cela est, tout simplement, impossible. Même si cette vision prophétique, qu'il a exprimée des dizaines de fois, n'est pas crue ou partagée par tous, il est certain qu'elle représentait la seule et unique manière pour Grothendieck de conserver de l'espoir pour le futur de l'humanité.

Je termine ce récit par un court extrait d'une lettre que Grothendieck m'a adressée en 1995, une belle lettre qui respire sa conviction que la souffrance a quand même un sens, et qu'un jour notre monde de misère changera et deviendra le lieu merveilleux que méritent les tout petits enfants, les animaux et les plantes qu'il aimait tant. Il répondait à une lettre de moi où je lui parlais (à sa demande) de ma mère, qui a consacré sa vie à l'étude des pires horreurs de l'Holocauste, explorant inlassablement écrits, récits et manuscrits insoutenables sans que jamais se révèle une limite au mal dont les humains sont capables. C'était bien sûr un sujet infiniment proche de Grothendieck qui a perdu son père dans les camps de concentration, et ma lettre a suscité cette réponse où l'amertume semble balayée par une espérance quasi messianique.

Votre lettre, que je viens de lire à l'instant, a été pour moi une grande joie. Surtout ce que vous dites de votre souffrance, et de celle de votre mère. J'aurais pleuré profondément, si je ne me rappelais où nous sommes, sachant bien d'expérience sûre, que même ces larmes-là sont manipulées, qu'il me faut attendre la fin de tout cela, pour pouvoir pleurer librement, profondément, cette marée de larmes qui attendent d'être enfin, enfin pleurées. Il n'y a pas un seul être à visage humain sur terre, alors, qui ne pleurera de telles larmes en abondance, dont à présent il ne soupçonne pas même l'existence. Votre mère aussi. Si elle sentait ces larmes en elle, les larmes profondes, elle ne désespérerait pas de l'existence, elle saurait que le non-sens grimaçant, hideux du monde des hommes recèle un sens, un sens très difficile et très beau, même si ce sens lui échappe à présent...

## Un bref aperçu des Mathématiques de Grothendieck

Pr. Pierre LOCHAK

Chargé de Recherche CNRS à l'Université Paris 6



Les mathématiques ont occupé Alexandre Grothendieck à temps plein durant 25 ans, de 1945 à 1970, dont grosso modo 5 années d'apprentissage et 20 années de publications (1950-1970). S'y ajoutent plusieurs manuscrits

importants et influents, produits durant environ une décennie (1981-1991). Les vingt années de travail mathématique productif, universitaire, à temps plein, représentent moins d'un quart de la longue vie d'Alexandre Grothendieck, mais durant ce laps de temps on peut dire que les mathématiques l'ont entièrement absorbé, tout comme d'autres activités à d'autres périodes de sa vie: il s'est toujours donné corps et âme, l'expression n'est ici pas vaine, à ce qu'il entreprenait.

Deux singularités toutefois des mathématiques: la première qu'il a peine à reconnaître ou du moins à énoncer, évidente mais qu'il n'en faut pas moins souligner une fois: il s'y est montré génial, et ce de plus d'une manière qui est elle-même pratiquement inédite et dont il n'est pas sûr qu'elle se reproduise avant longtemps; au demeurant l'inédit par définition ne se reproduit pas. Sans cela, et malgré tout ce qu'il a pu faire, montrer, et dire par ailleurs dans une vie si pleine, il y a fort à parier que nous ne nous serions pas réunis pour évoquer sa personne et ses écrits. Deuxième singularité sur laquelle cette fois il insiste lui-même: ce plein investissement dans les mathématiques a été cause de ce qu'il nomme sans ambages une "stagnation spirituelle", tout au long de cette même période d'un quart de siècle; ce n'est toutefois pas mon sujet que d'approfondir ici ce triste sentiment ou cette constatation.

Donner en quelques minutes ou pages des indications sur l'itinéraire mathématique d'Alexandre Grothendieck, sa spécificité, ses apports énormes et apparemment divers, constitue à l'évidence une impossible gageure, sachant qu'il s'agit, on le sait, des mathématiques les plus "sophistiquées" et les plus "abstraites" qui aient jamais été produites. Mais précisément il convient de placer ces deux adjectifs – sophistiqué et abstrait – entre guillemets et j'aimerais tâcher de donner à apercevoir en quoi d'une part cet itinéraire mathématique, malgré ou avec toute sa singularité, s'inscrit tout de même dans le fil d'une histoire (ce qui ne retranche évidemment rien à son originalité mais permet de mieux l'appréhender), d'autre part comment ces mathématiques ne sont pas détachées des objets mathématiques, que même elles renouvellent souvent le point de vue sur des objets classiques, et que donc elles ne sont pas au fond "abstraites". D'ailleurs "abstrait" est un qualificatif passablement péjoratif, par exemple en philosophie; ainsi Schelling, qui s'y connaissait, pouvait critiquer son ancien ami Hegel en traitant sa philosophie d'abstraite – et vice versa. Quant à "sophistiqué", c'est là au fond une question d'habitude ou d'accoutumance.

Pour s'introduire aux mathématiques de Grothendieck, rien ne vaut mieux que d'écouter ce que lui-même en dit ou plutôt en écrit, en particulier dans Récoltes et Semailles et plus spécifiquement encore dans ce beau texte qui se donne explicitement comme une Promenade à travers une œuvre, la sienne bien évidemment. Rien n'est simple avec Grothendieck, jusques et y compris les tables des matières, mais on trouvera ces 65 pages admirables dans la sorte d'introduction ou plutôt de Prélude en quatre mouvements à Récoltes et Semailles. On ne saurait trop en recommander la lecture: elles constituent sans doute la meilleure des portes d'entrée vers

les mathématiques grothendieckiennes. On y consultera entre autres une liste (p.21) établie donc par Grothendieck lui-même, de ce qu'il considère comme les douze thèmes majeurs de son œuvre. Cette liste devenue son tour presque célèbre a beaucoup fait rêver ou frémir des mathématiciens émerveillés et parfois un peu écrasés par son ampleur. Mais ici je ne voudrais pas me contenter de commenter ou résumer ce qui se présente déjà comme une sorte de guide ou de commentaire. Disons plutôt qu'il s'agit de construire, ou plus modestement de "bricoler" une sorte de caisse de résonance qui puisse amplifier à l'adresse d'une oreille intérieure non prévenue le discours que Grothendieck tient lui-même à propos de son œuvre.

Il m'a semblé qu'une manière de s'y prendre consistait à mettre en place des oppositions pertinentes. On commencera donc par nommer des couples très généraux qu'il conviendra de préciser un peu plus techniquement par la suite. En voici quatre: objets vs relations, continu vs discret, linéaire vs non linéaire, géométrie algébrique vs topologie algébrique. Précisons tout de suite qu'en un sens il s'agit moins d'oppositions que de polarités, et que celles-ci ont précisément tendance ou vocation à s'émousser, voire à s'effacer tandis que monte la marée du concept. Elles n'en restent pas moins significatives et peut-être éclairantes. La suite de ce texte va essentiellement se donner pour tâche de les préciser et les commenter brièvement tout en les tressant, sachant qu'elles ne sont nullement indépendantes les unes des autres.

La premier couple, objets/relation, est en un sens le plus évident, celui sur lequel on a énormément glosé sans que cette expression soit en rien de péjorative. Il convient sans doute de commencer par là, à condition de ne pas s'obnubiler sur cette unique polarité comme c'est parfois le cas. On dit souvent que Grothendieck est celui qui a fait passer les mathématiques, une partie de celles-ci du moins, de la théorie des ensembles à la théorie des catégories. Ce n'est évidemment pas faux. Grothendieck a très certainement amorcé une véritable mutation, qui illustre aussi l'incroyable

pouvoir d'adaptation du cerveau humain: ce qui était à peine reçu par une poignée d'initiés il y a un demi-siècle est maintenant enseigné et plus ou moins assimilé par des centaines de personnes de par le monde, et cette mutation a été poursuivie et approfondie, pas forcément au goût du précurseur mais c'est là une autre question, celle de l'"enterrement", alias le génie vs la ruse de la raison. Il est sûr du moins que la tension objet/relation s'est historiquement transcrite dans la polarité théorie des ensembles vs théorie des catégories, et que basculer vers la seconde a consisté d'abord à mettre l'accent sur la relation (voir très brièvement ci-dessous). Bourbaki s'était appuyé sur la théorie des ensembles pour mettre en place une sorte de carte des mathématiques, ou plutôt de nombreuses cartes qui avaient vocation à découper le réel mathématique (de l'existence duquel personne ne doute sérieusement dans le quotidien de la pratique), suivant différentes relations d'équivalence. Structurer un vaste paysage d'objets suivant les strates de diverses relations d'équivalence, le tout sous l'égide de la théorie (presque naïve) des ensembles, voilà comme un résumé beaucoup trop général mais peut-être point trop inattentif de la grande entreprise Bourbaki, une description qui au demeurant suggère, presque au détour de la plume, un certain caractère statique. Or dès l'immédiat après-guerre, certains membres de Bourbaki sentirent le besoin de réécrire le fameux traité suivant une théorie des catégories née durant la guerre et à la naissance de laquelle 'Samy' Eilenberg, devenu entretemps membre de Bourbaki, avait largement contribué. Et pourtant l'idée fut abandonnée, peut-être simplement devant la perspective de tout devoir refonder (et réécrire) à neuf. Ajoutons que cette décision collégiale et qui n'alla pas de soi ne fut sans doute pas étrangère au divorce de Grothendieck d'avec Bourbaki, dont il continuera bien entendu à fréquenter de nombreux membres. D'une classification des objets ils s'agissait de passer à une dynamique des relations, étant entendu que de telles formules un peu faciles et souvent colportées à plaisir (ou ad nauseam) sous une forme ou une autre, sont toujours un peu courtes autant qu'injustes.

Quoi qu'il en soit, il vaut la peine d'illustrer très - beaucoup trop - rapidement, en quoi cet accent mis sur la relation permet de 'comprendre' le passage des topologies 'classiques' aux topologies dites 'de Grothendieck', qui constituent sans doute l'un des apports et des legs les plus caractéristiques de ce dernier, sachant que ces topologies sont elles-mêmes indissociables des notions de site et de topos. Tout ceci constitue aujourd'hui une trousse de ce qu'il appelle des outils "passe-partout", du moins dans une certaine aire mathématique. Les références abondent et je me contenterai donc de quelques lignes allusives mais en principe facilement compréhensibles, éventuellement après une petite recherche (y compris en ligne). Si donc  $X$  est un espace (un mot qui en soi ne veut pas dire grand-chose), le munir d'une topologie revient classiquement à se donner un ensemble de sous-espaces dits 'ouverts', vérifiant certaines propriétés ensemblistes très simples qui en font précisément une 'tribu'. Autrement dit on se donne une collection de sous-ensembles  $U$  ( $U \subset X$ ) qui sont déclarés ouverts par définition et qui entre autres recouvrent  $X$  tout entier (i.e. dont l'union coïncide avec  $X$ ). C'est dans ce genre de circonstances que le génie si particulier de Grothendieck fait merveille. Qu'ajouter à cela qui est déjà si 'simple', consistant en quelques axiomes, ceux de la topologie générale, eux-mêmes produits d'une assez longue décantation? allait de soi, et ce pour le 'redynamiser'. Et d'abord dans la notation: écrivons  $U \leftrightarrow X$  plutôt que  $U \subset X$ . Rien n'a changé et pourtant cette flèche insiste sur le fait que l'inclusion est bien une relation (et d'ailleurs une relation d'ordre). Mais alors... et c'est exactement à cet endroit, en caricaturant un peu, que se situe le 'génie', mais alors pourquoi ne pas utiliser d'autres relations pour définir de nouvelles 'topologies'? On substitue donc cette fois  $U \rightarrow X$  à  $U \leftrightarrow X$  et... le tour est joué, ou presque. Les 'ouverts' ont cessé d'être des parties de  $X$  pour devenir des points de vue partiels sur ce même objet  $X$ .

À partir de là on peut - on doit - écrire des milliers, voire aujourd'hui des millions de pages qui explorent quantité de nouvelles possibilités nées de ce que l'on peut nommer un abandon

de la méréologie. Il resterait d'ailleurs à tourner les symboles d'un quart de tour, écrivant plutôt  $U$  au-dessus de  $X$  pour retrouver, avec cette polarité horizontal vs vertical, d'autres oppositions plus techniques, comme unions ou limites injectives (alias colimites) vs limites projectives (alias limites), sans parler de ce grand slogan grothendickien qui dit que 'tout est relatif'. Mais je laisserai au lecteur curieux le plaisir de s'enfoncer plus avant dans ce monde pratiquement infini.

