

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

n°21

juin 2017

«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



"Océan et climat : cas du Maroc"

Thème de la session plénière solennelle 2017

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

n°21
juin 2017

«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**

Site internet : 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

**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

Editorial 9

Océan et climat : cas du Maroc 11

- Allocution du Secrétaire Perpétuel à l'ouverture de la 12^{ème} session plénière solennelle..... 13
- Synthèse des travaux, Albert SASSON, Omar ASSOBEI, Ahmed EL HASSANI..... 17
- Role of oceans and seas in the regulation of the climate and the response of marine ecosystems to climate change, Carlos M. DUARTE..... 27
- Les implications économiques du réchauffement global, Daniel NAHON 33
- Hausse du niveau de la mer : observations et causes, Anny CAZENAVE..... 49
- Résumés des communications de la 12^{ème} session plénière solennelle 53

De la recherche à l'industrialisation : quel éclairage permet d'apporter l'échelle de mesure des Niveaux de Maturité des Technologies..... 59

- Allocution du Secrétaire Perpétuel à l'occasion de la commémoration du 11^{ème} anniversaire de l'installation de l'Académie 61
- Synthèse des travaux de la session anniversaire, Ali BOUKHARI, Mohamed SMANI, Mahfoud ZIYAD... 64

Activités de l'Académie..... 67

- Modélisation et prospective économique, compte rendu de la 9^{ème} session de l'école académique organisée par le Collège Etudes stratégiques et développement économique (CESDE), Nicolas MOUMNI 69
- Visite d'une délégation de l'Académie d'Agriculture de France (AAF) : Intervention de M. Gérard TENDRON, Secrétaire Perpétuel de l'AAF 72
- 9^{ème} congrès Pan Africain des Mathématiciens (PACOM 2017)..... 75
- Journées Nationales des Doctorants et des Jeunes Chercheurs..... 75
- Mathématiques Appliquées à des questions de Développement (MADEV17)..... 76
- Savoirs et patrimoines locaux : des atouts pour le développement des arrière-pays au Maroc dans un monde qui change..... 76
- Conférences..... 77

Les Conférences de l'Académie..... 79

- Le futur de l'exploration spatiale et le programme Galileo, Jean-Yves LEGALL 81
- L'instabilité structurelle du système international, Thierry de MONTBRIAL 88



Focus 97

- La macroéconomie est-elle une discipline empirique?, Redouane TAOUIL 99

Nouvelles des académiciens 107

- Décoration du Pr. Albert SASSON 109
- Parution d'un ouvrage collectif en modélisation mathématique avec la contribution de feu Abdelghani BELLOUQUID 110
- Contributions du Pr. El Mokhtar ESSASSI aux ouvrages "Advances in Chemistry Research" et "Molecular Technologies for Detection of Chemical and Biological Agents" 111
- Participation du Pr. Ali BOUKHARI au Forum GID-Parmenides VIII 114

Editorial

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a tenu sa session plénière solennelle annuelle les 21, 22 et 23 février 2017, sous le thème scientifique général «**Océan et climat – cas du Maroc**». Le choix de cette thématique couronne une série de manifestations scientifiques préparatoires organisées dans le cadre de la Conférence des Parties COP22, tenue à Marrakech. A titre d'exemple, ci-après les principales manifestations scientifiques, en relation avec la COP22, organisées par l'Académie :

- «**Adaptation, atténuation et résilience au changement climatique en Afrique : rôle de la science, de la technologie et de la coopération continentale**», cette manifestation a regroupé plus d'une quinzaine d'Académies des sciences Africaines du réseau NASAC (Network of African Sciences Academies).
- Séminaire «**Education et climat**» organisé avec la participation du Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle, "side event" de la COP22.
- «**Les méga-sécheresses**», "side-event" organisé par l'Académie lors de la COP22.
- «**Développement territorial et transition touristique en Méditerranée dans un climat qui change**».
- Conférence «**L'Afrique face au réchauffement climatique**» du professeur Jean Jouzel expert reconnu des sciences du climat et du changement climatique, le 17 mai 2016, à l'occasion de la session anniversaire de l'Académie.

Ces manifestations ont reçu le label COP22 et leurs recommandations et conclusions ont été transmises à la présidence de la COP22.

La session plénière solennelle annuelle 2017 a mis l'accent sur la thématique conjuguant les interactions et effets réciproques de l'océan et du climat. Le Maroc, avec plus de 3500 km de côtes, est concerné au premier chef par l'interaction climat océan, d'autant que les ressources halieutiques constituent une source de revenus substantiels des populations et contribuent en grande partie à leur sécurité alimentaire.

La session plénière solennelle annuelle 2017 a réuni des experts nationaux et étrangers des sciences du climat et de l'océan qui ont mis en exergue les effets conjugués du changement climatique et leurs impacts sur les océans, les implications et retombées économiques à l'échelle nationale et internationale ainsi que les moyens et structures de recherche à mettre en place, pour y faire face, en mettant l'accent tout particulièrement sur le cas du Maroc.

En plus des conférences et des discussions et débats qui ont suivi, l'organisation d'un panel pluridisciplinaire animé par des experts Marocains de différents domaines scientifiques et leur interaction avec les participants ont permis de dégager les perspectives de recherche dans le domaine du climat et de l'océan ainsi que le potentiel éventuel de retombées économiques et sociales à court et moyen terme. Les conclusions et recommandations de cette session ont mis l'accent particulièrement sur le renforcement des capacités d'adaptation et de résilience ainsi que la mise en place de structures de recherche en science du climat notamment, à même de faire face aux conséquences et retombées du changement climatique et de son impact sur les océans.

Dans ce sens, nous rappelons les orientations qui se dégagent du discours de Sa Majesté le Roi -que Dieu L'assiste- prononcé devant la Séance Solennelle de Haut Niveau de la 22^{ème} session de la Conférence des Parties à la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (COP22) tenue à Marrakech du 7 au 18 novembre 2016; **«Au nom du destin commun, et au nom de notre responsabilité historique, j'engage toutes les parties à œuvrer pour donner corps à notre attachement aux valeurs de justice et de solidarité à travers: Premièrement : la possibilité offerte aux pays du sud, et plus particulièrement aux pays les moins avancés et aux États insulaires, de bénéficier d'un soutien financier et technique urgent leur permettant de renforcer leurs capacités et de s'adapter aux changements climatiques;... Troisièmement : l'implication de tous les acteurs dans la facilitation du transfert de technologie et la nécessité d'œuvrer au développement de la recherche et de l'innovation dans le domaine du climat;...»**

Direction des Sciences



Océan et climat : cas du Maroc

**Allocution du Pr. Omar Fassi-Fehri
Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques ***



Messieurs les Ministres,

Excellences,

Honorables invités,

Chères Consœurs & Chers Confrères Académiciens,

Mesdames & Messieurs,

Il y a environ onze ans que, à l'occasion de l'installation le 18 mai 2006 de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, son Protecteur Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le garde, s'adressant à l'Assemblée formée des tout nouveaux membres marocains et étrangers, et définissant le rôle de la nouvelle Académie, insistait – et je cite – sur "l'importance du rôle que devront jouer nos scientifiques en général et les membres de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques en particulier, afin de contribuer à relever les défis du développement, et principalement ceux du développement humain".

Ainsi, l'Académie Hassan II, dans le cadre de ses activités notamment les sessions plénières et les sessions ordinaires, cherche avant tout à aborder des questions scientifiques dont les solutions permettent de contribuer au développement du pays; c'est ainsi qu'elle a traité à plusieurs reprises, entre autres, le problème de l'énergie, la question des énergies renouvelables, la transition énergétique, la question des risques naturels et les phénomènes climatiques extrêmes, la chimie et le développement durable, la crise alimentaire mondiale, les maladies émergentes et réémergentes...; certes il est vrai nous abordons essentiellement l'aspect scientifique, la compréhension des phénomènes, qui sont des étapes nécessaires et cruciales dans le processus de développement scientifique et technologique.

Nous nous devons aussi d'examiner l'aspect technologique, et mettre l'accent sur l'application des résultats scientifiques et servir ainsi le développement du pays, jusqu'à créer progressivement une technologie marocaine.

Historiquement aussi nous constatons que la mise en place des académies des sciences – au sens moderne – au XVII^{ème} siècle en Europe a conduit à des avancées scientifiques et technologiques remarquables, qui elles-mêmes ont été à la base de changements économiques et sociaux notables; c'est le cas par exemple des révolutions industrielles vécues depuis le 18^{ème} siècle, la première avec l'invention de l'émblématique machine à vapeur d'ue au physicien James Watt (membre de la Royal Society de London), elle même va conduire à l'invention du train, du bateau à vapeur, de la voiture, de la machine outils; la deuxième révolution industrielle est caractérisée par l'essor de l'électricité et du pétrole et verra l'invention du moteur à explosion; la troisième est la révolution numérique qui voit le développement de l'informatique et l'invention du microprocesseur; selon certains nous vivons déjà la quatrième révolution écologique qui touche tous les secteurs et qui est caractérisée par ce qu'on appelle l'énergie verte et l'économie circulaire (protection de l'environnement, préservation des ressources et recyclage des déchets). On peut en dire autant dans le domaine médical où grâce à la science, à la biologie moléculaire des avancées ont été assurées et des médicaments, qui ont grandement contribué à améliorer la qualité de notre vie et fait croître l'espérance de vie de nous tous.

Derrière toutes ces avancées nous trouvons des hommes et des femmes de sciences de talent qui ont établi les lois et théories qui ont conduit à toutes ces inventions.

(*) Allocution donnée lors de la Séance d'Ouverture de la 12^{ème} Session Plénière Solennelle de l'Académie, Rabat, 21 février 2017.

Excellences,**Honorables invités****Chers Académiciens,****Mesdames, Messieurs,**

Aujourd'hui, la science constitue plus que jamais l'enjeu majeur de nos sociétés et le facteur décisif de leur évolution. Depuis plus de trois siècles, la connaissance scientifique, ne fait que prouver ses vertus de vérification et de découverte. En augmentant les connaissances dont l'Homme dispose, la science accroît sans cesse sa maîtrise sur son environnement, lui permettant d'utiliser son imagination pour améliorer sa condition, s'adapter et faciliter son quotidien. Le savoir scientifique, construit au fil des siècles, en continu mouvement, a toujours été une source indéniable de progrès.