Un auteur sérieux et autorisé a pu écrire (en anglais) que, pour résumer, Grothendieck et ses élèves avaient "résolu certaines grandes questions de la géométrie algébrique à l'aide d'outils catégoriques". Ce n'est évidemment pas faux mais c'est aussi insuffisant, voire trompeur. Certes Grothendieck a été inspiré par les conjectures de Weil et il en a résolu une partie en les plaçant dans un contexte plus large, que donc elles ont suscité et dans lequel les catégories (abéliennes) jouent un rôle-clé. Mais il semble plus fidèle à son génie d'écrire qu'en un sens il posait sur une partie du monde un 'regard catégorique'. Ce regard lui était si naturel qu'il ne le mentionne guère explicitement dans ses textes. On ajoutera cependant que l'écriture de la Poursuite des Champs a naturellement poursuivi ce programme et qu'elle s'inscrit en un sens dans le grand mouvement qui aujourd'hui continue sous la forme d'une floraison de recherches sur les catégories supérieures, dans lesquelles on peut bien dire que les objets ont disparu, ou du moins peuvent être considérés comme des '0-relations'. Il n'empêche que l'objet de la Promenade reste en un sens classique et ressortit à la théorie de l'homotopie, donc d'abord à la topologie algébrique.

En ouvrant la Promenade, on rencontre, plus immédiatement que les catégories, le couple continu/discret et "l'outil cohomologique". Ce dernier est proprement linéaire et la polarité homologie/homotopie s'inscrit dans celle, plus large et déjà mentionnée, du linéaire vs non linéaire. Je serai un peu paradoxalement très succinct sur le thème discret vs continu, précisément parce qu'il se trouve explicitement au cœur de la Promenade, donc aussi de l'œuvre de Grothendieck vu par

lui-même. Je me permettrai d'ailleurs de signaler le livre *Mathématiques et finitude*, que j'ai moi-même publié (éds. Kimé, 2015) et dans lequel cette polarité joue également un rôle central, non sans lien avec Grothendieck. Disons simplement l'évidence que, partant des conjectures de Weil que je ne rappellerai pas mais qui elles-mêmes traduisent et résument de géniale façon des questions diophantiennes, autrement dit des questions sur les solutions entières de systèmes polynomiaux à coefficients entiers, partant de ces conjectures donc, Grothendieck met en place une vision nouvelle et des outils afférents qui vont permettre de pratiquer la géométrie sur des espaces discrets plus ou moins comme c'était déjà le cas sur les variétés continues, par exemple réelles ou complexes. Comment cela? En tressant les oppositions ou les pôles qui sont apparus plus hauts: objets/rerelations, ou encore ensembles/catégories (aujourd'hui catégories supérieures); le passage fournit en particulier ces nouvelles formes de topologies qui permettent d'analyser le discret et de le rendre en un sens homologue au continu, c'est-à-dire localement contractile, ou du moins localement acyclique, tout en conservant une véritable richesse topologique (pas simplement la topologie discrète bien sûr). Pour ce faire, outre les topologies elles-mêmes, c'est l'algèbre homologique (donc linéaire) dans les catégories abéliennes (un mot plus ou moins synonyme ici de 'linéaire') qui va constituer l'outil principal.

De fait, pour étudier ces topologies dites 'de Grothendieck', autrement dit ces 'sites' qui sont issus d'un regard catégorique sur ces 'espaces' discrets, pour les étudier, pour les sonder, on emploie d'abord et surtout le mètre ou plutôt l'éventail des mètres cohomologiques (expressions grothendieckiennes à nouveau). C'est là que la linéarité fait son apparition. Ici linéaire et abélien (voire nilpotent, voire pronilpotent) consonnent, et les catégories abéliennes, mises au point en partie par Grothendieck lui-même (voire en particulier un fascicule qu'on peut bien nommer [SGA 0], issu d'un séminaire antérieur à l'installation de l'IHÉS dans les locaux actuels), constituent comme le milieu naturel de l'algèbre homologique. Ceci dit on soulignera que, plus

largement, la linéarité est peut-être la grande 'marque de fabrique' d'un certain vingtième siècle. Il suffit de songer à la mécanique quantique: celle-ci est linéaire, au contraire de la mécanique classique; à y réfléchir un peu (ou beaucoup) il est proprement aberrant que la mécanique quantique soit linéaire; mais de fait elle l'est et elle fonctionne extraordinairement bien; surtout personne n'a su faire autrement. En mathématiques, depuis le Göttingen du début du (vingtième) siècle, voire encore avant, en tous cas avant l'apparition même de la mécanique quantique, la linéarité est bien installée. Néanmoins on se souviendra qu'Émile Borel écrivait déjà à l'époque que classer les théories en linéaires et non linéaires évoque assez un schéma de classification zoologique qui commencerait par distinguer entre la classe des éléphants et celle des non éléphants. Quiconque a pratiqué un tant soit peu la mécanique classique, ou plus généralement les systèmes dynamiques, ne saurait que l'approuver. Cette classification elle-même pointe en direction de nos pauvres limites... Toujours est-il que la mécanique quantique et les motifs encadrent le vingtième siècle, respectivement comme une immense surprise ('La microphysique peut s'approcher linéairement!') et un gigantesque programme de linéarisation de la géométrie auquel le vingt-et-unième siècle est en ce sens en train de se montrer infidèle, de très productive et malgré tout grothendieckienne façon. On songe ici à l'introduction récente de l'homotopie (stable) en théorie des motifs.

Dans le monde mathématique grothendieckien, l'opposition linéaire/non linéaire se monnaie plus concrètement en des couples comme: complétions profinies vs complétions pronilpotentes, (co) homologie vs homotopie (groupe fondamental), ou encore groupes arithmétiques (e.g.  $SL_n(\mathbb{Z})$ ) vs groupes de tresses et de Teichmüller (mapping class groups) ou enfin, dans un contexte plus large, topos & motifs vs géométrie anabélienne & théorie de Grothendieck-Teichmüller. Notons que cette dernière opposition, rapportée à l'itinéraire mathématique personnel de Grothendieck, peut d'ailleurs aussi se transcrire en: ante-70 (le multiplodoque, les tâches interminables) vs post-

70 (les expéditions dans la jungle, les coups de sonde dans l'inconnu).

Je n'ai évidemment pas les moyens de développer ici en détail ces oppositions ou alternatives qui pointent chacune vers de vastes théories, mais on peut avancer que l'objet 'groupe fondamental' est doué d'une certaine centralité. D'une part il s'agit pratiquement du seul invariant non abélien (voire 'anabélien') en topologie algébrique 'élémentaire'. (On se souviendra que les groupes d'homotopie supérieurs sont abéliens, ce qui se montre par un petit dessin, lequel pointe aussi vers l'opérade des petits disques et donc les tresses...) Toujours est-il que c'est le groupe fondamental qui fournit le fil qui relie, pas si secrètement que cela, [SGA1] à la période 'post-70'. S'efforcer de rendre le groupe fondamental abélien, ou du moins unipotent, conduit d'ailleurs droit à l'homotopie rationnelle et à la connection entre groupe fondamental et cohomologie. C'est encore le groupe fondamental qui relie à la monodromie et à une forme élargie de la théorie de Galois, voire à Galois lui-même, seul mathématicien dont Grothendieck aime à se voir comme un successeur, non sans d'excellentes raisons qui plongent dans la substance même de son œuvre et en fournissent parmi les plus solides fils conducteurs. En quelques mots qui là encore seraient énormément à développer, on pourrait dire que la théorie de Galois, que l'on aime à présenter comme une théorie de l'ambiguïté, a pris un tour nouveau avec Grothendieck et le geste de la monodromie, directement issu de la notion de groupe fondamental. Quant aux théories post-70 que sont la géométrie anabélienne et la théorie de Grothendieck-Teichmüller, elles tournent tout entières autour de cette notion de groupe fondamental.

Enfin, le couple géométrie algébrique vs topologie algébrique nous fournira une conclusion abrupte, provisoire et prudente. Disons qu'il n'est pas absurde d'avancer qu'Alexandre Grothendieck se montra au moins autant (génial) topologue algébrique que (non moins génial) géomètre algébriste et on songera à nouveau au destin de la théorie des motifs et à sa reprise (partielle) en termes de topologie algébrique, y compris l'utilisation de notions héritées de ce que Daniel Quillen avait construit à l'ombre des SGA, à l'usage premier des topologues, pans de non linéarité qui ont attendu leur heure pour reparaître avec force dans l'horizon de la géométrie algébrique et s'y implanter vigoureusement.



## **Activités de l'académie**

## Les Rencontres Galien-Ibn Sina



A l'initiative de l'Académie nationale de pharmacie de France, de la Société internationale des docteurs en pharmacie d'expression française et de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, la première édition des rencontres Galien-Ibn Sina a été organisée à Rabat le 2 octobre 2015.

Lors de la séance inaugurale tenue en présence d'une trentaine de membres de l'Académie Nationale de Pharmacie dont son président, Dr Jean Luc Delmas, les allocutions d'ouvertures se sont succédées pour mettre en exergue l'importance d'une telle rencontre car permettant, tel que s'en est félicité le Pr Omar Fassi-Fehri, secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II, de développer la concertation et les échanges entre la communauté scientifique des deux rives de la méditerranée sur des questions liées aux sciences pharmaceutiques et médicales. Pr Omar Fassi-Fehri et Dr Jean Luc Delmas

La rencontre s'est ensuite déroulée en trois sessions plénières auxquelles ont participé des académiciens, des pharmaciens ainsi que de nombreux experts.

1) Lors de la première session plénière organisée sur le thème de l'Héritage du monde arabo-musulman et occidental dans les sciences, le Pr Olivier Lafont, membre de l'Académie nationale de pharmacie (France) et président de la Société d'histoire de la pharmacie, a retracé dans sa conférence intitulée «Galien et son œuvre» l'histoire de l'œuvre de Galien, dont les idées ont dominé le monde médical pendant plus d'un millénaire et demi. Galien, médecin de Pergame, qui a exercé à Rome en tant que médecin de plusieurs empereurs, s'appuyait à la fois sur la raison (logos) et sur l'expérience (empeiria). Grâce aux dissections qu'il pratiquait sur les animaux et à son expérience en tant que médecin des gladiateurs, Galien a fait évoluer les connaissances de l'anatomie humaine à l'époque. Il s'est également beaucoup intéressé aux remèdes de l'époque et son affirmation

«*contraria contrariis curantur*» (les contraires se guérissent par les contraires) est devenue une maxime de la médecine classique.

Le Pr Ali Benmekhlouf, philosophe, professeur des universités (Paris-Est, France), a par la suite animé une conférence sur «L'œuvre d'Avicenne dans les domaines des sciences médicales et pharmaceutiques». Avicenne, philosophe et scientifique persan, connu sous le nom d'Ibn Sina par la communauté arabe, s'est intéressé à de nombreuses sciences dont l'astronomie, l'alchimie et la chimie. Il a joué un rôle capital dans l'agencement des connaissances de son temps.

2) La deuxième session plénière a été consacrée au «rôle de la femme dans la santé» et permis à plusieurs intervenantes d'aborder différents thèmes tels que «Femme et santé : un couple gagnant pour le développement» par Dr Nouzha Skalli, ancien ministre du développement social, de la famille et de la solidarité (Maroc), la «prévention des infections materno-fœtales : le rôle du pharmacien» par Dr Liliane Grangeot-Keros, secrétaire général adjoint de l'Académie Nationale de pharmacie, Centre national de référence pour la rubéole (France), «La femme et son rôle au sein de la famille : le conseil du pharmacien» par Dr Fabienne Blanchet, membre de l'Académie Nationale de pharmacie (France), directeur du comité d'éducation sanitaire et social de la pharmacie française (CESPHARM) et enfin les «expériences associatives au Maroc : L'heure joyeuse» par Dr Leila Chérif, présidente de l'Association L'heure joyeuse (Maroc).

3) La troisième session s'est déroulée sous forme de table ronde à laquelle ont participé les représentants de l'Académie Hassan II, de l'ANP, du CNOP (Conseil national de l'ordre des pharmaciens-Maroc) et de la faculté de médecine et de pharmacie de Rabat. Consacrée aux actualités sur les travaux académiques et aux perspectives d'échanges, cette séance a permis notamment d'évoquer les besoins en formation continue qui pourraient constituer un premier chantier de collaboration entre l'ANP et le CNOP.

Les rencontres ont par ailleurs été l'occasion de rendre un vibrant hommage au Pr Abdelhadi Tazi, éminent historien et un des membres fondateurs de l'Académie du Royaume du Maroc, décédé le 2 avril 2015.



## Allocution du Pr. Omar FASSI-FEHRI, secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques à la Rencontre Galien-Ibn Sina



Pr Omar Fassi-Fehri et Dr Jean Luc Delmas

**Monsieur le Ministre,  
Monsieur le Président de l'Académie Nationale  
de Pharmacie, France,  
Madame la Présidente de la Société  
Internationale des Docteurs en Pharmacie,  
Chers confrères, chères consœurs,  
Excellences, Mesdames, Messieurs,**

Je voudrais d'abord exprimer le plaisir que j'éprouve de participer avec vous à la séance inaugurale des «Rencontres Galien - Ibn Sina» qui se tiennent pour la première fois sous cette magnifique coupole dans l'enceinte du siège de l'Académie du Royaume du Maroc, qui abrite aussi, le siège de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Nous sommes particulièrement honorés que la prestigieuse Académie Nationale de la Pharmacie de France et la Société Internationale des Docteurs en Pharmacie d'Expression Française, qui travaillent aux progrès des sciences et des techniques sur des sujets touchant aux divers domaines de la pharmacie, ont choisi notre pays pour tenir cette importante Rencontre.

Il va sans dire que cette Rencontre revêt une importance indéniable car il va permettre de développer la concertation et l'échange entre la communauté scientifique des deux rives de la Méditerranée sur des questions liées au domaine des sciences pharmaceutiques et médicales.

L'importance de cette Rencontre découle aussi non seulement des thèmes pertinents de ses différentes séances plénières mais également de la qualité des personnalités qui vont animer le débat et qui sont composés d'éminents scientifiques, chercheurs, médecins et spécialistes de haut niveau.

Concernant le thème de l'une de vos trois séances plénières, vous n'êtes pas sans savoir l'intérêt que portait Feu Académicien de l'Académie du Royaume du Maroc, le Pr. Adelhadi, TAZI, que Dieu l'ait en Sa Sainte Miséricorde, au sujet de l'héritage du monde arabo-musulmane et occidentale dans les sciences, et que s'il était encore des nôtres, il participera avec enthousiasme aux travaux de cette Rencontre pour mettre en exergue la complémentarité entre le savoir occidental et celui du monde arabo-musulman dans le passé et pour nous entretenir sans doute de l'âge d'or des sciences arabes correspondant au fort développement de la médecine à l'époque, qui encouragée par un souci d'hygiène et de santé permanent, la médecine a bénéficié d'une pharmacopée extraordinaire et des nombreux progrès chimiques réalisés en ces temps.

N'ayant pas la prétention de me substituer aux éminents professeurs et spécialistes, qui sont invités à prendre part aux différents thèmes de votre Rencontre, et qui sauront mieux que moi traiter ce sujet et les autres thèmes de votre riche programme. Je voudrais pour ma part saisir cette occasion pour vous entretenir brièvement de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques dans le cadre de sa mission qui consiste à

promouvoir la recherche et la coopération dans le domaine des sciences médicales.

### **Excellences, Mesdames, Messieurs,**

Placée sous la protection tutélaire de Sa Majesté Le Roi, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques s'inscrit dans le cadre d'une forte conviction, que d'une part, la créativité scientifique et l'innovation technologique sont des facteurs fondamentaux dans les processus de développement social et de croissance économique des nations modernes, et que d'autre part, les activités de recherche scientifique sont à infléchir dans des directions utiles à l'homme, et leurs applications techniques, à contenir dans les limites d'une éthique transcendante.

Pour honorer cette conviction, la mission qui lui est dévolue par Son fondateur et agréée par Son protecteur, est de :

- promouvoir et développer la recherche scientifique et technologique,
- contribuer à la définition des orientations générales fondamentales du développement scientifique et technique et émettre des recommandations sur les priorités en matière de recherche,
- financer des programmes de recherche et assurer l'évaluation des activités de recherche dans le pays,
- et contribuer à l'intégration de la recherche scientifique et technique dans l'environnement socio-économique national et international.

Pour mettre en œuvre ses missions, l'Académie est dotée des organes directeurs dont font partie des collèges scientifiques chargées d'évaluer la pertinence et la qualité des projets de recherche qui leur sont soumis par l'Académie et donnent leurs appréciations sur la conformité de ces projets avec les priorités nationales et sur leurs valeurs scientifiques.

Parmi les six collèges scientifiques, le dynamique collège «sciences et techniques du vivant» est investi des missions de l'Académie dans le domaine de la recherche médicale et la santé publique.

Dans le cadre de sa mission qui consiste à promouvoir la recherche scientifique et technologique dans notre pays, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, a examiné les thèmes et axes de recherche qui feront l'objet d'un soutien de sa part. Parmi ces thèmes, ceux faisant appel à la recherche médicale occupent une place de choix. Déjà, dans le cadre du programme adopté en 2007, l'Académie a apporté un appui financier de l'ordre de 10 millions de DH (étalés sur une période de 3 ou 4 ans), à quatre projets de recherche qui recourent à la recherche médicale dont un concerne la tuberculose, le second les polyarthrites indifférenciées récentes, le troisième l'épidémiologie de l'accident vasculaire cérébral ischémique, et la quatrième concerne les vertus de l'arganier.

Un autre projet concernant le cancer (Étude épidémiologique et génétique des leucémies myéloïdes aigües) a été également sélectionné et a fait l'objet d'un soutien de la part de l'Académie dans le cadre d'un second appel d'offres thématique qui est devenu opérationnel à partir de 2010-2011.

Dans la perspective de promouvoir l'excellence, l'Académie encourage le regroupement et la fédération en réseaux des compétences qui existent autour des thèmes de recherche prioritaires pour l'Académie et sur lesquels travaillent ces compétences. Quand de telles structures n'existent pas, l'Académie aide à la création de laboratoires ou de réseaux avec le personnel disponible.

Par ailleurs, si parmi les missions de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques il y a celle dont on vient de parler à l'instant, elle a aussi pour mission de porter tout son intérêt aux actions de diffusion de la culture scientifique et de promouvoir la diffusion du savoir par le soutien aux manifestations et conférences scientifiques.

Parallèlement à ces actions de soutien, l'Académie réserve aux sciences médicales une place privilégiée dans les travaux de ses sessions plénières solennelles et de ses sessions ordinaires.

Par cette contribution, c'est dire que l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, dans le cadre de ses missions telles que stipulées par le Dahir de sa création, et surtout dans le cadre des orientations que Sa Majesté le Roi Mohammed VI -que Dieu Le garde- lui a fixées, en particulier au moment de son installation le 18 mai 2006, continuera à prêter la plus grande attention à la recherche scientifique dans le domaine des sciences pharmaceutiques et médicales.

**Excellences, Mesdames, Messieurs,**

Encore une fois, je voudrais vous assurer de notre encouragement, et de notre engagement

à renforcer davantage les liens de coopération scientifique et technique entre la communauté scientifique de nos pays respectifs et à concrétiser rapidement une coopération scientifique entre nos institutions dont tout nous montre combien elle est nécessaire.

En souhaitant la bienvenue aux éminents professeurs et aux éminentes personnalités qui nous honorent de leur présence, et en vous souhaitant tout le succès à vos travaux, je vous remercie pour votre attention.



Photo souvenir devant le bâtiment de l'Académie

## Journée sur l'enseignement des sciences

Les difficultés que rencontre l'enseignement dans notre pays et son triste bilan nous invitent à multiplier nos efforts et à diversifier nos actions au profit d'un enseignement de qualité. L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques n'a cessé, depuis son installation le 18 mai 2006 par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le protège, d'œuvrer par des programmes diversifiés de sensibilisation et d'encouragements au profit des jeunes, pour les inciter à accorder plus d'intérêt aux études scientifiques et techniques.

Depuis la tenue de la session ordinaire du 18 mai 2010 et la signature de la convention de partenariat entre l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle (voir Bulletin n° 7, juin 2010), plusieurs rencontres entre les deux institutions se sont succédées. La journée du 17 décembre 2015, qui constitue la continuité des multiples activités menées, a permis de réunir une trentaine de participants, académiciens, professeurs et inspecteurs d'enseignement du Ministère de l'Education Nationale.

L'importance de cette rencontre a été soulignée lors de la séance d'ouverture par Monsieur le Ministre et Monsieur le Secrétaire perpétuel qui ont mis l'accent sur les relations privilégiées qui lient l'Académie au Ministère pour promouvoir des actions pérennes pour le développement de programmes concrets et ciblés. Monsieur le Ministre a notamment exposé l'historique des différentes étapes de réflexion menées par son Ministère pour apporter des solutions aux difficultés qui entravent le développement d'un enseignement de qualité dans notre pays.

Après un exposé du Directeur des curricula au Ministère de l'Education Nationale, qui a donné le détail sur les contenus des programmes, les approches pédagogiques et le système d'évaluation actuels, un bref rappel des actions menées par l'Académie Hassan II au profit de

l'enseignement des sciences fut exposé par la Direction des sciences.

La nécessité d'établir un diagnostic de la situation, seul à même de permettre de mettre en place des actions à court, moyen et long terme a été soulevé par Pr Malik Ghallab, membre de l'Académie, dans sa réflexion sur l'enseignement des sciences. Il évoque ainsi les difficultés multiples liées à la réforme: formation pédagogique des maîtres, maîtrise des langues, mise en place des travaux pratiques,... et propose de mettre l'accent sur «l'acquisition des compétences et pas seulement l'acquisition des savoirs» et de tenir compte des expériences d'autres pays.

Le Chancelier de l'Académie pour sa part a mis l'accent sur les méthodes d'apprentissage en sciences telles que «la main à la pâte», les nouvelles méthodes des sciences de l'éducation basées sur l'enquête, la résolution des problèmes,... Il a rappelé que la formation des jeunes doit prendre en charge l'environnement et l'interaction avec la société et ne pas négliger l'introduction des Sciences Humaines et Sociales dans les curricula des sciences et techniques.

Les débats de la journée ont finalement porté sur les points suivants:

- 1) importance de la sensibilisation des jeunes aux études en sciences et techniques,
- 2) apprentissage des langues,
- 3) enseignement des mathématiques,
- 4) importance des séances des travaux pratiques en sciences,
- 5) introduction de nouveaux concepts d'apprentissage des sciences d'éducation,
- 6) évolution des techniques de communication,
- 7) approche par compétence,
- 8) expérience des pays similaires à notre pays dans le domaine.

## Allocution du Pr. Omar FASSI-FEHRI, secrétaire perpétuel de l'Académie HassanII des Sciences et Techniques, à la journée sur «l'enseignement des sciences»

**Monsieur le Ministre,  
Mesdames et Messieurs les académiciens,  
Messieurs les Directeurs,  
Mesdames et Messieurs les enseignants,  
Mesdames et Messieurs,**

C'est avec un grand plaisir que nous nous retrouvons de nouveau dans cette salle pour poursuivre la réflexion et pour débattre de l'importance de l'enseignement des sciences dans le développement de notre pays.

Je voudrais saisir cette occasion pour remercier vivement tous les membres de la commission «enseignement des sciences» pour le travail accompli et pour la préparation et l'organisation de cette importante journée d'étude.

Je voudrais aussi saisir aussi cette opportunité pour partager avec vous quelques réflexions sur l'importance de l'enseignement des sciences pour relever les défis économiques et sociétaux qui s'affrontent à nous et pour pouvoir faire accéder notre pays à l'économie du savoir.

Aujourd'hui, nous savons tous qu'une nouvelle économie du savoir se dessine à l'échelle mondiale et qu'elle est basée essentiellement sur la science et la technologie d'une part et sur la qualité et la compétitivité d'autre part. Nous savons aussi que la mondialisation constitue de nos jours une nouvelle source de contraintes qui nous impose de nous adapter en renforçant notre capacité scientifique, notre maîtrise de l'expertise et de l'ingénierie et donc notre potentiel humain scientifique et technique pour affronter ces nouvelles contraintes et relever les défis technologiques qui s'ouvrent à nous. Pour cela, il faut absolument sensibiliser les marocains à l'importance de la science et ce, dès l'école primaire – là où tout commence.

Cependant, une des grandes préoccupations tient dans la «désaffection» des jeunes envers les sciences. L'attraction des jeunes vers les filières scientifiques semble battre de l'aile dans la plupart des pays. La crise des vocations scientifiques se fait sentir également dans notre pays. Cette désaffection est inquiétante et nous interpelle et nous oblige de réagir. Toutefois, cette tendance commence à changer ces dernières années, par une augmentation du pourcentage de nos bacheliers dans les disciplines scientifiques et techniques, mais qui, malheureusement, s'orientent fortement vers les filières des sciences humaines (économie droit) dans l'enseignement supérieur.

Le thème «enseignement des sciences» de cette journée s'inscrit dans le cadre d'un des chantiers importants dans lequel l'Académie Hassan des Sciences et Techniques a décidé de s'investir en étroite collaboration avec le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle. Bien entendu, l'intérêt de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques pour l'enseignement des sciences est tout naturel; il est inscrit dans la Loi de création de l'Académie. De plus, les deux études élaborées par notre Académie – «Pour une relance de la recherche scientifique et technique au service du développement du Maroc» – et «Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité»- proposent une stratégie à l'horizon 2020 pour mettre la recherche résolument au service du développement, dont l'un des axes majeurs concerne l'enseignement des sciences et le développement de la culture scientifique. Nous serons tous d'accord pour reconnaître que le développement de la recherche scientifique est largement tributaire de l'enseignement des sciences et surtout des premiers contacts de nos enfants avec la science.

Cette vision suppose que, dès les premières années, on s'attache à donner goût à la science en transmettant à chaque enfant des bases solides et durables dans ce domaine. Car tous nos élèves, quels que soient leurs parcours professionnels, auront à vivre dans un monde traversé par le développement scientifique et technologique. Tous doivent avoir les connaissances de base pour en comprendre et en saisir les contours.

L'une des missions essentielle de l'École est de former les futurs citoyens. Pour ce faire, elle se doit de préparer à l'exercice de la liberté de penser, c'est-à-dire de s'interroger sur les choses, les faits, les vérités. L'enseignement des sciences peut être l'une des voies de cette éducation. Il conduit à appréhender le statut de la vérité scientifique, qui résulte d'une démarche rationnelle faite de doute méthodique, d'examen critique, de vérification et d'interrogations.