A ce titre, permettez-moi de saluer la déclaration intitulée «Science et confiance», adoptée par les Académies du monde, présentes à Paris le 27 septembre 2016 à l'occasion de la journée mondiale des sciences, qui à l'écoute des doutes qui s'installent parfois dans nos sociétés quant à l'utilité de la science, les Académies réunies à l'occasion de la célébration du 350^{ème} anniversaire de la création de l'Académie des Sciences de l'Institut de France, ont souhaité exprimer leur détermination à travailler au sein de la société. Elles renouvellent, à cette occasion, leur confiance dans l'éducation et dans la capacité de la recherche scientifique à contribuer au progrès de l'humanité.

Face aux enjeux majeurs de ce début du XXI^{ème} siècle – augmentation sans précédent de la population mondiale, raréfaction des ressources naturelles, déséquilibre des développements, dérèglement des équilibres planétaires – il est primordial que nos sociétés redonnent encore plus confiance à la science et s'appuient sur la démarche raisonnée de la pensée scientifique pour répondre de manière responsable aux questions d'aujourd'hui et aborder avec sérénité celles de demain.

Mesdames, Messieurs,

Au cours de l'année écoulée, l'Académie Hassan II a été particulièrement active, et à côté des actions qu'elle mène depuis maintenant plus de dix ans, comme notamment la promotion de la recherche et l'encouragement de l'excellence, et que nous détaillerons au cours de la séance du jeudi après-midi, elle a concentré particulièrement son action dans trois axes :

- commémoration du 10^{ème} anniversaire à travers les régions du pays;
- contribution à la COP22 par 5 "Side Events";
- présence sur le plan international et particulièrement africain; je voudrais m'attarder un peu sur ce dernier volet de notre action qui a vu la consolidation et le développement de nos relations avec l'Afrique et la communauté scientifique africaine; au niveau Africain l'Académie Hassan II a été particulièrement active en organisant deux réunions au Maroc des membres du NASAC, 16 et 18 mai 2016, à l'occasion de la session anniversaire de l'Académie et en présence de tous les membres du NASAC sur «Sciences et Technologies : levier majeur d'un partenariat Sud-Sud pour le développement industriel et agricole de l'Afrique»; à la COP22 (15 novembre 2016) avec l'organisation d'un "Side Event" au cours de la COP22 sur «Adaptation, atténuation et résilience au changement climatique : rôle de la science, de la technologie et de la coopération continentale» et adoption d'une déclaration signée par tous les membres du NASAC sur la question du changement climatique en Afrique; l'Académie Hassan II a également participé par une forte délégation à la rencontre internationale de Dakar sur "Next Einstein Forum" (8-10 mars 2016) tenue en présence des Présidents Sénégalais et Rwandais; à l'issue de la réunion de l'Assemblée Générale du NASAC tenue en Afrique du Sud en novembre 2016, l'Académie Hassan II a été reconduite à la présidence du NASAC pour trois années, en la personne de son Chancelier Pr. Mostapha Bousmina.

**Excellences,
Chers Académiciens,
Mesdames, Messieurs,**

Le thème "Océan et climat" était un des thèmes majeurs de la Conférence des Nations Unies sur le Climat (COP22), organisée en novembre dernier à Marrakech, et son choix pour notre session s'explique certes par le rôle crucial que joue l'océan dans les processus complexes de régulation du climat; il s'explique aussi, et je dirai surtout, par l'importance de ses ressources vivantes, aujourd'hui menacées par la surexploitation, la pollution massive, la dissémination et l'acidification globale des eaux marines due à l'absorption du CO2 par les océans.

Excellences, Mesdames, Messieurs,

Avec ses 3500 km de côtes, une façade maritime à la fois sur l'Atlantique et la Méditerranée et une situation géographique au carrefour de l'un des transits maritimes les plus denses, le Maroc est concerné en premier lieu par les interactions entre l'océan et le climat. Il va sans dire que l'océan et ses rivages sont un atout pour notre pays. Les activités liées à la mer contribuent à hauteur de 20% du PIB national.

Anticiper les risques liés au changement climatique passe nécessairement par une stratégie d'amélioration permanente, de l'observation systématique et de la compréhension des phénomènes, de réduction des incertitudes des simulations numériques du climat, et par la recherche et le déploiement des solutions permettant d'aboutir à une réduction substantielle des émissions de gaz à effet de serre.

Face à ces risques, il est nécessaire d'approfondir le débat sur l'importance de la recherche-développement et l'innovation et la concertation sur la détermination des projets et axes de recherche porteurs qui concernent spécifiquement les problèmes liés au dérèglement climatique. Pour cela, il est important de promouvoir la formation et l'enseignement dans le domaine des sciences du climat, discipline multidisciplinaire par excellence, et d'encourager les activités de recherche sur le fonctionnement du climat, tant sur les aspects de la collecte, l'analyse et l'échange de données et d'informations pertinentes, que sur les mécanismes physiques et chimiques en jeu, ainsi que sur les modèles numériques qui couplent ces mécanismes pour réduire les incertitudes et améliorer les projections.



Photo de famille à l'issue de la Session Plénière Solennelle 2017

Au cours de cette session plénière solennelle, quatre séances seront consacrées au thème général de la session et plus particulièrement aux questions liées aux effets conjugués du changement climatique et leurs impacts sur l'océan et ses rivages, aux implications économiques et sociétales ainsi qu'aux perspectives de la recherche dans le domaine des sciences du climat ainsi qu'aux moyens appropriés à mettre en place pour y faire face, tout en mettant l'accent sur le cas du Maroc. Nous aurons ainsi l'occasion d'écouter plusieurs communications sur ce thème scientifique général et des éléments de réponses sur ces questions seront certainement apportés par les différents intervenants et conférenciers; et je saisis cette occasion pour remercier les éminentes personnalités scientifiques, venues de l'étranger et de l'intérieur du Royaume, qui ont accepté notre invitation et qui vont présenter des communications scientifiques sur ce sujet. Je voudrais les remercier vivement pour leur présence et leur participation à notre session; comme nous saluons avec beaucoup de plaisir toutes les personnalités qui ont répondu à notre invitation et qui nous honorent par leur présence parmi nous aujourd'hui.

Je voudrais aussi saisir cette opportunité pour remercier chaleureusement mon ami le Professeur Abdeljalil Lahjomri, Secrétaire Perpétuel de l'Académie du Royaume et l'ensemble de son personnel pour l'aide qu'ils nous apportent, comme à l'accoutumée, dans l'organisation matérielle de notre session plénière.

Je remercie également les membres des différentes instances administratives et scientifiques de notre Compagnie, le Conseil de l'Académie, la Commission des Travaux, les Collèges Scientifiques ainsi que le "staff" administratif pour l'aide précieuse qu'ils ont apportée à l'Académie dans la préparation de cette session; souhaitons lui tout le succès qu'elle mérite et à notre Académie d'être à la hauteur de l'objectif qui lui a été fixé par son Protecteur Sa Majesté Le Roi Mohammed VI -que Dieu Le protège- "Servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale".

Je vous remercie pour votre attention.

Note de synthèse des travaux de la session plénière solennelle 2017



A. SASSON



O. ASSOBEI



A. EL HASSANI

1. Introduction

A la suite de l'organisation par le Maroc de la COP22 à Marrakech, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a organisé les 21, 22 et 23 février 2017 sa douzième (12^{ème}) session plénière solennelle sur le thème «**Océan et climat - cas du Maroc**».

Les effets des changements climatiques, leurs impacts sur les océans ainsi que les processus complexes de régulation du climat par les océans sont corrélés et interdépendants. Le climat dépend fortement de l'océan et inversement l'état de l'océan est fortement corrélé à celui du climat : l'océan par sa capacité de stockage de la chaleur et des gaz à effet de serre, a un effet régulateur bien plus important que l'atmosphère ou les continents; mais, cet effet se produit sur de longues périodes.

L'océan sous l'effet des gaz à effet de serre, subit une acidification ainsi qu'une augmentation de sa température menaçant fortement sa biodiversité. L'acidité des océans a augmenté de 30% en deux siècles et demi et ce phénomène continue de s'amplifier, menaçant fortement les espèces et la biodiversité marines. Les propriétés physico-chimiques des océans changent, ce qui a des conséquences sur les propriétés et la dynamique de l'océan, sur ses échanges avec l'atmosphère et sur les écosystèmes marins et leurs habitats. De toutes ces conséquences, les conditions atmosphériques et les phénomènes extrêmes telles que les mégasécheresses, les inondations, les tempêtes, la forte baisse des ressources fournies par les mers et les océans, seront probablement les plus graves pour les populations vulnérables, notamment dans les pays en développement.

Le Maroc, avec ses 3500 km de côtes, est concerné en premier lieu par les effets du changement climatique, car l'océan Atlantique et la mer Méditerranée constituent une source de revenus substantiels pour les populations et contribuent en grande partie à leur sécurité alimentaire.

2. Résumé des travaux

La conférence introductive de la session plénière solennelle a porté sur «**Le rôle des océans et des mers dans la régulation du climat et la réponse des écosystèmes marins au changement climatique**».

Les océans, avec leur vaste capacité à stocker la chaleur et les gaz à effet de serre, sont un moteur majeur pour la régulation climatique de la planète, amortissant le changement mais générant également une variabilité par les oscillations du couple océan-atmosphère.

Environ 1/3 des rejets de gaz à effet de serre, générés par l'activité humaine, sont stockés dans l'océan, ainsi que la majeure partie de la chaleur excédentaire résultant de l'effet de serre de ces gaz dans l'atmosphère. Cependant, le réchauffement des mers qui en résulte, le stockage accru de CO₂ ont eux-mêmes des conséquences profondes sur la vie marine, ce qui peut compromettre les ressources tirées de cette biodiversité.

Il y a 130 ans, Svante A. Arrhenius (1859-1927) présentait une étude intitulée «*Sur l'influence de l'acide carbonique dans l'air sur la température du sol*», où il estimait qu'un doublement de la pression partielle de CO₂ atmosphérique conduirait à un réchauffement de 2°C de la planète et que la température des régions arctiques augmenterait d'environ 8° à 9°C, si la teneur en CO₂ atteignait 2.5 à 3 fois sa valeur actuelle.

C'est aujourd'hui une réalité, puisqu'on constate que :

- la concentration globale de CO₂ est passée de 280 ppm en 1750 à plus de 400 ppm à l'heure actuelle;
- et que la concentration de CO₂ augmente parallèlement à la hausse de la température globale.