Il est donc fondamental de rendre l'enseignement des sciences attractif et plus effectif au primaire et secondaire, de lui assigner, autant que possible, une dimension expérimentale, de développer la capacité d'argumentation et de raisonnement des élèves, en même temps que leur appropriation progressive des concepts scientifiques.

Nous sommes convaincus de l'importance de cette démarche qui consiste à démystifier les sciences dures, à doter les élèves de connaissances scientifiques et à former leur esprit en revalorisant l'atelier de sciences à celui de leçon de sciences, tout en les encourageant à se poser des questions et à formuler des réponses.

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques s'associera sans hésitation au chantier élaboré et mis en œuvre par la Ministère de l'Éducation Nationale et la Formation Professionnelle, apportera son soutien à cette dynamique et demeurera un partenaire privilégié. Le Ministère de l'Éducation nationale pourra compter sur l'Académie et sur ses membres lorsqu'il s'agit de s'engager au service de l'École et de l'enseignement des sciences.

Puisse Dieu couronner de succès nos actions et de nous aider à être dignes de la confiance de Sa Majesté le Roi Mohammed VI et de Sa bienveillance.

Je vous remercie pour votre attention.

## Journée sur génomique et cancers \*

La génomique est actuellement un des champs les plus dynamiques de la recherche biomédicale et les applications cliniques de ces recherches sont très prometteuses, en particulier dans le domaine de la cancérologie. L'introduction des approches génomiques en pratique médicale vise à améliorer la prise en charge des patients par : (i) une médecine personnalisée et un traitement ciblé des tumeurs, (ii) le développement de nouveaux marqueurs qui prédisent le pronostic et l'évolution de la maladie ou qui évaluent la réponse aux traitements, (iii) la mise en place de tests qui permettent une meilleure estimation du risque génétique chez les personnes à haut risque de cancers héréditaires.

Pour faire le point sur ces avancées et les perspectives qu'ouvre la médecine génomique en matière de diagnostic, de prévention et du traitement des cancers, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a organisé, le 28 novembre 2014, un séminaire sur le thème de génomique et cancers. Cette rencontre a permis à la communauté scientifique marocaine de débattre de ces avancées et des nombreuses questions éthiques qu'elles soulèvent.

Après le mot de bienvenue du Secrétaire Perpétuel et la présentation des objectifs du séminaire par le Directeur du Collège des sciences et techniques du vivant, une conférence inaugurale a été donnée par Madame le Professeur Dominique Stoppa-Lyonnet, invitée d'honneur de cette réunion. La présentation du Professeur Stoppa-Lyonnet, chef du service génétique oncologique à l'Institut Curie, Professeur à l'université Paris-Descartes et membre du Comité consultatif national d'éthique français, a porté sur la **Médecine génomique personnalisée et ses nombreuses applications en cancérologie** (voir encadré 1 p. 113).

Au cours de la première session de la matinée, le **profil épidémiologique des cancers au Maroc** a été présenté par le Professeur Nejari de la Faculté de Médecine et de Pharmacie de Fès, qui a mis l'accent sur certaines spécificités marocaines des pathologies tumorales, en particulier l'âge de survenue relativement jeune de certains cancers. Madame Maria Bennani, directrice adjointe et responsable de la coopération internationale à la «Fondation Lalla Salma, prévention et traitement des cancers», a présenté par la suite les efforts de la Fondation pour la restructuration de la recherche sur le cancer. Madame Bennani a rappelé à cette occasion que le patient est au cœur de l'engagement et de la mission de la fondation, et que la recherche et la formation ont une place importante dans le plan national de prévention et de contrôle du cancer 2010-2019. La Fondation finance actuellement plusieurs projets de recherche sur les cancers et serait disposée à élargir son soutien aux projets qui font appel aux outils de la génomique si ces recherches ont un impact sur la prise en charge des patients marocains.

La deuxième session du matin a été consacrée aux **nouveaux biomarqueurs et aux thérapies ciblées**. Le Professeur Affaf Amarti, Professeur d'anatomopathologie à la faculté de médecine de Fès, a présenté l'expérience de son équipe en pathologie moléculaire et annoncé l'introduction au CHU Hassan II de Fès de nouveaux biomarqueurs pour le diagnostic des cancers et comme tests théranostiques en cancérologie. Le Professeur Hassan Errihani de l'Institut national d'oncologie de Rabat a exposé, dans une deuxième communication, l'état actuel au Maroc et les perspectives des thérapies ciblées en oncologie. Il a rappelé à cette occasion les

\* Synthèse du séminaire organisé le 28 novembre 2014 par le Collège des sciences et techniques du vivant.

particularités des thérapeutiques ciblées, celles qui ont déjà une autorisation de mise sur le marché au Maroc ainsi que leurs nombreux avantages pour les malades. Le Professeur Errihani a insisté sur la nécessité de mettre rapidement en place des plateformes de génomique pour répondre à la demande en tests génétiques et en explorations génomiques indispensables avant la prescription des nouveaux traitements. En fin de matinée, le Professeur Hassan Sefrioui, directeur médical du centre de biotechnologie de la fondation MaScir, a présenté, lors d'une communication en recherche et développement, l'état d'avancement des recherches des laboratoires de la Fondation Mascir en vue de la mise en place d'un Kit qPCR pour le suivi des patients atteints de leucémie myéloïde chronique.

La première session de l'après midi a été consacrée aux **leucémies et aux néoplasies myéloprolifératives**. Les trois orateurs programmés lors de cette session, A. Quassar (Professeur en hématologie à la Faculté de médecine de Casablanca), K. Ouldin (Professeur en génétique à la Faculté de médecine de Fès) et Y. Doubaj (Docteur généticienne à l'Institut national d'hygiène de Rabat) ont présenté l'ensemble des tests cytogénétiques et moléculaires disponibles ou en cours de développement au Maroc pour le diagnostic et le suivi des patients. L'ensemble des intervenants et des participants ont conclu que des efforts louables ont été déployés par les différentes équipes pour un transfert de technologie et la mise en place de nombreux tests génétiques utiles pour les patients et ont appelé à un soutien du ministère de la santé pour faire bénéficier un maximum de patients de ce type d'analyses.

La dernière session de ce séminaire a été consacrée au **cancer du sein**. Le Professeur N. Benjaafar de l'Institut national d'oncologie a présenté les caractéristiques de ce cancer au Maroc, en se basant sur les résultats du registre de Rabat. Le Professeur Benjaafar a rappelé que le cancer du sein est devenu, depuis l'année 2000, le premier cancer chez la femme, avant celui du col utérin. Le Professeur

A. Sefiani de l'Institut national d'hygiène a pour sa part présenté la prédisposition génétique aux cancers du sein et des ovaires, en particulier celle en rapport avec les gènes BRCA1 et BRCA2. Le Professeur Sefiani a rapporté les premiers résultats de diagnostics présymptomatiques réalisés chez des familles marocaines à haut risque pour le cancer du sein et de l'ovaire. Il a, en particulier, conclu à l'importance des questions éthiques et organisationnelles soulevées par de telles prises en charge.

Le Professeur Stoppa-Lyonnet a clôturé le programme de la journée par une présentation sur les **problèmes éthiques et les prédispositions génétiques aux cancers** (voir encadré 2 p. 114). Les différents participants ont souligné, lors du débat qui a suivi cette dernière intervention, l'importance des questions éthiques dans la prise en charge des familles à haut risque de cancers, en particulier pour aider les patients et leurs apparentés dans le processus de prise de décision.

En résumé, le séminaire fut l'occasion pour les spécialistes et chercheurs marocains, cliniciens, biologistes et généticiens, de faire le point sur les avancés de la génomique et son impact sur la médecine personnalisée des cancers. Le nombre de patients qui pourraient bénéficier de ces progrès, y compris au Maroc, ne cesse d'augmenter et les progrès amorcés pourraient à terme, concerner tous les patients, avec l'espoir d'une meilleure prise en charge et des thérapeutiques plus efficaces. Les participants à ce séminaire ont tous souligné l'importance de promouvoir une recherche pluridisciplinaire basée sur un plus grand transfert des nouvelles technologies dont la génomique, pour mieux comprendre le développement des cancers et pour mieux identifier les risques associés à leur survenue. Les participants ont également appelé à promouvoir l'éducation éthique et la prise en compte de cette question par les professionnels de la santé, en particulier suite aux premières pratiques médicales des nouvelles technologies issues de la recherche génomique des cancers.

#### A. SEFIANI

Membre du Collège des sciences et techniques du vivant



## Médecine génomique personnalisée, applications en cancérologie

**Pr. Dominique Stoppa-Lyonnet**

La médecine «génomique» personnalisée repose sur l'identification de sous-groupes de malades dont l'histoire de la maladie, la réponse aux traitements ou l'intolérance à un traitement est semblable. Ces sous-groupes sont établis sur des caractéristiques génétiques communes. Certains préfèrent le terme de médecine de précision ou encore de médecine stratifiée. La médecine «génomique» personnalisée concerne aussi la médecine prédictive. Il s'agit alors d'estimer chez une personne, en général indemne, le risque de survenue de telle ou telle maladie. La légitimité de la médecine prédictive repose sur le fait que savoir permet de mettre en œuvre des mesures de prévention et/ou de traitement qui diminueront l'impact de la maladie attendue.

La cancérologie est une application majeure de la médecine personnalisée. L'une de ses premières applications concerne l'identification de cibles thérapeutiques. Ce n'est pas alors le génome natif de la personne qui est étudié mais celui de sa tumeur, la tumeur étant le siège d'altérations génétiques acquises dont certaines confèrent à la cellule son caractère malin et peuvent constituer une cible thérapeutique. Si la médecine génomique personnalisée connaît aujourd'hui un développement important grâce aux capacités d'analyses quantitatives et qualitatives des acides nucléiques et en particulier grâce au séquençage très haut débit, il n'en demeure pas moins qu'en cancérologie la démarche est relativement ancienne. Le premier exemple de stratification de traitement est l'identification des récepteurs aux œstrogènes et à la progestérone dont l'étude dans les cancers du sein conduit à la suppression de l'exposition hormonale lorsqu'ils sont hyperexprimés. Un autre exemple de stratification thérapeutique est l'identification dans 95% des leucémies myéloïdes chroniques (LMC) de la translocation t(9;22)(q34;q11) conduisant à l'activation de la tyrosine kinase Abl, oncogène alors inhibé par l'Imatinib. L'Imatinib a radicalement changé le pronostic des LMC.

Une grande part de la recherche en cancérologie au cours de ces vingt dernières années a été l'identification d'événements oncogéniques et le développement de traitements ciblés. De grands consortiums (ICGC, TCGA) en étudiant le génome et le transcriptome de grandes séries de cancers de localisation différentes bouleverse la classification des cancers fondée non plus tant sur leur localisation que sur les voies cellulaires altérées. De la même façon, on est en train de passer de la notion d'un test compagnon à celle d'un portrait tumoral fondé sur l'analyse d'un très grand nombre de biomarqueurs, voire à terme sur le séquençage de l'exome (parties codantes de l'ensemble des gènes) ou du génome entier. Les nouveaux outils de séquençage vont également permettre de suivre la maladie à la fois sur le plan quantitatif via la détection d'ADN tumoral circulant (ADNtc) pourvu qu'on ait un biomarqueur tumoral disponible (ex mutations TP53, EGFR, BRAF,...) et sur le plan qualitatif via l'identification de nouveaux biomarqueurs (ex mutation MEK de mélanome devenu résistant à un anti-BRAF), biomarqueur identifié sur le tissu tumoral ou sur ADNtc, ce dernier devenant alors une véritable biopsie tumorale.

L'autre volet de la médecine génomique personnalisée concerne donc la médecine prédictive, c'est-à-dire en cancérologie le diagnostic de prédisposition aux cancers. Cinq à 10% des cancers fréquents (sein, côlon, ovaire, endomètre,...) sont liés à un facteur génétique mendélien transmis de l'un des deux parents à un enfant. C'est se sachant porteuse d'une altération du gène BRCA1 qu'Angelina Jolie a choisi de subir une chirurgie mammaire et ovarienne de prévention. On distinguera ces facteurs mendéliens de risque, qui seules sont entrés dans la pratique médicale, des facteurs de susceptibilité issus en particulier d'études d'association génome-entier et dont les applications cliniques sont aujourd'hui quasi-inexistantes. Plus de 60 gènes dont les altérations monoalléliques et parfois bialléliques sont associées à une augmentation significative du risque de cancer font l'objet régulier de tests génétiques. Les objectifs de ces tests de prédisposition sont essentiellement le diagnostic précoce ou la prévention d'un cancer chez la personne testée et chez ses apparentés. Depuis peu, et dans un certain nombre de cas seulement, s'ajoute un objectif thérapeutique. A titre d'exemple, les femmes atteintes d'un cancer de l'ovaire de haut grade dans un contexte BRCA1/2 que cette altération soit constitutionnelle (75% des cas) ou somatique (25% des cas) peuvent bénéficier d'un traitement par inhibiteur de la poly-ADP-ribose-polymérase (PARPi), une molécule qui vient majorer le défaut de réparation des altérations de l'ADN des tumeurs inactivées pour BRCA1 ou BRCA2.

Aux défis scientifiques représentés par l'identification et la validation de nouvelles cibles thérapeutiques et de nouveaux facteurs de prédisposition, viennent s'ajouter les défis technologiques, médicaux et organisationnels représentés par la mise à disposition à l'ensemble d'une population de ces innovations thérapeutiques et préventives. Comment garantir la qualité de ces tests, leur équité d'accès social et territorial, comment garantir une information des personnes concernées qui leur permette de faire un libre choix ? Voilà les questions auxquelles nos systèmes de santé doivent s'atteler.

## Problèmes éthiques et prédispositions aux cancers

Pr. Dominique Stoppa-Lyonnet

La médecine prédictive est l'un des volets de la médecine «génomique» personnalisée. Elle a pour vocation d'estimer chez une personne, en général indemne, le risque de survenue de telle ou telle maladie. Le terme de médecine de prévision serait plus heureux. Le principe de la médecine prédictive repose sur le fait que savoir doit permettre de mettre en œuvre des mesures de prévention et/ou de traitement qui diminuent l'impact de la maladie attendue. La cancérologie est un champ majeur de la médecine prédictive. Cinq à 10% des cancers fréquents (sein, côlon, ovaire, endomètre, ...) sont liés à un facteur génétique transmis de l'un des deux parents à un enfant. C'est se sachant porteuse d'une altération du gène BRCA1 qu'Angelina Jolie a choisi de subir une chirurgie mammaire et ovarienne préventive. Il faut distinguer les facteurs génétiques de risque suivant un modèle mendélien (ex : BRCA1) et les simples facteurs de susceptibilité. Les facteurs mendéliens confèrent une augmentation de risque d'un facteur 5 à 10, voire davantage pour certains cancers rares, par rapport à celui de la population générale ; les facteurs de susceptibilité une augmentation d'un facteur 1,1 à 1,5, soit très modérée. Seule la prise en compte des facteurs mendéliens a aujourd'hui une utilité clinique.

Le principe sur lequel s'appuie la médecine prédictive n'est pas vérifié pour toutes les prédispositions. Si dans certains cas, le bénéfice des tests génétiques et de la prise en charge des personnes prédisposées a été démontré, dans d'autres, il ne l'a pas été. A titre d'exemple, la prise en charge de personnes atteintes du syndrome de Li et Fraumeni (mutation constitutionnel monoallélique du gèneTP53) est très limitée.

Le diagnostic de prédisposition aux cancers, même lorsque le bénéfice de la prise en charge a été démontré, peut avoir un retentissement psychosocial délétère. L'information des personnes en amont du test, leur accompagnement pendant et au décours du test et l'organisation de leur prise en charge en cas de diagnostic de prédisposition sont indispensables. Le patient doit rester au centre des préoccupations de l'équipe pluridisciplinaire qui le prend en charge.

L'information génétique, bien qu'individuelle, reste particulière car elle peut concerner aussi les apparentés. Les lois françaises de bioéthique de 2004 et 2011 ont établi qu'une personne se sachant porteuse d'un facteur génétique « associé à une maladie grave pour laquelle des mesures de prévention ou de traitement peuvent être mises en œuvre » a le devoir d'en informer ses apparentés potentiellement concernés. L'ensemble du processus d'information est résumé par l'expression « information de la parentèle ». La très grande majorité des prédispositions aux cancers identifiées aujourd'hui obéissent à un modèle mendélien de type dominant. Le corollaire est qu'un enfant dont l'un des deux parents est prédisposé a un risque sur deux d'avoir hérité de ce facteur de risque. Du fait de ce mode de transmission, l'ensemble des apparentés appartenant à une même branche parentale est concerné. Ainsi, le mode de transmission et l'existence de recommandations de prise en charge chez les personnes prédisposées font de l'oncogénétique un champ privilégié d'étude de la mise en place de la loi.

Les deux préoccupations éthiques principales liées à l'exercice à risque de cette médecine des risques sont le risque de discrimination, secondaire à une absence de confidentialité des résultats et le risque de se tromper dans la prédiction des cancers. Le risque de se tromper est un risque majeur. Il comporte deux volets : (1) l'interprétation de la séquence d'un gène donné et (2) l'estimation des risques tumoraux comprenant la prise en compte de facteurs modificateurs.

En effet, le défi n'est plus aujourd'hui l'identification des mutations mais leur interprétation clinique. De façon générale en génétique médicale lorsque la mutation d'un gène associée à une maladie est de type inactivateur (en introduisant par exemple un signal d'arrêt de synthèse de la protéine pour laquelle le gène code), il existe une grande variété de mutations délétères. Il existe de plus autant de variants de signification biologique et clinique inconnue, mais candidats à être délétère. La caractérisation de ces variants est un enjeu majeur qui mobilise aujourd'hui l'ensemble des laboratoires. Ils sont réunis dans des consortiums internationaux spécifiques d'une prédisposition. Des bases de données colligeant de nombreuses caractéristiques de ces variants sont créées et constituent des outils essentiels d'interprétation. Les efforts de recherche nécessaires à l'interprétation des séquences conduisent à la naissance de consortiums et à des consortiums de consortiums lorsqu'il s'agit d'appréhender l'ensemble de la médecine prédictive. Citons le mégaconsortium Global Alliance for Genomics and Health, GA4GH, ONG qui regroupe académiques et industriels. Il pourrait avoir un rôle majeur dans l'acquisition des connaissances et leur partage. Ce nouveau mode d'acquisition de connaissance, le « sharing data », est en train de redéfinir les règles de propriété intellectuelle en vigueur jusque-là.

Les facteurs génétiques de prédisposition aux cancers, même mendéliens, ont une expression modulée par les effets conjugués de l'environnement et de variations génétiques. Aujourd'hui, les tests de prédisposition sont réalisés chez des personnes ayant une histoire personnelle et/ou familiale évocatrice d'une prédisposition, histoire résultante de l'association d'un facteur mendélien et de ces facteurs modificateurs dont la plupart sont encore inconnus. Etendre les indications de test dans la population générale sans prendre en compte les facteurs modificateurs conduirait à surestimer les risques tumoraux et à prendre des mesures de prévention inappropriées. Là encore, des efforts considérables, internationaux et collaboratifs sont nécessaires pour les identifier et aller vers une estimation individuelle précise des risques.

**10<sup>ème</sup> édition des journées  
"les jeunes et la science au service du développement"  
26 novembre - 04 décembre 2015**

Ce rapport de synthèse de l'édition 2015 des journées "les jeunes et la science au service du développement" donne un bref aperçu sur le bilan et le déroulement des manifestations organisées à travers les différentes régions du Royaume sur le thème "la lumière et ses technologies". L'édition de cette année a coïncidé avec l'organisation à Rabat du 26 au 28 novembre du premier salon de la créativité des jeunes, au centre de formation permanente du Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle.



Affiche du premier Salon National de la créativité des jeunes

Les journées, ainsi que le Salon, ont été inaugurés le 26 novembre par le Ministre de l'Education Nationale, le Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et le Président de l'association Recherche et Développement

du Maroc. Leurs interventions respectives ont été fortement appréciées et applaudies par les jeunes élèves, leurs encadrants et parents.

Les principales avancées enregistrées cette année en matière d'organisation sont :

- l'implication de la société civile dans l'organisation de manifestations scientifiques au profit des jeunes élèves ; on peut citer à titre d'exemple : l'Association R&D Maroc, la fondation KIDS, l'Association d'Astronomie de Marrakech;
- l'organisation à la même date du 19<sup>ème</sup> festival d'astronomie de Marrakech;
- l'implication de l'ensemble des AREF dans l'organisation de ces journées qui se sont en réalité prolongées jusqu'à la fin du mois de Janvier 2016, l'AREF de Rabat a organisé l'exposition des innovations des clubs scientifiques de l'Académie Régionale de l'Éducation et de la Formation de la région de Rabat Zemmour Zaïr, le 19 Janvier 2016;
- l'implication des porteurs des projets de recherche financés par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.



Inauguration du Salon par le Ministre de l'Education Nationale en présence du secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II et du président de R&D Maroc





## **Appui à la recherche scientifique et technique**



## NANOCOMPOSITES ECOLOGIQUES A PARTIR DE RESSOURCES NATURELLES ESPAGNOLES ET MAROCAINES

**Mohammed LAHCINI**

*Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech*



Les nanocomposites biodégradables sont des systèmes multiphasés et hybrides constitués d'une matrice biopolymère (polymère biodégradable et/ou biocompatible) dans laquelle sont dispersées des charges de taille nanométrique. Les biopolymères représentent une alternative intéressante aux polymères synthétiques non dégradables classiques pour des applications à durée de vie limitée ou pour le domaine biomédical et pharmaceutique. Cependant, pour être compétitif et répondre à des cahiers des charges industriels, certaines propriétés de ces polymères doivent être améliorées. A cet effet, le présent projet avait pour objectif principal la valorisation des argiles locales et des sous produits de la biomasse en développant des matériaux nanocomposites biodégradables Poly lactide/Poly( $\epsilon$ -caprolactone) – argiles marocaines de type palygorskite, Beidellite et bentonite à propriétés améliorées.

Le but ultime de notre étude était donc de contrôler la dispersion des argiles marocaines (palygorskite, Beidellite et bentonite) au sein des matrices polymères biodégradables (poly lactide et poly( $\epsilon$ -caprolactone)), afin de maîtriser et d'améliorer les propriétés finales de ces nanocomposites. La voie de préparation qui a été utilisée pour élaborer ces nanocomposites biodégradables est la voie chimique : polymérisation in-situ par complexation-insertion durant laquelle le monomère liquide ( $\epsilon$ -caprolactone) ou en solution (lactide) migre vers l'espace interfoliaire afin d'atteindre les sites hydrophobes de l'argile organomodifiée. La réaction de polymérisation est ensuite déclenchée en utilisant un initiateur de polymérisation préalablement intercalé entre les couches, utilisé soit directement sous sa forme soluble ou préalablement hétérogénéisé sous forme de nanoparticules argileuses.

Pour atteindre nos objectifs, il a été nécessaire de réaliser les tâches ci-après :

### I-Préparation et modification de l'argile naturelle

- Extraction et caractérisation de la partie fine de l'argile marocaine (stévensite, palygorskite et bentonite);
- Préparation des cations ammoniums et phosphoniums quaternaires pour l'échange cationique et pour la polymérisation in situ du  $\epsilon$ -caprolactone en présence d'argile;
- Préparation et caractérisation de l'argile organophile (organomodifiée) par échange cationique entre les cations de l'argile naturelle (stévensite, palygorskite et bentonite) et des cations ammoniums et phosphoniums organiques.

### II- Synthèse et utilisation de nouveaux catalyseurs organométalliques de la polymérisation par ouverture de cycle de $\epsilon$ -CL et du LA avec et sans nanocharges

- Synthèse des trialkoxydes de bismuth ( $\text{Bi}(\text{OR})_3$ )
- Synthèse de tétra(alcynyl)étain
- Evaluation de l'activité des catalyseurs préparés vis-à-vis de la polymérisation et de la copolymérisation de  $\epsilon$ -caprolactone et des lactides.

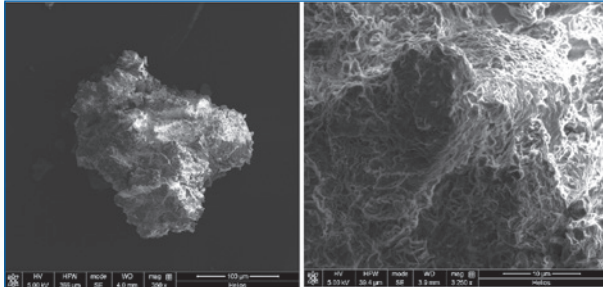
### III- Elaboration de nanocomposites poly ( $\epsilon$ -caprolactone)/Argile par polymérisation in-situ de $\epsilon$ caprolactone en présence d'argile

Principaux résultats Scientifiques obtenus

Le présent projet a permis de réaliser de grandes avancées à savoir i) au niveau de l'extraction, caractérisation, organo-modification et valorisation des argiles marocaines dans le domaine des matériaux composites et nanocomposites, ii) dans le domaine de la catalyse et de la polymérisation des esters cycliques.

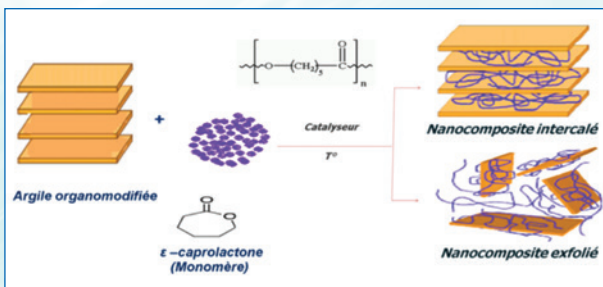
Les objectifs fixés du projet ont été atteints et des résultats originaux ont été obtenus. Ainsi,

nous avons pu mettre au point des protocoles expérimentaux adéquats et spécifiques pour l'extraction et la purification de chaque type d'argile (lamellaire ou fibreuse).