Les perturbations anthropiques du cycle global du carbone font que l'océan absorbe environ 28% des

émissions de CO₂, alors qu'il y'a une diminution de la concentration des océans en O₂, en raison d'un océan plus chaud et de demandes respiratoires accrues dans la part des écosystèmes marins.

L'océan joue un rôle important dans l'évolution du climat :

- en absorbant 93% de la chaleur extra piégée par la Terre depuis 1970 (Rhein, M. et al., dans Climate Change, 2013);
- en capturant 28% des émissions anthropiques de CO₂ depuis 1750;
- en atténuant les fluctuations climatiques;
- en redistribuant la chaleur, évitant l'excès de chaleur aux basses latitudes et le froid extrême aux latitudes nordiques.

En conclusion de cette conférence introductive, on note que :

- l'océan joue un rôle clé dans la régulation du système climatique terrestre et dans l'amortissement des perturbations anthropiques;
- l'océan devient plus chaud, enrichi en CO₂, appauvri en oxygène, plus acide et moins productif, avec un impact marqué sur les écosystèmes marins;
- le Maroc connaît des changements climatiques significatifs (réchauffement intense, changements hydrologiques), qui se reflètent également dans un déplacement probable sur la côte atlantique vers le sud du système d'upwelling et de la production halieutique (il faut inclure cette prévision dans la gestion des pêches);
- du fait que les eaux méditerranéennes sont relativement fraîches au large du Maroc, elles offrent un refuge pour les espèces marines méditerranéennes thermiquement stressées, et devraient être des zones marines protégées.

Par la suite a été abordée la question de «**l'importance des océans pour le changement climatique, du passé au futur**». Les océans jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement du système climatique, en particulier sur les cycles du carbone et de l'eau, les modes de variabilité du climat et le bilan énergétique. L'intensité et la structure spatiale de la température superficielle des océans affecte la circulation atmosphérique et les événements météorologiques. Les vents mettent en mouvement les eaux de surface et constituent le moteur des phénomènes de remontée des eaux profondes (upwellings), froides et riches en nutriments vers la surface, comme c'est le cas sur la côte atlantique marocaine. Dans l'océan Atlantique, la circulation méridienne de

retournement est pilotée par les gradients de densité de l'eau de mer, liés à sa température et à sa salinité.

Grâce à l'étude des archives du climat, comme les sédiments marins, la paléoclimatologie a mis en évidence des réorganisations majeures de la circulation de l'océan Atlantique nord, en particulier lors des périodes glaciaires, associées à des instabilités abruptes du climat des régions voisines. Aujourd'hui, l'influence humaine sur le climat est clairement établie; les rejets de gaz à effet de serre affectent l'état physico-chimique des océans; c'est pourquoi comprendre et représenter le rôle des océans dans le système climatique est essentiel pour évaluer les risques associés à l'évolution future du climat.

Quant à la modélisation du rôle des océans sur les changements climatiques, le risque le plus apparent des changements climatiques pour les océans est l'élévation du niveau de la mer où l'on projette généralement 45 à 82 cm à l'horizon 2100; celle-ci aurait un caractère extrême surtout pour les états insulaires et les plats pays. La fonte des neiges et la réduction des glaciers sont également une préoccupation déjà observée et prévue.

Le 5^{ème} rapport du GIEC mentionne des migrations d'espèces marines à cause de ces changements du climat; ce qui entraînera selon ce rapport une réduction du stock de poissons et d'invertébrés à cause du réchauffement prévu entre 2051 et 2060. L'acidification qui a connu une diminution remarquable depuis les années 1850 à nos jours continuera à baisser légèrement pour se stabiliser selon le scénario RCP2.6 (optimiste, si des actions d'atténuation concrètes sont prises), ou bien continuera à baisser de façon significative selon le scénario RCP8.5 (pessimiste, si aucun effort n'est fait).

Ces manifestations seront accompagnées de perte d'oxygène et de déformation des récifs de coraux. La moyenne globale des températures ne devrait pas dépasser 1,2°C (1,1-1,4°C) si l'on veut préserver/protéger au moins 50% des récifs coralliens.

Pour ce qui est du Maroc, si l'amplitude des impacts diffère par rapport aux pôles arctique et antarctique, les grands sommets ou les plats pays, il reste cependant vulnérable avec ses 3500 km de côtes qui sont, et resteront, concernés par les effets du changement climatique; l'Atlantique et la Méditerranée constituent une source de revenus substantiels des populations et contribuent en grande partie à leur sécurité alimentaire. Il

faut noter que l'Institut National de Recherche Halieutique va acquérir un navire de recherche qui facilitera les recherches océanographiques et permettra de faire des prévisions plus précises.

Le changement climatique, le réchauffement et l'acidification des océans, la fonte de la glace terrestre et l'élévation des niveaux des mers

ont été abordés. L'un des meilleurs indicateurs du changement climatique actuel est la réponse intégrée des changements de température de l'océan, des glaces et des eaux continentales dus au forçage anthropique ainsi qu'à la variabilité naturelle du climat. Avec les événements extrêmes, la hausse future du niveau de la mer est une menace majeure pour les régions côtières basses et peuplées de la planète.

Le bilan énergétique de la Terre sur les 40 dernières années montre un excès de chaleur accumulée dans le système climatique. Alors que 93% de la chaleur 'anthropique' accumulée dans le système climatique est stockée dans l'océan, la chaleur stockée dans les premiers mètres de l'océan équivaut à celle accumulée dans toute l'atmosphère!

Les observations montrent que la hausse de la mer au 20^{ème} siècle est la suivante :

- 1900-1990 (reconstructions basées sur les mesures marégraphiques) : 1.2 - 1.9 mm/an;
- 1993-2016 (altimétrie spatiale) : 3.1 +/- 0.4 mm/an.

Les causes de la hausse du niveau moyen global de la mer sont expliquées par les climatologues par le réchauffement de l'océan (expansion thermique), ce qui entraîne une diminution du volume des glaces continentales, et une diminution du stock d'eau sur les continents.

La hausse future des océans est envisagée par la "Representative Concentration Pathways (RCPs)" en 4 scénarios de réchauffement et les émissions de GES associées :

- RCP2.6 (2.6 W/m²)
- RCP4.5 (4.5 W/m²)
- RCP6.0 (6.0 W/m²)
- RCP8.5 (8.5 W/m²)

Ces différentes estimations sont expliquées par l'évolution future du niveau moyen global de la mer GIEC/IPCC AR5, par les instabilités des calottes polaires, la contribution possible de l'Antarctique à la hausse future de la mer et enfin la variabilité régionale de la mer, en 2100, à la hausse moyenne des niveaux marins.

Il existe aussi une autre source possible des variations régionales du niveau de la mer qui réside dans la redistribution des masses d'eau liée à la fonte passée et actuelle des glaces continentales. Celles-ci déforment les bassins océaniques et modifient l'attraction gravitationnelle mutuelle des masses d'eau et de glace.

Au-delà du 21^{ème} siècle, de nombreux aspects du changement climatique persisteront pendant plusieurs siècles, même si on arrêtaient aujourd'hui les émissions de gaz à effet de serre car :

- 20% du CO₂ émis restera dans l'atmosphère pendant au moins 1000 ans;
- le niveau de la mer continuera à monter pendant plusieurs siècles à cause de la grande inertie thermique de l'océan et de la longue durée de vie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère

Les impacts de ces changements climatiques sur les zones côtières sont :

- une grande partie des rivages du monde est en érosion (environ 70% des plages, Bird, 1985);
- on ignore quels sont les rôles respectifs des processus naturels, des activités humaines directes et de l'élévation du niveau de la mer dans le retrait actuel des rivages et l'érosion côtière;
- on ne sait toujours pas si la hausse de la mer sur la côte diffère, ou pas, de la hausse au large.

Ce qui compte localement, c'est la variation totale du niveau de la mer relativement à la côte; soit la somme de : «hausse moyenne globale + variabilité régionale+ mouvements verticaux de la croûte terrestre». Cette variation régionale de la hausse du niveau de la mer et la subsidence du sol peuvent se combiner pour amplifier la hausse 'climatique' moyenne du niveau de la mer. On peut donc retenir que la hausse du niveau moyen de la mer a augmenté fortement au cours de la dernière décennie, que la fonte accélérée du Groenland est largement responsable de cette hausse et qu'il est important d'assurer la continuité des observations spatiales et *in situ* (altimétrie, GRACE, Argo, etc.), en faisant le suivi des différents facteurs d'éventuelle accélération. Enfin, il convient d'affiner les projections de la hausse future du niveau de la mer au plan global, régional et local (prise en compte de tous les facteurs) et surtout de continuer d'étudier les impacts côtiers de cette hausse et de trouver les moyens de s'y adapter.

Le cas du Maroc a été examiné pour ce qui est du «**Changement climatique et les sécheresses récurrentes**» particulièrement abordé. En effet,

les caractéristiques générales du climat du Maroc sont :

- un climat semi-humide à semi aride et désertique du nord au sud;
- des cumuls pluviométriques modestes;
- un climat plus humide au nord et en zone montagneuse, avec une variabilité spatiale des précipitations;
- une forte variabilité interannuelle avec un coefficient de variation de 30% à 40% à l'ouest à plus de 70% au sud.

Les changements futurs des précipitations et des températures annuelles moyennes du Maroc sont envisagés selon les scénarios d'émissions du GIEC (RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6). Ils mettent l'accent sur l'importance de l'adaptation, avec quelques suggestions pour la recherche scientifique au Maroc : mécanismes des changements climatiques, causes de ces changements, affinement des études d'impacts, désertification et dégradation des terres et enfin océanographie. Les travaux en cours et futurs devraient être publiés afin que l'on puisse en tenir compte dans les processus d'adaptation.

L'océan comme réservoir de carbone, aujourd'hui et demain?

Il est aujourd'hui admis que l'océan absorbe un quart de toutes les émissions de carbone anthropiques, dues à la combustion de combustibles fossiles et au déboisement. Le CO₂ est le premier moteur du changement climatique anthropique en cours; l'estimation la plus récente de l'absorption de carbone par l'océan s'établit à 2,6 (+/- 0,5) milliards de tonnes de carbone (GtC) par an pour la dernière décennie (2006-2015), est obtenue par une combinaison d'observations atmosphériques et océaniques ainsi que grâce à des exercices de modélisation. Historiquement (c'est-à-dire depuis 1750), l'absorption océanique cumulée de carbone est de 155 ± 20 PgC (pétagramme de carbone).