**Figure 1 :** Micrographies MEB de la bentonite non modifiée (A) Dimension des agrégats de l'ordre de 100 µm (B) Structure en chou-fleur avec une porosité importante

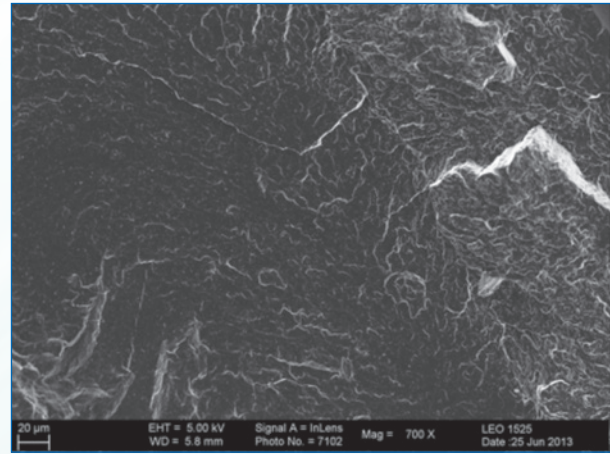
Ces dernières ont été modifiées par des cations ammoniums et phosphoniums à chaînes alkyles variables. Plusieurs méthodes de caractérisation de ces argiles organophiles ont été sollicitées à savoir la diffraction des rayons X, la microscopie électronique à balayage, l'analyse thermique ATG, ATD, DSC, la volumétrie d'adsorption et desorption d'azote. Il est à noter que lors de cette partie de recherche nous avons aussi pu synthétiser des liquides ioniques «cations ammoniums» qui ont été utilisés avec succès comme catalyseurs de polymérisation de ε-caprolactone, ce qui constitue une étude originale qui n'a jamais été décrite dans la littérature.



**Figure 2 :** Synthèse des nanocomposites

Par ailleurs, puisque l'objectif principal de notre étude était la valorisation des argiles marocaines par le développement de nouveaux matériaux nanocomposites biodégradables Poly lactide/ Poly(ε-caprolactone)-argile marocaine par polymérisation in situ des lactides et de ε-caprolactone en présence d'argiles de nouveaux complexes à bases de bismuth (trialcoxydes de Bismuth(III)) et d'étain (tétra(alcynyl)étain)

ont été préparés et utilisés avec succès comme catalyseurs pour la polymérisation par ouverture de cycle (POC) des lactides et de ε-caprolactone avec et sans nanocharges argileuses.



**Figure 3 :** Micrographies MEB du nanocomposite PCL/Bentonite non modifiée à 5% d'argile

Lors de cette partie de recherche, un travail original sur l'élaboration de nanocomposites PCL/Bentonite a été réalisé avec le tétra(alcynyl)étain comme catalyseur de polymérisation in situ de ε-caprolactone. En effet, Le complexe d'étain, nous a permis de surmonter les problèmes généralement engendrés par les nano-charges argileuses pour l'obtention des polymères avec des masses molaires élevées par des réactions de polymérisation in-situ de ε-caprolactone, en présence de la bentonite modifiée ou non. Ainsi, avec le tétra(alcynyl)étain, la détermination des masses molaires moyennes des matériaux élaborés a conduit à l'obtention de masses très élevées (supérieur à 20 000Da) bien que la polymérisation a été réalisée à l'air, chose, à notre connaissance, n'a jamais été rapportée auparavant. Ces résultats très intéressants ouvrent la voie à une application à l'échelle pilote afin de prévoir une exploitation à l'échelle industrielle de notre approche.

Parallèlement des études de polymérisation avec les catalyseurs préparés ont été réalisées pour l'élaboration de nouveaux copolymères diblocs biodégradables, amphiphiles et stimulables (poly(ε Caprolactone-block-poly(oligo(ethylene glycol)methyl ether methacrylate (OEGMA))), susceptibles d'être employés dans des applications respectueuses de l'environnement comme le traitement des eaux contaminées. La particularité de ces copolymères provient, d'une



part, de la différence de solubilité des deux blocs et d'autre part de l'association d'un bloc hydrophobe biodégradable à un bloc stimuable hydrophile. Les propriétés de ces copolymères en milieu aqueux ont été évaluées en fonction de la température.

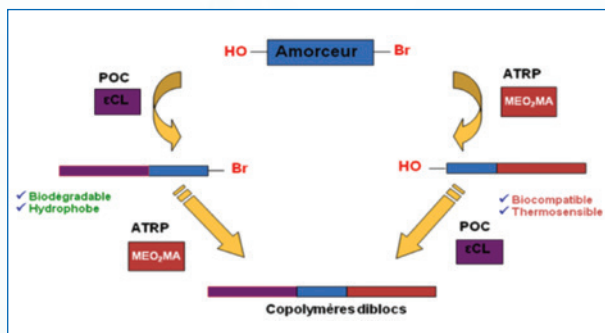


Figure 4 : Stratégies de synthèse des copolymères diblocs

Ces composés ont été obtenus par la combinaison de deux techniques de polymérisation contrôlée; la polymérisation par ouverture de cycle (POC) de  $\epsilon$ -caprolactone à partir d'un macroamorceur de poly(méthacrylate de méthoxyéthoxyalkyle) à terminaison OH ou par polymérisation par transfert d'atome (ATRP) du méthacrylate d'oligo(éthylène glycol) par utilisation de poly( $\epsilon$ -caprolactone) à terminaison Br comme macroamorceur.

Les températures critiques transitions de solubilité (LCST) des copolymères ont été déterminées par UV visible et leurs comportements micellaires ont été étudiés par des mesures de taille par HPPS et le MET.

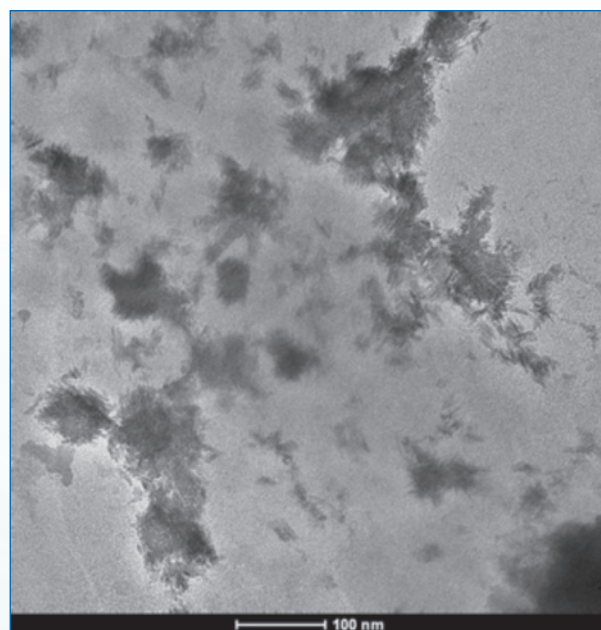
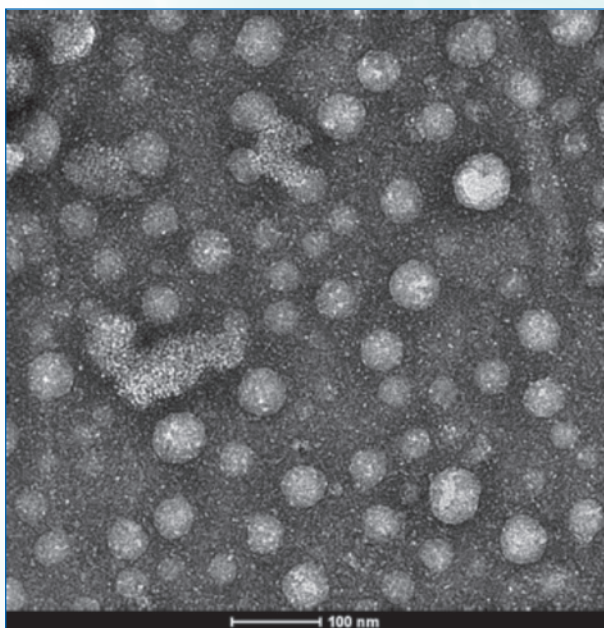


Figure 5. Micrographies du MET montrant l'évolution de la morphologie hydrodynamique des micelles lors de refroidissement à deux températures. (a) 25 ° C et (b) 15 ° C.

L'association des ses polymères aux argiles est en cours de réalisation, un étudiant en deuxième année de master 2 vient d'être recruté pour finaliser les études physicochimiques des ces matériaux hybrides.

## Retombées scientifiques et socio-économiques du projet

### 1- Articles scientifiques

Les résultats obtenus lors de ce projet de recherche ont conduit à six publications apparues dans des journaux scientifiques spécialisés de haut facteur d'impact et à deux autres publications soumises en janvier 2016 :

- M. IlSouk, M. Raihane, M. Lahcini, V. Castelvetro, S. Bronco, B. Rhouta "Titanium complexes catalysts for the preparation of Polybutylene adipate/ Moroccan clay bionanocomposites by in-situ polycondensation reaction", Manuscript submitted to Macromol.Chem and Physics, (January 2016);
- Mohammed Lahcini, Daniel Szopinski, Björn Neuer, Felix Scheliga, Raihane Mustapha, Abdelkrim EL Kaddib and Guerit Luinstra, "Tetra(phenylethynyl) tinCatalyst for the in-situ Preparation of Polycaprolactone Halloysite Nanotubes Bionanocomposites", (Manuscript submitted to Polymer Internationalin Juanray 2016);

- Hicham Qayouh, Cécile Nouvel, Jérôme Babin, Mustapha Raihane, Jean-Luc Six, Mohammed Lahcini, "Thermo-sensitive and environmental friendly diblock copolymers obtained via ATRP/ROP combination", *Industrial Crops and Products*, 72, 60-68, 2015;
- Asmae Kaoukabi, Frédéric Guillen, Hicham Qayouh, Asmaa Bouyahya, Sébastien Balieu, Larbi Belachemi, Géraldine Gouhier and Mohammed Lahcini, "The Use of Ionic Liquids as an Organocatalyst for controlled Ring-Opening Polymerization of  $\epsilon$ -Caprolactone", *Industrial Crops and Products*, 72, 16-23, 2015;
- El Ghaoui, Hanane; Raihane, Mustapha; Rhouta, Benaissa; Bitinis, Natacha; Carlmak, Anna; Arroyo, Miguel; Verdejo, Raquel; Machado, Miguel; Lahcini, Mohammed, "Bismuth Complex Catalysts for the in-situ Preparation of Polycaprolactone-Silicates Bionanocomposites", *Polymer International*, 63, 709-717, 2014;
- Benaissa Rhouta, Ezzouhra Zatile, Lahcen Bouna, Omar Lakbita, Francis Maury, Lahcen Daoudi, Marie Christine Lafont, M'Barek Amjoud, François Senocq, Ahmed Aït Aghzzaf, «Comprehensive physicochemical study of dioctahedral palygorskite-rich clay from Marrakech High Atlas (Morocco)", *Physics and Chemistry of Minerals*, 2013, vol. 40 (n 5), pp. 411-424;
- Sirpa Vuorinen, Mohammed Lahcini, Timo Hatanpää, Markku Sundberg, Markku Leskelä, Timo Repo, "Bismuth(III) Alkoxide Catalysts for Ring—Caprolactone", *Macromolecular Chemistry and Physics* 214 (6), 707-715, 2013
- M. Ahrouch, M. Hamdaoui, M. Hadri, L. Bounab, K. Draoui, A. Barhoun, «Nouveaux nanomatériaux hybrides à base d'argiles de la région nord du Maroc pour le traitement de la pollution hydrique». *IIIèmes Journées Internationales «Matériaux et Environnement»*, Settat, 18-19 mars 2015.
- Bentahar Y., Hurel C., Draoui K., Khairoun S., Marmier N., "Comparison of arsenic adsorption on clays from Morocco", *Conference au 248th National Meeting of the American-Chemical-Society (ACS)*, San Fransisco, USA, 10-12 août 2014.
- H. El ghaoui, M. Lahcini, M. Raihane, B. Rhouta, M. A. López-Manchado, R. Verdejo, M. Arroyo, "Preparation of layered silicate polycaprolactone nanocomposites by in situ ring opening polymerization", *Third Edition of International Conference on Biobased Materials and Composites (ICBMC 14)*, Montréal, Canada, 13-16 Juin 2014.
- Mustapha Raihane, Mohamed IIsouk, Mohammed Lahcini, Valter Castelvetro, Simona Bronco, Sabrina Bianchi, Hamid Kaddami, \$ "Titanium complex catalyst for in situ preparation of poly(butylene adipate)/Moroccan Clay bionanocomposites", *30<sup>th</sup> International Conference of the Polymer Processing Society (PPS-30)*. Cleveland, Ohio, USA, June 8-12, 2014.
- M. IIsouk, M. Raihane, M. Lahcini, V. Castelvetro, S. Bronco, S. Bianchi, B. Rhouta, "Nanocomposites based on Biodegradable Aliphatic polyesters and Moroccan Clay: Preliminary study", *European Polymer Congress (EPF)*. Pisa (Italy) 16-21 June, 2013.
- H. Elghaoui, M. Lahcini, M. Raihane, B. Rhouta, M. A. Lopez-Manchado, R. Verdejo, M. Arroyo, M. Bousmina, "Preparation of nanocomposites poly( $\epsilon$ -caprolactone) / modified montmorillonite by in situ ring-opening polymerization of  $\epsilon$ -caprolactone", *International Conference on Biobased Materials and Composites (ICBMC'12)*, Marrakech, Maroc, 22-24 Février 2012.
- F. Moujtazi, M. Raihane, M. Lahcini, B. Rhouta, M. IIsouk, H. Kaddami, L. Belachemi, M. Bousmina, "Synthesis of green nanocomposites polymer/modified moroccan clay by in situ ring-opening polymerization of  $\epsilon$ -caprolactone: preliminary

## 2- Conférences et communications orales internationales et nationales

Les résultats obtenus ont été présentés dans plusieurs manifestations scientifiques internationales sous forme de communication, keynote et conférences.

### 2-1- Communications orales

- M. Afilal, M. Ahrouch, M. Hamdaoui, K. Draoui, A. Barhoun, «Analyse de la potentialité de valorisation des argiles de la région nord du Maroc dans l'industrie céramique», *IIIèmes Journées Internationales «Matériaux et Environnement»*, Settat, 18-19 mars 2015.

study”, International Conference on Bio-based Materials and Composites (ICBMC'12), Marrakech, Maroc, 22-24 Février 2012.

- M. Lahcini, A. Boujemaoui, H. Kaddami, L. Carlsson, E. Malmström, H. Sehaqui and A. Carlmark, “Surface-initiated ring-opening polymerization of  $\epsilon$  caprolactone on high surface area nanopaper using titanium n-butoxide as catalys”, International Conference on Bio-based Materials and Composites (ICBMC'12), Marrakech, Maroc, 22-24 Février 2012.

### **2-2- Conférences plénières et Keynotes Conférences dans des congrès internationaux**

- Mohammed Lahcini «Sn(IV) Complexes as Initiators for the preparation of biodegradable polymers» Malta VII November, 15-20 2015. Frontiers of Science: Research and Education in the Middle East A Bridge to Peace in. Rabat, Morocco.
- Khalid Draoui, «Etude de l'efficacité des matériaux hybrides et des nanocomposites à base d'argiles pour la lutte contre la pollution», conférence d'ouverture du 3<sup>ème</sup> colloque international, Matériaux, Pollution et Environnement MPE14, Tanger, 19-20 Février 2014.
- Mohammed Lahcini, “Metal complexes based on tin(IV) and bismuth(III) catalysts for the preparation of biodegradable polymers”, Global School for Advanced Studies (GSAS), Doha-Qatar, 6-8 January 2013.
- Mohammed Lahcini, “Bismuth(III) Complexes Catalysts for the Ring-Opening Polymerization of  $\epsilon$ -Caprolactone”, International Conference on Bio-based Materials and Composites (ICBMC'12), Marrakech, Maroc, 22-24 Février 2012.
- Khalid DRAOUI “Caractérisation et valorisation des argiles de la région Nord du Maroc» Rencontre Marocaine sur la Chimie de l'Etat Solide REMCES 12, Casablanca, Maroc 21-23 novembre 2012

### **3- Organisation de manifestations scientifiques**

- 4<sup>ème</sup> Journée Argiles et Développement Durable, (04 juin 2015) qui fut l'occasion de regrouper les différents partenaires du projet (chercheurs et étudiants) pour discuter les résultats ainsi

que le développement de future collaboration sur la thématique de bio-composites et nanocomposites.

- Congrès international “International Conference on Bio-based Materials and Composites (ICBMC'12)”, Marrakech, Maroc, 22-24 Février 2012. Ce congrès a connu la participation de plus de 140 chercheurs de 18 pays différents. Lors de ce congrès des conférences dans le domaine des composites et nanocomposites ont été animés par des chercheurs internationaux partenaires et invités de haut niveau.

### **4- Encadrement de travaux de fin d'études (formation de Master)**

Treize stages de fin d'études ont été réalisés sur des sujets en relation avec le projet par nos étudiants de master 2 dont cinq continuent à travailler sur le sujet en tant que doctorant au sein de notre laboratoire.

### **5- Soutenance de thèses de doctorat**

Parmi les thèses qui ont été démarrées dans le cadre de ce projet, deux ont été soutenues :

- Thèse de Mlle. Hanane ELGHAOUI, soutenue le 23 Avril 2015. Titre “Synthèse et caractérisation des Nanocomposites biodégradables à base de poly $\epsilon$ caprolactone/argiles par polymérisation in situ”;
- Thèse de Mr. Hicham QAYOUH, soutenue le 17 Décembre 2013. Titre : Copolymères diblocs amphiphiles et thermostimulables : synthèse contrôlée et étude préliminaire de leur auto-organisation”.

### **6- Renforcement de l'infrastructure de recherche au sein de l'établissement**

Grâce au financement obtenu dans le cadre de ce projet par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, nous avons pu acquérir du matériel de synthèse et de caractérisation des polymères et composites (Homogénéiseur Ultra-Turrax T25, Agitateurs RCT Basic Safety chaffant, Pompe palette type RZ 6 Vacuubrand W63457, Balance et Summit 400g/1mg et Spectrophotomètre UV-Visible Jasco type V-630). Ces appareils ont notamment permis de faciliter la réalisation de stages de fin d'études des étudiants de Masters.

## **7- Ouverture à l'international et pérennité de la recherche dans le domaine des biomatériaux et biocomposites**

Suite aux résultats des travaux de recherche obtenus dans le cadre de ce projet notre équipe a pu développer de fructueuses relations avec des laboratoires internationaux de renommée (Université de Helsinki, KTH-Stockholm, Université de Hambourg, Université de Rouen, CSIC-Madrid, Université Paris VI...). A travers ces collaborations plusieurs projets internationaux ont été décrochés et coordonnés par notre équipe de recherche.

## **8- Conclusion**

Depuis une décennie, des efforts considérables ont été déployés par l'Université Cadi Ayyad dans le but d'acquérir des compétences dans le domaine des matériaux et principalement des composites et nanocomposites.

Les recherches proposées dans le cadre de ce projet sont d'actualité et s'inscrivent toutes dans la continuité des thématiques de l'UCA et s'alignent donc parfaitement avec les orientations et visions de notre université en termes de recherche et développement. Ainsi, l'équipe des Prs K. Draoui, et B. Rhouta partenaires du présent projet se sont familiarisés via ce projet avec les techniques d'extraction, de purification et de caractérisation minéralogiques et physico-chimiques des argiles. Nous disposons aujourd'hui d'une banque de données importantes relatives à cette ressource minérale. Leurs connaissances permettront donc de tracer une feuille de route par rapport aux charges d'argiles les plus prometteuses. L'équipe du Pr. Lahcini, coordonnateur du projet, quant à elle a acquis une expérience exhaustive dans la polymérisation par ouverture de cycle, comme l'atteste les articles de haut niveau publiés récemment par l'équipe.

En outre, le financement a permis de créer une plateforme de collaboration fructueuse entre les équipes Marocaines et Espagnoles impliquées dans le projet dans un domaine lié à l'environnement et au développement durable. Par ailleurs, l'équipe du Pr. Lahcini a pu en outre entretenir de fortes interactions avec des laboratoires internationaux leaders dans ce domaine. Sans donner de liste exhaustive, l'équipe collabore avec le Professeur Hans Rytger Kricheldorf et Gerrit A. Luinstra, de l'Institute of Technical and Macromolecular Chemistry of University of Hamburg (TMC) qui sont des spécialistes de renommée mondiale et des experts auprès de plusieurs compagnies dans les domaines des biopolymères et biocomposites.

Au niveau de la formation, plusieurs filières (Licence, master et filière d'ingénieur) s'inscrivent dans le domaine des matériaux ont été mises en place et ont permis de pallier aux besoins aussi bien au niveau du marché de l'emploi qu'au niveau des étudiant-chercheurs des laboratoires.

## Collaborations science - industrie et innovation dans les firmes françaises. Impacts et déterminants \*

Safaa AISSAOUI

### Rapport du jury

Dirigée par Stephen Bazen et Bénédicte Serrate et soutenue le 03 novembre 2011, devant le jury composé de Olivier Brossard (professeur à l'Université Toulouse 1 Capitole, rapporteur), Patrick Musso (professeur à l'Université Nice Sophia Antipolis, président), André Torre (directeur de recherche à l'INRA à Agro Paris Tech, rapporteur), la thèse primée de Safaa Aissaoui traite de la problématique des interactions science- industrie et leur impact sur l'innovation. Le test empirique a porté sur des firmes françaises.

Le plan de la thèse s'articule autour de trois parties et six chapitres.

Construit sur des faits stylisés, le premier chapitre, met en évidence l'importance de l'innovation dans l'économie fondée sur la connaissance et le rôle que peut jouer l'université en tant qu'acteur de production et de diffusion des connaissances.

Dans le second chapitre l'auteur détermine comment les connaissances sont échangées à un niveau inter-organisationnel pour permettre la création de nouvelles connaissances, utiles pour l'activité d'innovation. Sont examinées dans ce chapitre aussi bien les théories de la firme que les théories de l'économie de la science, pour identifier les fondements théoriques des collaborations entre les entreprises et le monde académique. Une typologie des différentes formes de collaboration est proposée.

Mobilisant le modèle en chaîne interconnectée, l'auteur considère, au chapitre trois, que l'innovation est un processus interactif impliquant des relations avec la science à différents stades du processus d'innovation.

Le quatrième chapitre se focalise sur la détermination de l'impact des collaborations science- industrie sur l'innovation des firmes (cas français).

Le cinquième chapitre concerne les déterminants des collaborations science-industrie.

Enfin, le dernier chapitre analyse les déterminants de ces collaborations sur un territoire comprenant un technopôle de haute technologie et une université multidisciplinaire. Les résultats des enquêtes réalisées - l'une auprès d'entreprises et l'autre auprès de chercheurs - met en évidence une hétérogénéité des collaborations science-industrie.

L'auteur conclue sur la nécessité d'une prise en compte de facteurs susceptibles d'assurer un transfert efficace de connaissances entre les entreprises et les organismes de recherche.

L'auteur a mobilisé une littérature abondante et «updated» embrassant une large palette allant des théories sur le progrès technique, aux approches plus récentes relatives au transfert des connaissances, au système d'innovation national et régional, au processus entraînant l'innovation au sein des firmes, au rôle de la proximité géographique dans les externalités liées aux connaissances, notamment tacites.

Pour rendre compte du rôle des interactions science-industrie, est adoptée l'approche par les systèmes d'innovation que l'auteur décline en termes d'espace :

- d'abord en termes de systèmes nationaux d'innovation (SNI), en dégagant le rôle des institutions académiques dans l'innovation. La thèse met en évidence un effet positif et significatif de l'impact des collaborations

\* L'Association Marocaine des Sciences Economiques (AMSE) a attribué son prix de thèse à Mme SAFAA AISSAOUI de l'université de Grenoble. Ce prix est soutenu par l'Académie Hassan II des Sciences et Technique dans le cadre des actions d'appui à la recherche scientifique et technique.

science-industrie sur la probabilité de dépôt de brevets. Le modèle économétrique utilisé permet de tenir compte des spécificités des données françaises.

- ensuite, en termes de systèmes régionaux d'innovation (SRI), en prenant en considération la diversité des collaborations science-industrie, les motivations des chercheurs. Safaa Aissaoui montre ainsi que «le type de collaboration influence différemment les firmes qui collaborent avec des institutions académiques pour avoir accès à des connaissances complémentaires qu'elles ne peuvent développer en interne.» Certaines firmes sont principalement orientées vers l'innovation et ont pour principale caractéristique la durabilité dans le temps. Pour ce qui est des enseignants-chercheurs, les résultats dégagés montrent, entre autres, que leur comportement est influencé par la stratégie de l'université.

Les membres du Jury ont souligné plusieurs qualités de forme et de fond :

- au niveau de la forme, la thèse est bien structurée, les développements théoriques ont fait l'objet

d'une appropriation pertinente, les liens entre les énoncés théoriques et les usages analytiques ont été correctement établis, etc. Bref, le travail renoue avec les «bonnes pratiques», c'est-à-dire avec les formes «classiques» de la thèse.

- au plan méthodologique, le Jury a relevé l'existence d'une démarche en termes de problématisation. En d'autres termes, l'auteur a une thèse à défendre, ce qui n'est pas le cas de bon nombre de travaux soutenus aujourd'hui au Maroc ou à l'étranger.
- la thèse comporte une valeur ajoutée personnelle fondée sur les instruments et les outils mis à contribution (enquêtes, modélisation).

Au total, la thèse comporte un apport indéniable à la recherche, notamment au Maroc. Toutefois, dans la perspective de sa publication, le travail gagnerait à :

- renforcer les dimensions analytiques générales par rapport à l'étude de cas.
- enrichir la portée de la thèse en la prolongeant au cas marocain.