Pour les prochaines décennies, les modèles océaniques indiquent que l'absorption du carbone océanique se poursuivra jusqu'en 2100 (IPCC, 2013). Il existe également une forte concordance des modèles selon laquelle le changement climatique, par le réchauffement de l'océan et les changements de circulation, compensera en partie cette augmentation causée par la hausse du CO₂ atmosphérique. Il existe encore de graves incohérences entre les modèles de simulations et les observations du cycle du carbone au cours des dernières décennies.

Il convient enfin de signaler que pour maintenir le réchauffement global de la planète à moins de 2 °C, il faudrait réduire les émissions de 40% à 70% en 2050 (par rapport à 2010), et zéro émission avant la fin du 21^{ème} siècle.

S'agissant du «**Changement de la chimie et de la température des océans et leurs impacts sur la biodiversité marine**», la stratification, l'expansion des zones à minimum d'oxygène, l'eutrophisation des zones côtières et l'acidification des océans se conjuguent avec la hausse des températures pour menacer la biodiversité des écosystèmes marins et les services qu'ils fournissent.

La remontée des eaux riches en CO₂ le long de la plateforme nord-ouest africaine conduit initialement à de faibles niveaux de saturation de CaCO₃ dans les eaux de surface ($\Omega_{\text{calcite}} = 3,4$ et $\Omega_{\text{aragonite}} = 2,2$; OMEGAS : Ocean Margin "Ecosystems Group for Acidification Studies"), bien en-deçà des moyennes pour ces latitudes. Le plancton marin dans les écosystèmes d'upwelling est susceptible de faire face à des menaces liées à la sous-saturation de CaCO₃, beaucoup plus tôt que dans d'autres écosystèmes aux latitudes semblables. Par conséquent, les écosystèmes d'upwelling peuvent être considérés comme des «hot-spots» d'acidification des océans, et les impacts potentiels sur la vie marine, en particulier les calcifiants, doivent être évalués. Les systèmes d'upwelling côtiers, tel que le système de la côte mauritanienne et les provinces méridionales du Maroc, sont alors des «hot-spots» pour ces pressions cumulatives.

L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), dans ses laboratoires environnementaux à Monaco, utilise des applications nucléaires pour des observations ciblées et mène des efforts mondiaux pour mieux comprendre comment les espèces marines réagissent aux changements de température et d'acidification dans les océans. La compréhension des effets de l'acidification des océans sur les écosystèmes marins nécessite la combinaison de différentes approches et disciplines, y compris des études d'observation, expérimentales, paléo-modélisantes, reliant des interactions physico-chimiques, physiologiques, comportementales, génétiques, écologiques, biogéochimiques et socio-économiques. Si nous voulons comprendre ce problème et prédire avec exactitude ses répercussions, la communauté scientifique doit de plus en plus passer de la recherche centrée sur les espèces uniques, à la recherche d'échelle écosystémique qui tient compte de facteurs multiples et sur des périodes plus longues.

L'océan est un fournisseur de ressources.

En effet, les données mondiales des pêches et de l'aquaculture, selon la FAO (2016), donnent une production halieutique mondiale totale de 167 millions de tonnes, et fournissent 107.2 millions de tonnes (soit les 2/3 de la production), constituée de :

- captures marines : 81.5 millions de tonnes;
- production aquacole marine : 26.7 millions de tonnes.

Cette production concerne plus de 2000 espèces marines déclarées par les statistiques de capture et 580 espèces ou groupes d'espèces aquacoles.

Au Maroc, la pêche maritime constitue un secteur stratégique avec une très grande biodiversité marine qui, en 2015, a fourni une production supérieure à 1.5 MT et 10.5 MM Dh au débarquement, engendrant plus de 650.000 emplois, soit plus de 3 millions de personnes qui vivent du secteur de la pêche.

De nombreux défis environnementaux subsistent et ont des *effets directs* à la suite de l'exploitation humaine. Il s'agit de la pollution terrestre et marine, la surexploitation des ressources, la dégradation des fonds marins, la destruction de la biodiversité, etc. Concernant les *effets indirects*, liés aux changements climatiques, on note une élévation de la température des océans, une acidification, une élévation du niveau de la mer, etc.

Ces défis ne peuvent pas être traités sans agir ensemble et de manière coordonnée; c'est pourquoi le Maroc a lancé l'initiative de la **Ceinture Bleue** dont la vocation est de transformer les contraintes environnementales en opportunités économiques; c'est aussi une sorte de communauté, avec divers partenaires, qui ne demande qu'à s'élargir. La *Ceinture Bleue* permettra un meilleur ancrage de la pêche et de l'aquaculture dans «l'économie bleue», de garantir la sécurité alimentaire et de renforcer la résilience de l'océan aux changements climatiques.

Cette *Ceinture Bleue* est une sorte de plate-forme collaborative avec un espace (zones côtières; les plus vulnérables et les plus productives) et des solutions prioritaires sous forme d'actions intégrées et interconnectées dans une *approche écosystémique* des pêches. Elle comprend trois axes :

- axe 1 : appuyer l'émergence des systèmes intégrés d'observation côtière;

- axe 2: encourager les actions pour la pêche durable, de l'écosystème au consommateur;
- axe 3 : favoriser l'émergence d'une aquaculture durable et en particulier l'algoculture.

La surexploitation des ressources marines entraîne une **«baisse de la capture des poissons dans les mers»**. La pêche et l'aquaculture sont des secteurs stratégiques à l'échelle planétaire au regard de leurs impacts considérables sur l'économie, les sociétés, l'emploi et l'environnement. Elles contribuent à la sécurité alimentaire tout en alimentant de nombreux circuits. D'après la FAO (2016), la production mondiale des captures s'élevait à 93,4 millions de tonnes en 2014, la consommation mondiale moyenne de poissons par habitant dépassait les 20 kg par an. Près de 57 millions de personnes travaillaient dans le secteur primaire de la production de poissons, dont un tiers dans l'aquaculture. La production globale de l'aquaculture a atteint les 73,8 millions de tonnes en 2014, dont un tiers de mollusques, crustacés et autres animaux hormis les poissons.

Le grand défi de notre temps est, selon la FAO (2016), de *«nourrir plus de 9 milliards de personnes d'ici 2050 dans un contexte de changement climatique, d'incertitude économique et financière et de concurrence de plus en plus vive autour des ressources naturelles»*. Face à ce défi, l'Organisation des Nations Unies a adopté, en septembre 2015, le Programme de Développement Durable à l'horizon 2030 (Programme 2030) qui fixe les objectifs concernant la contribution de la pêche et de l'aquaculture à la sécurité alimentaire et à la nutrition; ainsi que la conduite des deux secteurs au regard de l'utilisation des ressources naturelles, dans un souci de développement durable sur les plans économique, social et environnemental.

La surpêche prend des dimensions alarmantes et menace de nombreuses espèces de disparition. En 2013, quelque 31,4% des stocks de poissons commerciaux, régulièrement surveillés par la FAO, étaient surexploités. Les écosystèmes marins souffrent de menaces grandissantes qui mettent en question la durabilité de ces ressources. *Le Maroc n'est pas à l'écart de ces tendances; dispose d'importantes ressources halieutiques qu'il faut valoriser, sauvegarder et exploiter raisonnablement.*

Globalement, la situation des stocks de poissons marins dans le monde ne s'est pas améliorée, en dépit de progrès notables dans certaines zones. D'après une analyse de la FAO consacrée aux

stocks de poissons commerciaux, la proportion des stocks exploités à un niveau biologiquement durable a reculé de 90% en 1974 à 68,6% en 2013. Cela signifie que, d'après ces estimations, 31,4% des stocks de poissons étaient exploités à un *niveau biologiquement non durable, c'est-à-dire surexploités*. Sur l'ensemble des stocks évalués en 2013, 58,1% étaient exploités au maximum et 10,5% étaient sous-exploités. La proportion de stocks sous-exploités a diminué de manière presque continue de 1974 à 2013, mais celle des stocks exploités au maximum, après avoir baissé de 1974 à 1989, est remontée à 58,1% en 2013. Parallèlement, le pourcentage des stocks exploités à un niveau biologiquement non durable a augmenté, en particulier à la fin des années 1970 et dans les années 1980, passant de 10% en 1974 à 26% en 1989. Depuis 1990, la proportion de stocks de poissons exploités à un niveau non durable a continué d'augmenter, quoique plus lentement. Les dix espèces les plus productives ont représenté 27% environ des captures marines mondiales en 2013. Cependant, la majeure partie de leurs stocks sont exploités au maximum et une augmentation de la production ne sera possible qu'après la reconstitution des stocks.

La simulation des taux de production de poissons provenant de l'aquaculture ainsi que des prix du poisson (Merino et al., 2012) à l'horizon 2050, a donné lieu à plusieurs scénarios, qui mettent en perspective le rôle stratégique de l'aquaculture pour combler les déficits et le recul de la production de la pêche normale. La poursuite de l'exploitation abusive de la pêche risque de provoquer l'effondrement de l'écosystème naturel entre 2020 et 2030, et l'aquaculture s'imposera donc comme l'alternative. Une étape importante a été franchie en 2014, lorsque la contribution piscicole du secteur de l'aquaculture à l'offre de poisson destiné à la consommation humaine a dépassé, pour la première fois, celle du secteur de la pêche. Il sera impératif, mais en même temps très difficile, de répondre à la demande toujours croissante de poissons et de respecter à cet égard le Programme 2030.

En 2014, la production aquacole présentait les caractéristiques suivantes :

- animaux aquatiques : 73,8 MT, pour une valeur de 160,2 milliards \$;
- 50 MT de poissons (99 MM\$), 16 MT de mollusques (19 MM\$), 6,9 MT de crustacés (36,2 MM\$) et 7,3 MT autres animaux;
- la Chine a produit 45,5 MT d'animaux aquatiques, soit 60% de la production aquacole mondiale, suivie par l'Inde, le Vietnam, le Bangladesh et l'Égypte;
- les plantes aquatiques (27,3 MT, 5,6 MM\$), en grande majorité des algues marines, avec une progression rapide dans une cinquantaine de pays;
- 50% de la production aquacole mondiale (animaux et plantes) proviennent d'espèces non nourries; parmi celles-ci figurent la carpe argentée et la carpe à grosse tête, les espèces animales filtreuses (mollusques bivalves) et les algues marines;
- la croissance de la production était plus rapide pour les espèces nourries.