## Le Congrès de l'Arganier : une opportunité de capitalisation des connaissances et de promotion de la recherche \*

Abdelkarim FILALI-MALTOUF <sup>1</sup>, Abderrahmane AITLHAJ <sup>2</sup>

*1- Membre Correspondant, Académie Hassan II des Sciences et Techniques*

*2- Appui à la Recherche, Direction de Développement des Zones de l'Arganier, ANDZOA, Agadir*

Ce Congrès a été organisé du 17 au 19 Décembre 2015 à Agadir, sous le haut patronage de Sa Majesté le Roi Mohamed VI, par l'Agence Nationale pour le Développement des Zones Oasiennes et de l'Arganier (ANDZOA), le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, le Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification et l'Institut National de la Recherche Agronomique.

Le Congrès arganier est un événement qui se tient tous les deux ans et qui a pour objectifs le partage des connaissances scientifiques et techniques entre les chercheurs nationaux et internationaux, les gestionnaires forestiers, les acteurs économiques et les institutions, ainsi que la contribution à la mise en œuvre du Contrat Programme de la filière de l'arganier sur des bases scientifiques solides.

Cette troisième édition de la série a visé la stimulation des dynamiques d'articulation entre la recherche fondamentale et finalisée, l'expertise technique et l'aide à la prise de décision. Elle a constitué un moment d'échange scientifique mettant en exergue le rôle de la recherche et l'exploitation de ses résultats au service du développement durable et intégré de l'arganier et de l'espace arganeraie.



Vue de l'assistance

Au cours de cette édition, organisée sous le thème «l'Arganier: patrimoine universel porteur de richesse à conserver et à valoriser», un large éventail de thèmes a été traité autour de quatre axes:

1. Ecosystème de l'Arganeraie: structure et fonctionnement. Les communications présentées ont traité des aspects relatifs au sol, à la faune et à la flore de l'écosystème arganeraie ainsi que des outils de gestion de l'arganeraie (cartographie et Système d'Information de Gestion – SIG, et de l'écologie de l'arganeraie.
2. Agroforesterie, intensification et biotechnologie. Il a été présenté les recherches menées en écophysiologie et production de plants, pour le développement de l'arganiculture et agronomie de l'arganier ainsi que l'amélioration génétique de l'arganier.
3. Valorisation, économie et commercialisation des produits de l'arganeraie. Lors de ce volet ont été traités des aspects relatifs à la valeur santé de l'huile d'argane, à l'économie et l'organisation de la filière, la qualité de l'huile ainsi que les innovations technologique et les voies de valorisation.
4. Patrimonialisation, changement sociaux et aspects juridiques. Ce volet a mis l'accent sur de nouvelles dimensions de l'arganeraie, à savoir le patrimoine, mettant en relief l'interaction entre l'homme et son écosystème. Cet aspect étant une composante clé de la valeur globale de l'écosystème.

\* Les chercheurs du Consortium du projet financé par l'Académie «Caractérisation génétique moléculaire et multiplication par microbouturage d'arganiers adaptés à des conditions éco-climatiques extrêmes» (ArganBiogen) ont, dans ce cadre, présenté les avancées importantes de leur recherche dans le domaine.



Le Pr. FILALI-MALTOUF lors de la session sur l'axe  
Agroforesterie, intensification  
et biotechnologie

Au total ont eu lieu 14 sessions animées par une conférence inaugurale, 136 communications dont 76 orales et deux tables rondes. Le partage des résultats de recherche par les conférenciers avec l'ensemble des congressistes a offert une opportunité de débat intéressant.

Les activités organisées dans le cadre de ce Congrès ont été lancées en rappelant le contexte global de l'évolution de l'arganeraie et de l'arganier en particulier et en mettant l'accent sur ses rôles multiples : économique, social et environnemental. Cette troisième édition a mis en exergue l'importance de l'interaction Homme/Écosystème qui génère un patrimoine porteur de richesse à valoriser au profit des professionnels et des acteurs locaux. Mais aussi en tenant compte des divers changements et mutations au niveau global, régional et local, à savoir les changements climatiques, les mutations sociales et culturelles, les changements économiques et techniques... etc.

Le plan Maroc vert, la création de l'ANDZOA, le contrat programme arganier entre l'INRA et l'ANDZOA, les organisations professionnelles et les nouvelles structures fédératrices de la filière arganier, l'évolution positive du marché international des produits de l'arganier sont des atouts majeurs pour la filière et son territoire. Il convient également de saluer l'apport de la recherche scientifique et le dynamisme des institutions et des équipes pour éclairer les efforts entrepris.

Cette troisième édition a connu un grand succès par la qualité et le nombre des communications

présentées et le nombre de participants nationaux et internationaux. Elle a encore montré la richesse de la production scientifique sur le sujet ainsi que l'engagement des chercheurs pour innover et traiter les différentes questions relatives à l'arganier et son écosystème ainsi que la promotion de l'agriculture. La contribution des professionnels aux débats scientifiques a prouvé que les travaux entamés répondent aux besoins de développement de l'arganier.

### Recommandations :

1- Orienter la recherche scientifique vers la réhabilitation de l'ensemble de l'écosystème, pour ceci il faut :

- Actualiser les bases de données sur l'arganeraie et l'arganier en vue d'une meilleure orientation et gestion des programmes de préservation, de réhabilitation et de valorisation;
- Encourager des projets de recherche pour la promotion de la réhabilitation de l'écosystème arganeraie en particulier pour développer la restauration écologique;
- Intégrer les études sur la biodiversité dans l'arganeraie comme composante clé de la "valeur globale" de l'écosystème dans la perspective de sa valorisation;
- Exploiter les résultats atteints sur les «mécanismes d'adaptation» chez l'arganier étudiés et identifiés au laboratoire pour la production du matériel végétal adapté nécessaire pour la mise en œuvre des projets de réhabilitation et de l'agriculture en partenariat avec les professionnels;
- Approfondir l'analyse de la diversité génétique qui caractérise l'arganier en vue de la conservation du «patrimoine génétique» et sa valorisation pour la sélection de variétés performantes;
- Mettre en place un programme de sélection génétique coordonné, multidisciplinaire et construit sur tous les travaux et résultats réalisés en vue de réussir l'agriculture;
- Renforcer les recherches sur l'agriculture pour la mise en place d'un itinéraire technique de production de plants et de conduite de verger d'arganier et élaborer un référentiel technique.



- 2- La valeur santé de l'huile et des autres produits de l'arganier étant démontré par plusieurs recherches, il est nécessaire de:
- Encourager des projets de recherche pour l'exploration des différentes actions de l'huile d'Argane sur certaines maladies en particulier les pathologies lourdes ;
  - Encourager le travail pluridisciplinaire sur les aspects santé et bien-être (études cliniques, biochimie, physiologie...) en vue de plus d'efficacité.
- 3- L'espace Arganeraie est riche en symbolique et en diverses formes patrimoniales, ce qui constitue un atout à exploiter au profit de la population et du territoire. Des actions spécifiques de recherche doivent être mises en place pour :
- Appuyer et renforcer les recherches dans le domaine social de l'écosystème arganeraie ;
  - Appuyer et renforcer les recherches sur les questions d'économie de la filière, de l'écosystème et des divers services assurés par l'arganeraie;
  - Elaborer une Base de données sur les savoirs et pratiques dans l'espace arganeraie;
  - Renforcer la recherche sur les questions liées au patrimoine en termes de caractérisation, de valeur, de conservation et d'usage au profit des populations et du territoire.
- 4- Sur des aspects horizontaux et d'ordre général, il serait opportun de:
- Elaborer un lexique normalisé et des terminologies partagées, dans le domaine de la recherche, spécifiques à l'arganier et l'arganeraie ;
  - Encourager le réseautage des équipes de recherche et des chercheurs pour mutualiser l'exploitation des moyens et l'optimisation des efforts;
  - Mettre en place un programme de recherche commun et des mécanismes de financement de la recherche spécifiques;
  - Renforcer la coordination et l'animation de la recherche par la mise en place du «Centre National de l'Arganier»;
  - Promouvoir de nouvelles approches et techniques de communication et d'éducation en vue d'une promotion éclairée et d'une implication des jeunes générations.

Pour plus de détail, voir :  
<http://www.congresarganier.com/>





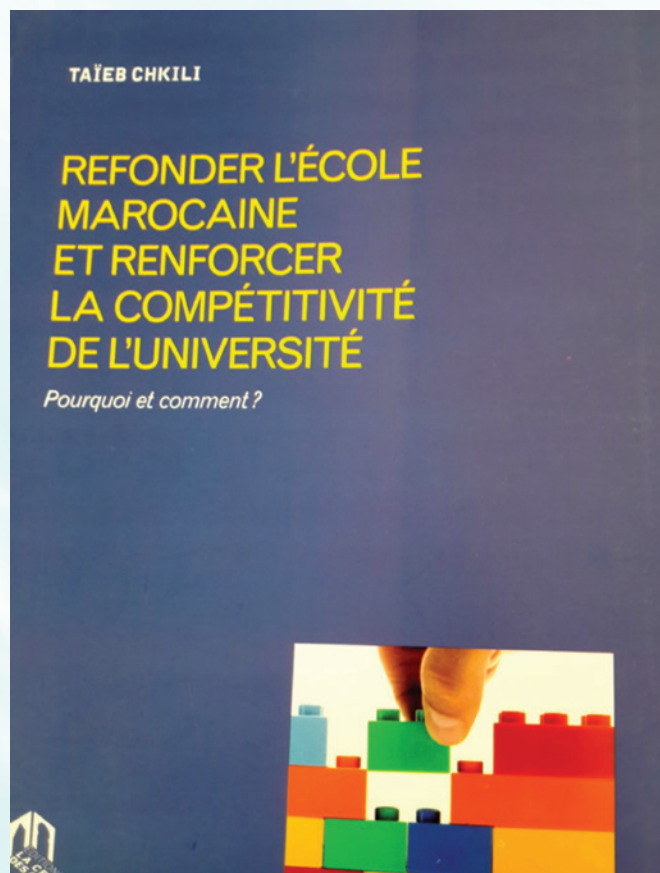
## **Nouvelles des académiciens**



### Parution d'un ouvrage du Pr. Taïeb CHKILI



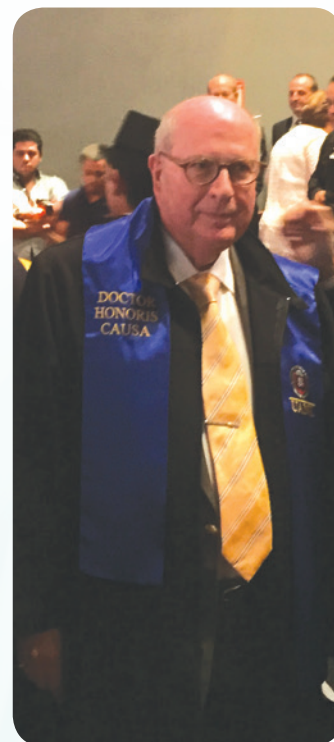
Cet ouvrage a pour objectif de placer la problématique éducative au Maroc dans son contexte historique, politique, économique, social, culturel, éthique et écologique. Il entend également contribuer au débat sur cette problématique en présentant le système éducatif marocain dans sa globalité, à travers l'analyse de ses composantes d'enseignement, de formation et de recherche, dans ses aspects quantitatifs et qualitatifs, en dégageant les acquis et les points forts qui doivent être renforcés, ainsi que les potentialités offertes, tout en soulignant les lacunes et dysfonctionnements qu'il devient urgent de corriger.



**Le Professeur Albert Sasson fait  
Docteur honoris causa  
de l'Université Autonome de NUEVO LEÓN  
(Mexique)**

L'Université Autonome de Nuevo León (UANL, Monterrey, Mexique) a décerné, le 10 septembre 2015, la distinction académique de Docteur honoris causa au Professeur Albert Sasson, membre de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et directeur du Collège des sciences et techniques du vivant et ce, pour «ses recherches exceptionnelles dans le domaine de la microbiologie des sols, de l'agrobiologie des sols et de l'environnement».

Une réception fut donnée le même jour en présence du Recteur, du Secrétaire général et du corps enseignant de l'Université.



**Le Professeur Abdeljabbar El Manira  
élu membre de la prestigieuse  
Académie royale des sciences de Suède**



L'Académie royale des sciences de Suède a décidé, lors de son Assemblée générale du 11 novembre 2015, d'élire le professeur Abdeljabbar El Manira comme membre étranger de la sixième classe des sciences de la vie», l'un des dix domaines scientifiques ou classes que comporte cette prestigieuse institution.

Membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques depuis 2013 (Collège des sciences et techniques du vivant), El Manira est professeur distingué (Chair d'excellence) au Département de neuroscience, directeur du Laboratoire neurobiologie des mouvements à l'Institut de Karolinska (Suède), Université de médecine de Stockholm qu'il a intégré en 1992 et dont le Comité désigne le Prix Nobel de physiologie ou de médecine.

Le Pr El Manira avait été décoré en 2010 par SM le Roi Mohammed VI du Ouissam du Mérite national de l'ordre de commandeur.