La consommation de poisson est en progression; en 2013, la consommation apparente de poisson par habitant dans les pays industrialisés s'élevait à 26,8 kg. Cette forte progression de la consommation de poisson a entraîné une amélioration du régime alimentaire des populations partout dans le monde.

La gouvernance de la pêche et de l'aquaculture devrait suivre les orientations du Programme de Développement Durable à l'horizon 2030, des Objectifs de Développement Durable (ODD) et l'Accord de Paris de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP21). Les 17 ODD et leurs 169 cibles forment un cadre destiné à guider les actions de développement des gouvernements, des organismes internationaux, de la société civile et d'autres institutions au cours des 15 prochaines années, dans le but ambitieux d'éliminer la faim et l'extrême pauvreté.

En outre, l'Accord de Paris à la COP21 constate que les changements climatiques constituent une grave menace pour la sécurité alimentaire mondiale, le développement durable et l'élimination de la pauvreté. La gouvernance doit donc viser à ce que la pêche et l'aquaculture s'adaptent aux effets de ces changements et contribuent à améliorer la résilience des systèmes de production alimentaire.

Le Maroc, pour développer le secteur de la pêche, s'est engagé à aménager les ports, à contrôler la qualité et le marketing des produits et à en élaborer un cadre juridique. En effet, depuis 2009, le Plan «Halieutis» est une stratégie intégrée, ambitieuse et globale de développement du secteur à l'horizon 2020. Ses objectifs visent une pêche durable et compétitive, valorisant le patrimoine halieutique marocain. Pour la mise en œuvre de ce programme, d'importantes réalisations ont été faites comme :

- l'aménagement de sites de débarquement modernes (ports de pêche, points d'accueil des débarquements de la pêche artisanale, villages de pêcheurs);
- le soutien à la pêche artisanale (près de 1367 millions de dirhams);
- la réalisation d'infrastructures de commercialisation (halles aux poissons, comptoirs d'agrégation du poisson industriel et marchés de gros);
- le lancement de pôles de compétitivité (Tanger et Agadir);
- la modernisation et la mise à niveau des navires dans le cadre du programme Lbhar;
- enfin, le lancement de l'aquaculture marine, suite à la création de l'Agence Nationale pour le Développement de l'Aquaculture (ANDA).

Le secteur stratégique de la pêche et de l'aquaculture revêt donc pour le Maroc une importance capitale. Il convient de veiller au rétablissement des équilibres rompus et de renforcer la durabilité de ses ressources. L'aquaculture est prometteuse, mais elle nécessite la maîtrise scientifique et technologique, ainsi que celle des investissements, afin de remplir sa fonction économique et sociale, tout en préservant l'environnement.

Les implications économiques du changement climatique ont été abordées, en particulier dans le cas de l'agriculture. Le réchauffement global et ses nombreuses implications devraient influencer sur le développement de l'agriculture (les sols) qui est un système global dont dépend la nutrition des hommes, des animaux, et des végétaux; la biodiversité qu'il contient; l'eau douce continentale; l'énergie; le climat et les paysans. L'eau douce sera nécessaire pour doubler la production agricole, car aujourd'hui 20% des terres cultivées sont irriguées et produisent 40% de la nourriture mondiale, [l'eau prélevée (nappes, fleuves) soit 10 fois le débit annuel du Nil] et en 2050 il faudrait multiplier par cinq cette irrigation, soit l'équivalent du débit annuel de 50 fois le Nil.

Le rôle de l'agriculture dans la production de gaz à effet de serre a été minimisé avec la présence de bactéries dans le sol et les végétaux supérieurs qui contrôlent le cycle du CO₂ et N₂O. Cette contribution se fait aussi par la mise en culture d'une forêt (1000t CO₂/ha) et la mise en culture d'une prairie (300t CO₂/ha).

Parallèlement à leurs activités traditionnelles, les exploitations agricoles développent des activités de production d'énergie, soit pour une

autoconsommation, soit pour les revendre sur les réseaux énergétiques, avec deux principales voies de valorisation de la biomasse : les biocarburants et la méthanisation.

Le coût humain des changements climatiques implique la pauvreté des paysans et les impacts sur la santé des humains. On peut alors noter que parmi les 925 millions de sous-alimentés en 2010 :

- 80% sont des ruraux (50% des paysans pauvres, 22% des paysans sans terre, 8% des pasteurs nomades, habitants des forêts, etc.);
- 20% des urbains pauvres.

Donc l'agriculture est au cœur du problème. Les pertes et les gaspillages sont estimés à un tiers des aliments produits pour la consommation humaine, soit 1,3 milliards de tonnes (FAO, 2011).

L'exacerbation du réchauffement climatique engendre :

- des révolutions agricoles puis industrielles, notamment au cours du XX^{ème} siècle avec une exploitation sans retenue des ressources naturelles;
- une croissance économique linéaire basée sur la consommation dont les coûts climatique, écologique et humain sont considérables (indicateurs de bien-être en décroissance depuis 50 ans);
- des coûts énergétiques en augmentation;
- un modèle économique actuel qui détruirait plus qu'il ne créerait (impact prévu sur le PIB: chute de 0,7% à 2,5% en 2060).

Pour cela, le monde est appelé à changer progressivement de paradigme économique.

Par exemple dans le cas de l'agriculture comment faire face à l'érosion des sols arables, à la chute des rendements, au besoin d'irrigation grandissant, à l'urbanisation, quelle énergie utiliser? Plusieurs regards se tournent alors vers une nouvelle agriculture qui préserverait au mieux la terre nourricière, vers une **économie verte** (diminution drastique des GES : utilisation des sources d'énergie renouvelable ; préserver les sols arables, les mers, les lacs et les forêts); vers une **économie de la connaissance** (science et technologie); une **économie circulaire** (recyclage, réutilisation, chasse au gaspillage) et enfin une **économie collaborative** (échange, mise en réseau, prises de décision citoyenne). Mais, est-ce suffisant pour assurer un développement durable et le bien-être d'une population en pleine croissance et revendiquant le partage des décisions.

3. Propositions d'action pour le Maroc et perspectives de recherche

La table ronde, organisée à l'instar des sessions précédentes de l'Académie, le jeudi 23 février 2017, devait dégager, à la lumière des exposés sur la problématique «océan-climat», l'état des lieux et les perspectives en matière de recherche-développement au Maroc. Avec la modération du Pr. Albert Sasson, académicien résident et directeur du Collège des Sciences et Techniques du Vivant, et l'aide du Pr. Omar Assobhei, académicien résident et président de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès, les quatre participants à la table ronde ont fait de brèves présentations, suivies d'un débat général. En voici une synthèse succincte.

Karim Hilmi, de l'Institut National de Recherches Halieutiques (INRH) de Casablanca a rappelé que les observations et les travaux de recherche conduits à l'INRH, sont au service de la mise en œuvre du programme *Halieutis*. Une collaboration existe avec plusieurs universités nationales et avec le Réseau de Recherche en Sciences de la Mer (REMER) unissant plusieurs laboratoires ou unités de recherche travaillant dans le cadre de l'océanographie physique et biologique. Cette collaboration s'étend aussi au centre de télédétection spatiale et à la marine nationale, notamment pour ce qui est du renforcement des observations, de la cartographie, de l'hydrographie, de la bathymétrie. Enfin, l'INRH est membre de la commission océanographique intergouvernementale (COI) et fait partie, depuis 1997, du groupe de travail 2 du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique). L'INRH a été, avec d'autres institutions nationales et internationales, un participant très actif à la journée des océans de la COP22 à Marrakech et s'est fait le promoteur de l'économie «bleue» préparant ainsi la COP23, à l'initiative des îles Fidji.

K. Hilmi a rappelé la panoplie des moyens d'observation océanographique *in situ* : le lancement prochain d'un navire océanographique de recherche (jusqu'à une profondeur de 1500 mètres), construit au Japon; une bouée d'observation déjà opérationnelle, une seconde dont l'achat est prévu, alors qu'il en faudrait trois ; l'utilisation des mesures de télédétection et de modèles de simulation, en particulier pour suivre les phénomènes d'*upwelling*, qui sont des zones de pêche importantes pour le Maroc, au sud de sa côte atlantique; les modèles MERCATOR.

L'INRH suit les plans d'adaptation au changement climatique, en particulier pour l'exploitation de ses ressources halieutiques. Il doit renforcer

les mesures d'acidification de l'océan, celles concernant la hausse du niveau de la mer et donc les observations bathymétriques. Les zones d'*upwelling* font l'objet d'une attention particulière. Le manque de flotteurs ARGO, ainsi que les études au-delà de 2000 mètres de profondeur sont d'autres défis qu'il faudra relever pour améliorer encore les observations océanographiques. Il convient en effet, non seulement d'observer le large, mais aussi de se concentrer sur le littoral (en d'autres termes passer du global au local, ou *downscaling*). Cela conduit déjà, et cela sera encore plus prééminent dans le futur, à plus d'interactions avec les plans d'aménagement de nos côtes qui s'étendent sur plus de 3500 km.

Mme Majida Maarouf, directrice générale de l'Agence Nationale de Développement de l'Aquaculture (ANDH) a fait remarquer que rares sont les pays qui possèdent une telle structure. Le Sénégal est de ceux-là. Créée en 2009, sur les Hautes Instructions de Sa Majesté le Roi Mohammed VI, elle est un projet prioritaire du plan *Halieutis*. Sa relation avec l'INRH est inscrite dans la loi et elle se déroule de façon efficace. A partir de 2012, après une analyse comparative (*benchmarking*) avec d'autres pays, un cadre juridique a été mis au point en deux ans; les textes d'application sont en cours de publication.

L'attention prioritaire accordée aux pêcheries a fait que depuis les années 1950 l'aquaculture n'a guère fait de progrès. C'est pourquoi un plan aquacole a été mis au point, avec pour objectif de porter une attention particulière à la protection de l'environnement et aux besoins socio-économiques, ainsi qu'à l'acceptation sociale des projets d'aquaculture. Par exemple, au nord de Dakhla, deux années d'études de terrain et d'études océanographiques ont permis de localiser les espaces propices à l'aquaculture, qui vont de la plus petite taille, économiquement viable, à des dimensions plus importantes. Cela permet aux investisseurs d'adapter leur intervention, qu'il s'agisse de pisciculture, de conchyliculture ou d'algoculture.

Les projets de développement de l'aquaculture visent, tout en s'adaptant au changement climatique, à être multitrophiques, avec plusieurs espèces liées par des chaînes trophiques complémentaires, de façon à réduire les déchets au maximum en les recyclant dans ces chaînes.

Sur plusieurs sites, en milieu marin, les appels d'offres à projets d'aquaculture ont été bien reçus. Des investisseurs qu'il faut initialement aider, sont

prêts à se concentrer sur ce domaine. L'objectif est de parvenir à une production de 200 000 tonnes par an, et même à 300 000 tonnes par an. Des projets expérimentaux sont conduits avec l'INRH.

Abdellah Mokssit, membre correspondant de l'Académie et secrétaire général de l'IPCC/GIEC à Genève, qui a dirigé auparavant la Météorologie nationale, a rappelé quelques principes, comme la modestie face aux résultats de la recherche sur le climat, particulièrement complexe; l'attention à porter aux aspects pratiques, pour rechercher la synergie des efforts et l'adaptation au niveau national ou local des études globales. Il faut, dit-il une attitude «rationaliste». Il cite aussi, en 1991, le Plan stratégique de mise en œuvre concernant la Météorologie nationale, avec le souci de la durabilité.

Il formule les propositions suivantes: la veille scientifique et technique (présentée à l'échelle internationale, par exemple en participant aux travaux du GIEC, à la convention de la COP21 et de la COP22; constitution d'un consortium «climat»); création d'un espace commun entre les preneurs de décision, la société civile, les bailleurs de fonds publics ou privés, pour agir de concert et efficacement.

Il rappelle que la problématique traitée appelle une recherche finalisée; la maîtrise des besoins; le *benchmarking* international («ce qu'on sait et ce qu'on ne sait pas encore»); la mise au point d'une méthodologie nationale; la création de consortiums sur le climat; l'assurance d'une veille technologique.

Noureddine El Aoufi, membre résident de l'Académie, a rappelé qu'il existe un consensus assez général sur le diagnostic du changement climatique. Mais l'analyse de ce diagnostic, du point de vue économique, révèle deux approches, voire deux écoles de pensée. L'analyse «orthodoxe», dominante, de nature utilisatrice, qui fait jouer les externalités («taxation des pollueurs») et la loi du marché («taxation du carbone»). L'économiste J. Tirole, Prix Nobel d'économie, appartient à cette tendance. Une autre analyse, «hétérodoxe», est de nature écosystémique, a recours aux sciences humaines (tandis que la précédente a recours à la physique). B. Latour (2004) appartient à une telle tendance. Certes les émissions de CO₂ contribuent de façon durable au changement du climat, mais aussi les effets du capitalisme et de ses modèles de développement. Cette analyse a une approche stratégique, elle fait confiance aux institutions, elle peut transformer la réalité. D'où la nécessité de la transition écologique, animée d'une justice «écologique» (cf. Amartya Sen).

N. El Aoufi a rappelé encore les résultats des experts et des institutions publiques ou privées (tels que le Fonds monétaire international -FMI- et la Banque Mondiale); le rapport de Nicholas Stern (2006) qui anticipe l'impact du changement climatique jusqu'en 2100 (économie du risque, traitement égal de toutes les générations, l'inégalité, etc.).

Au Maroc, la recherche publique en matière d'économie peut être orientée vers le développement durable; le rapport du cinquantenaire, le rapport Maroc Vert, sont des documents d'état des lieux et d'anticipation. En prenant en compte les vulnérabilités au Maroc, l'expertise nationale existante (qu'il s'agisse de la recherche privée par des groupes internationaux ou de recherche publique) devrait s'orienter vers la conjugaison de l'économie «verte» avec l'économie «bleue». Le Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE) a mis en relief deux points de vigilance: l'intégration insuffisante des deux économies et l'inclusion des populations, ainsi que la nécessité d'une approche d'anticipation vu l'accélération du risque climatique.

Enfin, N. El Aoufi a fait mention de l'exemple de la Chine dont l'expérience récente pourrait démontrer une approche nouvelle de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique.

4. Conclusions

A l'instar des précédentes sessions, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a conclu ses travaux scientifiques, le jeudi 23 février 2017, par un débat général, ouvert non seulement aux académiciens mais aussi à tous les enseignants-chercheurs, universitaires, experts invités, ainsi qu'à des représentants d'associations actives en matière d'océanographie, des relations entre le climat et les océans, de l'impact du changement climatique, de l'atténuation des effets de ces derniers et des adaptations nécessaires.

On peut tirer des interventions faites durant le débat quelques propositions d'action et des recommandations : certaines adressées à l'Académie en conformité avec ses missions et d'autres plus générales à l'intention d'autres institutions de recherche-développement du Royaume.

En premier lieu, il y eut plusieurs appels au renforcement de l'interdisciplinarité, car comme l'ont bien montré les études sur l'océan et le climat; qu'il s'agisse des sciences ou des techniques, l'interdisciplinarité est de mise pour l'observation, la simulation et la modélisation des effets du

changement climatique, l'instrumentation faisant appel à la robotique ou aux satellites, les mesures faites et leur interprétation, l'impact sur les populations concernées, etc. Cet effort de métissage et d'interaction entre les sciences et les technologies concernées renforcerait au sein de l'Académie même (par exemple sous forme de travail inter-collèges) et au-delà de celle-ci la pertinence et la meilleure utilisation des résultats de l'observation ainsi que des actions d'adaptation au changement climatique. Nul doute aussi que cela rapprocherait encore plus l'Académie des différentes composantes de la communauté scientifique nationale.

En second lieu, il y eut une unanimité à réclamer plus d'efforts dans les domaines de l'océanographie, aussi bien physique (observation, simulation de modèles climatiques au niveau global, régional et local) que biologique. Il convient, somme toute, de créer, sur le plan de la formation et de la recherche, une coalescence progressive des compétences marocaines en matière de climatologie ou des sciences du climat. L'Académie peut sans doute y aider, mais de concert avec les institutions nationales, comme l'Institut National de Recherche Halieutique (INRH), l'Agence Nationale de Développement de l'Aquaculture (ANDA), la Direction de la Météorologie nationale (dont la réussite témoigne bien de l'addition d'expertise et de compétence), les universités des régions du Royaume (et plus spécialement celle qui sont situées près du littoral), etc.

Selon l'un des intervenants, il serait utile que l'Académie puisse constituer un groupe de travail sur «l'ingénierie» des projets de recherche portant sur des domaines nouveaux, comme l'utilisation des données de masse, la simulation, l'usage de robots ou de drones pour la récolte de données et leur interprétation, la climatologie (avec l'aide de la météorologie). Il s'agirait d'un apprentissage des chercheurs à la manière de rédiger un projet de recherche (que l'Académie, entre autres, pourrait examiner et soutenir), et cela afin que ces mêmes chercheurs puissent répondre correctement à des appels d'offre.

Beaucoup ont souligné la difficulté pour les chercheurs à accéder à l'information disponible dans le domaine «océan-climat». Il y aurait sans doute besoin de faciliter la circulation de toute cette information. Mais l'Académie n'a pas les moyens d'y parvenir seule; il semble d'ailleurs qu'au niveau national est en train de se créer un système de coordination institutionnelle, qui pourra rassembler et diffuser cette information.

La nécessaire formation doctorale de jeunes chercheurs dans les différentes spécialités, dont l'addition et l'interaction constituent les sciences et technologies de la climatologie, a été soulignée. C'est évidemment le rôle privilégié de nos universités mais aussi d'institutions comme l'INRH, qui a en son sein des formations doctorales en collaboration avec diverses universités. On a alors mis en relief l'adéquation des ressources et des moyens nécessaires. L'exemple de la réussite de la Météorologie nationale a été cité, avec à l'origine la formulation d'objectifs simples et précis adaptés à la réalité marocaine ainsi que la recherche de moyens adéquats. Il a été rappelé, à l'occasion de cet appel à plus de recherche, coordonnée et fédérée, la nécessité d'une meilleure gouvernance de la recherche scientifique et technique nationale. Dans certains domaines, on a noté des progrès significatifs, comme à l'INRH (projet Halieutis) et à l'ANDA, etc., mais il serait urgent de trouver de nouvelles ressources; l'Académie, en tant qu'agence de réflexion, mais aussi de moyens, pourra y contribuer.

On a aussi souligné la nécessaire durabilité des formations et des recherches entreprises, dans le cadre d'une vision nationale certes, mais largement ouverte sur ce qui se fait au niveau international, car le réchauffement de la planète, la hausse du niveau des mers, la récurrence de sécheresses (parfois même des mégasécheresses), la répétition de phénomènes climatiques extrêmes (inondations, tsunamis, etc..) nous concernent tous. Le Maroc est vulnérable, il ne sera par épargné par les effets du changement climatique. De là, la nécessaire transition écologique, illustrée par la transition énergétique (en 2030, la moitié de l'électricité utilisée au Maroc sera produite à partir de sources d'énergie renouvelables).

Un intervenant a signalé qu'il y avait parfois, entre des politiques publiques et les résultats avérés de la recherche, des contradictions. Par exemple, l'aménagement du littoral ou du tourisme balnéaire, en dépit des risques climatiques qui les menacent. Qu'en sera-t-il de notre tourisme futur, face à l'aridification avérée à plus ou moins long terme? Cette opinion a semblé être partagée par d'autres intervenants, qui préconisent de ce fait une plus grande interaction entre chercheurs et preneurs de décision.

Enfin, le Maroc, dans le cadre de sa politique de coopération pour le développement en Afrique subsaharienne, devra participer à la création d'un forum des sciences de la mer en Afrique et améliorer encore, comme il le fait avec certains pays comme le Sénégal, ses actions de collaboration.

Role of oceans and seas in the regulation of the climate and the response of marine ecosystems to climate change

Carlos M. DUARTE

*Université des Sciences et Technologies du Roi Abdullah
Arabie Saoudite*



Assalamou Alaikoum

Dear Ministers and Ambassadors,

Dear Perpetual Secretary of the Hassan II Academy of Sciences and Technology,

It is for me a great pleasure to be able to address the Academy and the audience today. It is a great honor to have been invited today by the Academy to introduce the subject of this plenary session on the **“Role of oceans and seas in climate regulation, and their reaction to climate change”** and also the case of Morocco.

The science of climate change started in an academic discussion in an Academy like this in Sweden, 120 years ago, when Svante A. Arhenius (1859-1927), a Swedish physicist presented in 1895 a paper to the Stockholm Physical Society titled *“On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.”* He calculated that a doubling of the partial pressure of atmospheric CO₂ would lead to a 2°C warming of the



Svante A. Arhenius

planet and that the “temperature of the Arctic regions would rise about 8 degrees or 9 degrees Celsius, if the concentration of carbonic acid [CO₂] in the atmosphere increased 2.5 to 3 times its present value”. We are now providing a whole-planet experimental test of this prediction.

Since the industrial revolution, the emissions of greenhouse gases have increased and they have closely tracked the development of the global economy. We have a steady growth between 2000 and 2010 and a slowdown of the growth of emissions possibly because we are more aware of the impact of emissions of CO₂ and other greenhouse gases on the global climate, but also because the global economy has also slowed down. We don't yet know to what extent it is a global responsibility or a case of simply the economy is slowing down during the last few years. As expected the increase of the concentration of CO₂ in the atmosphere has also increased steadily to about 280 ppm in the atmosphere before the industrial revolution to exceed 400 ppm for the first time and on a global average in the year 2016.

As predicted by Svante Arhenius, there has been very close correlation between the increase in the concentration of CO₂ in the atmosphere and the global temperature. Soon, if the CO₂ concentration continues to rise, we will be able to validate again the prediction of Svante Arhenius that the global temperature should be raising by 2°C by the doubling of CO₂. The consequences are obvious and, when we look at the changing in the surface temperature between 1901 and 2012, we can see a global raise of warming that is only intense in some areas and the Kingdom of Morocco is one area of those where warming is particularly intense (Fig. 1). So certainly climate change and increase in global temperature is a matter of great concern for the Kingdom of Morocco because of its geographic situation.

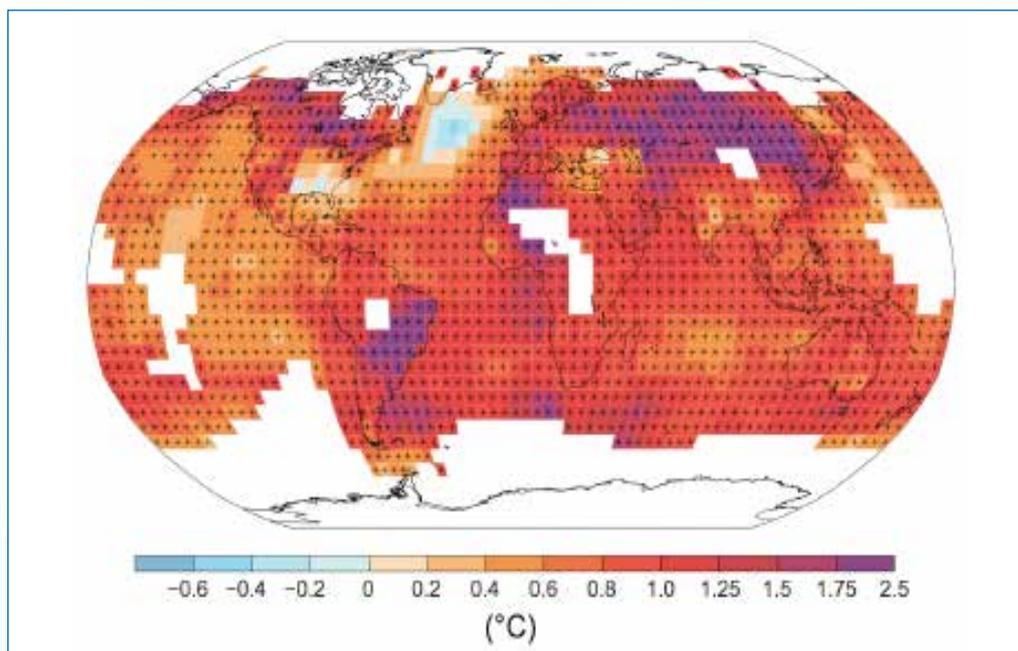


Fig 1 : Observed change in surface temperature 1901-2012

The complications and complexities of climate change have been summarized in a very parsimonious figure which is a linear relationship between the cumulative total anthropogenic emissions and other greenhouse gases, and the temperatures are normally relative to the references being of 1861 to 1880. Today we are located at about 1°C of global temperature raise, and then we have different scenarios to how global temperature will behave in the future depending on the decrease or increase of emissions. This is evidence that every nation in the world is working for the benefit of human kind. His Majesty The King Mohammed VI took last year the leadership in the response of the global community to the climate change by bringing the COP22 to Morocco and declaring that the climate is warming at an alarming and unprecedented rate (1°C) and that all nations have an urgent duty to respond. This is an important step because one of the continents where the impact of climate change is going to be more severe is the African continent, and to see the King of Morocco taking leadership of global action against climate change is certainly a major milestone.

When we are now looking at the role of the oceans in the regulation of climate on the planet, we can examine what is the fate of the CO₂ that is submitted to the atmosphere. The oceans absorb about 28% of CO₂ emissions, so one third of the emissions are absorbed by the oceans; therefore that buffers and alleviates the rising in global temperature. The ocean has continued to serve this role and there was some concern about the capacity of the ocean to continue to absorb the CO₂ emissions was slowing down, but in fact it was steadily continuing to absorb 1/3 of the CO₂ emitted by human activities. Ocean is not only a main reservoir for CO₂ in the planet, it is also because of the high thermal capacity of the water it is also the main reservoir of heat. The rate of increase in heat content in the ocean has increased from 0.06 (1950) to 0.35 W m⁻² (2010) for 0 – 1800 m1. This heat reservoir is becoming deeper and as a consequence the ocean reservoir is warming at a rate similar to warming of land. One of the consequences is the warming in the Arctic to the point that Arctic sea ice extent at historical record low levels since October 2016 to date. Since September of last year we have seen an unprecedented abnormally temperatures above 30°C for weeks and even months.

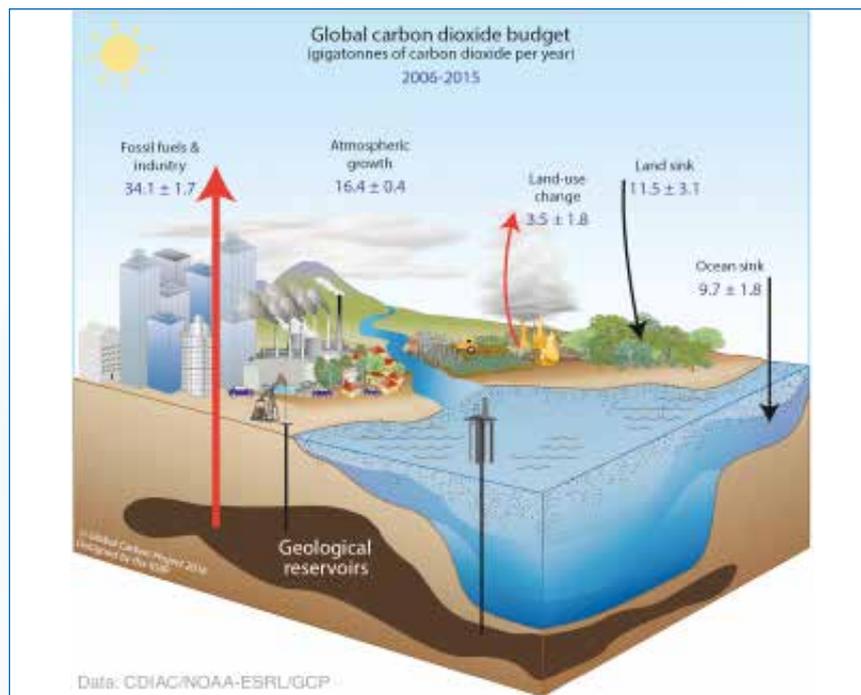


Fig 2 : Anthropogenic perturbation of the global carbon cycle

The loss of sea ice in the Arctic is not only a signal of climate change but also has consequences for the global climate system. The shift from a white to a dark Arctic is leading to a decline in the global albedo and increased warming.

The last consequence of the absorption of CO₂ by the ocean is the decline in pH because of the role of CO₂ and carbon system in buffering the pH of the ocean. Ocean O₂ Concentration is also declining as a consequence of a warmer ocean and enhanced respiratory demands by marine biota. Together with increasing CO₂, declining O₂ levels aggravate respiratory challenges to marine organisms in areas supporting already low oxygen levels (e.g. upwelling regions). The role of the ocean in climate regulation may be summarized as follows:

- The world's oceans have absorbed 93% of the extra heat trapped by the Earth since 1970 (Rhein, M. et al. in Climate Change 2013).
- Captured 28% of anthropogenic CO₂ emissions since 1750.
- Ocean evaporation (E) and precipitation (P) are the fundamental components of the global water cycle.
- Buffers climate fluctuations.
- Redistributes heat, avoiding excess heat at low latitudes and extreme cold at northern latitudes.

Associated changes in the ocean are shifting the conditions to support marine life:

- Warmer
- Invading shallow coastal areas
- Decrease in pH
- Loss of oxygen
- Loss of sea-ice (critical habitat)

These shifts may, in turn, induce feedbacks in the Earth's climate system [e.g. a trend towards decreasing global ocean productivity and expansion of the oligotrophic gyres ("ocean deserts")]. Poleward displacement of marine (and terrestrial) thermal regimes is advancing at a rate of 20 km per decade. Polar organisms are facing risks because the thermal regimes to which they are adapted may disappear. In equatorial regions we are seeing thermal decrease. In other places, like the Mediterranean region, there are limits to the organisms to migrate and extend their geographical area to cooler zones.

The second element of concern, beyond warming, is the decrease in pH of water. Impacts of warm temperatures and high CO₂ are reduced in the progeny of coral reef fish:

- Fish exposed to elevated temperatures after hatching had reduced aerobic scope.

- Fish whose *parents* were exposed to elevated temperatures showed complete restoration of scope.
- The mechanism for this *transgenerational adaptation* was explored using transcriptomics.
- Dozens of genes seem to be involved, with the most common related to metabolism, immune response and stress response.

There are many uncertainties, but certainly we now understand clearly that adaptation and evolution is a faster process than we thought before. These are brief synopses of climate change regulation and how changes in the ocean are impacting the marine life. The central question is what this means for the Kingdom of Morocco?

The Kingdom of Morocco is obviously a maritime nation with :

- Nearly 3,000 km of coastline;
- Two distinct seas: Mediterranean Sea and Atlantic Ocean;
- The largest fish market in Africa, with 1.19 m tons of fish and seafood in 2012 (3.3% of global value compared to 0.4% of global population);
- The fishing industry accounts for 3% of GDP (€494.3m in 2012), 56% of agricultural and 16% of total exports and about 400,000 jobs;
- Plan **Halioutis** to increase fishery production, develop aquaculture and multiply jobs that are dependent on the ocean;
- Tourism 10% of GDP with scope to increase in the future and continue to expand.



Fig 3 : Major fisheries site along the Atlantic coast of Morocco.

As I mentioned the Kingdom of Morocco has one of the four most important fisheries in the world, and that is supported by one of the most productive upwelling systems in the world (Fig 3). I will explain what these upwelling systems are. Basically, in the northern hemisphere along the eastern margin of the continent we have winds that are blowing south and current systems that flow south and push the water from the coast

toward the open ocean and leads to the rising of the deeper water into the coast. In the southern hemisphere the system is reverted.

Coastal Upwelling: Ascent of nutrient-rich, cold waters to the surface along the continental slope.

Upwelled waters: Cold, Nutrient-rich, CO₂ rich, O₂ poor, and they support four major fisheries in the world.

	Observed	Expected	Uncertainty
Upwelling-favorable winds <i>High confidence</i>	Intensification of upwelling-favorable winds (except Canary/Iberian System) during warm months. Increased variability and trends in phenology.	Increasing (decreasing) trends in upwelling winds in poleward (equatorward) regions of the EBUS.	The influence of large-scale decadal variability.
Large-scale drivers of upwelling-favorable winds <i>Medium confidence</i>	No evidence of multi-decadal trends in strength or position of pressure systems.	Models suggest poleward migration of ocean high-pressure systems, but little to no change in intensity of the thermal continental low-pressure cells.	
Coastal temperature and stratification <i>Low confidence</i>	Complex integration of global (climate change) and local (coastal upwelling) processes. Differences in global and EBUS SST trends are observed.	Complex integration of global (climate change) and local (coastal upwelling) processes. Ocean warming and stratification might be ameliorated by increased upwelling.	Trends are sensitive to location (nearshore vs. offshore), resolution, period and dataset considered, as well as to decadal variability.
Biogeochemistry <i>Low confidence</i>	Decreased pH and oxygen concentration.	Decreased pH and oxygen concentration, and increased nutrient concentration.	Uncertainty due to short period of data availability.

These assessments are based on variable periods and datasets (see text and references). Confidence, based on amount of evidence and agreement among evidence, is noted in italics.

Table 1 : Impacts of climate change in upwelling systems

Is the Canary-Morocco Upwelling System intensifying or weakening?

Evolving views:

- is not changing (or weakening) – e.g. Barton et al. (2013), Garcia-Reyes et al. (2015)
- is intensifying in the northern range, and weakening in the south – Croper et al. (2014), Wang et al. (2015).

Coastal Upwelling: Ascend of nutrient-rich, cold waters to the surface along the continental slope.

These waters are cold, nutrient-rich, and they are also rich in CO₂ and poor in O₂. They support one of the major fisheries in the world.

There is a poleward shift in the position of the upwelling system and therefore an expected poleward shift in the range of species (Upwelling areas may provide refuges for temperature-sensitive species (Lourenço et al. 2016).

The centers of the upwelling systems and the centers of fisheries seem to be migrating toward the North with climate change.

When we look at upwelling systems of the north-east of the African coast, we can characterize three different areas :

- In the north an area of weak upwelling system that will occupy most of the coast of Morocco.
- An area in the south of Morocco that will be the permanent upwelling zone. It's the area that is now supporting the strongest deal of fisheries in Morocco.
- Further south along the coast of Mauritania and Senegal another area of weak upwelling system.

If we look at the rate of warming we can see that the southern area is becoming warmer and there is a footprint of the upwelling being less intense. Whereas in the southern part of Morocco, the waters are becoming colder and there is again footprint of intense upwelling.

A recent model is predicting that the upwelling system is going to be intense in the north and weaker in the south. That means that there is a displacement of the productive areas towards northern areas along the coast of Morocco.

There is also some other changes taking place along the coast of Morocco and one of them is ocean acidification. Data from the ESTOC station

(Canary Islands) clearly reflect the monitoring since 1996 of a decline in ocean pH in the Canary-Morocco Current System parallel to that in other oceanic stations (Hawaii and Bermuda) (Fig 4). We may be concerned that the decrease in ocean pH and decrease in CO₂ is also going to impact the marine life and fisheries resources off the coast of Morocco.

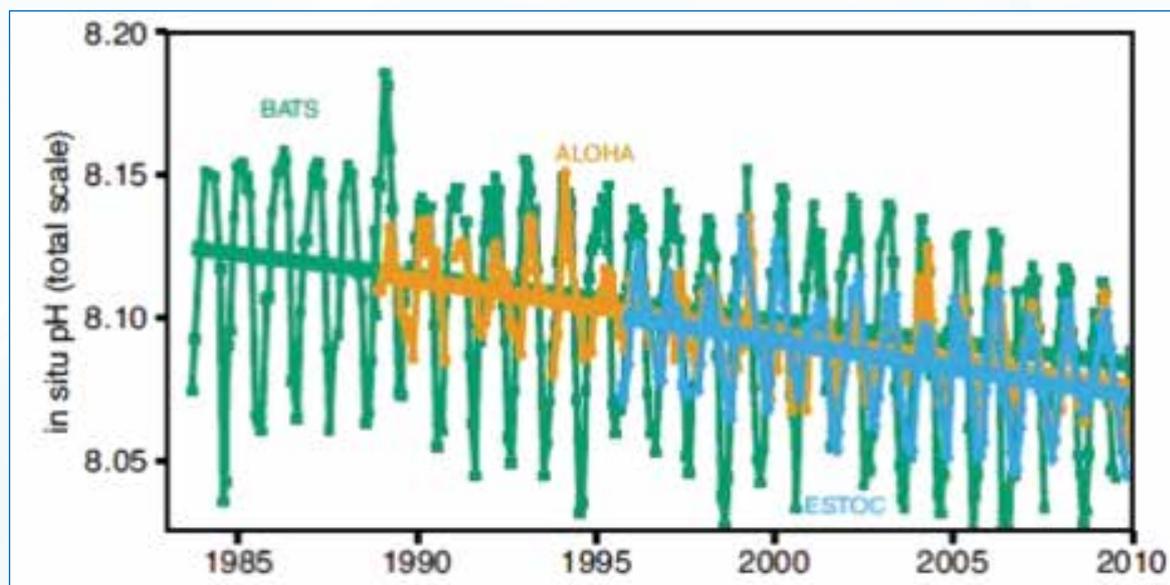


Fig 4 : Blue: Canary Islands. Time Series Station (ESTOC)

There one piece of evidence that suggests that high CO₂ waters may also come with a solution which is a nutrient rich productive water mass. When we look at an experiment on the response of marine organisms to ocean acidification, we find that the high productivity, and food supply, associated with the upwelling system is likely to confer resistance against ocean acidification to calcifiers. If the upwelling system off Morocco continues to be highly productive, then the organisms are going to be vulnerable to ocean acidification. We still need to do more experiments to substantiate this evidence.

When we look at the northern part of the Kingdom, then the Mediterranean Sea is entirely a different story. The warming rate of the Mediterranean Sea is very comparable to that of the global ocean, but the intensity of heat waves is increasing in the Mediterranean Sea.

Absence of reports for Moroccan coast: lack of impact of paucity of monitoring?

Chefaoui & Duarte reported the presence of the seagrass *Posidonia oceanica* and thermal regimes defining its niche: maximum seawater temperature of 23.13°C to 29.21°C. Currently, the seagrass

Posidonia oceanica finds marginal habitat in the Mediterranean coast of Morocco (low temperature). Niche models suggest widespread loss of *Posidonia oceanica* from the Mediterranean. The Mediterranean coast of Morocco may become a refuge for thermally stressed Mediterranean species in a warmer Mediterranean (conservation measures?).

Conclusions :

- The ocean plays a key role in the regulation of the Earth's climate system and in buffering anthropogenic perturbations.
- In doing so, the ocean is becoming warmer, CO₂-enriched, oxygen-depleted, more acidic and less productive, increasingly impacting on biota.
- Morocco's is experiencing steep changes with climate change (intense warming, hydrological changes), which are also reflected in a likely northward shift of the upwelling system and fisheries production: need to include this forecast in fishery management.
- The relatively cool Mediterranean waters off Morocco offer a refuge for thermally stressed Mediterranean species, which should be supported by marine protected areas.

Les implications économiques du réchauffement global

Daniel NAHON

Professeur émérite, Université Aix-Marseille, France



Introduction

Dans les décennies à venir, le réchauffement climatique global, en s'amplifiant, entraînera de grandes modifications physiques, géographiques, biologiques, sociales. Ses principaux effets attendus sont :

- (i) la modification du régime et de la répartition des précipitations;
- (ii) un réchauffement plus important des terres que celui des océans;
- (iii) une fonte partielle et peut-être à terme totale de la banquise;
- (iv) une montée du niveau des mers qui vient en corollaire;
- (v) une profonde modification des écosystèmes régionaux et globaux.

Et cela aura plusieurs implications qui contrôleront le développement économique des sociétés du XXI^e siècle.

Les implications que l'on peut déjà pressentir sont celles qui toucheront l'agriculture, la pêche, l'énergie et notamment les combustibles fossiles, les équipements des territoires (villes, routes, barrages,...), le tissu industriel, les minerais exploités pour l'économie verte qui s'ouvre au monde, les emplois, les flux migratoires de populations humaines et animales mais aussi, à terme, végétales, la santé humaine. Tous ces secteurs touchés auront entre-eux de nombreuses rétroactions qu'il paraît difficile de cerner de nos jours. Mais les rendements agricoles seront touchés et il est urgent de «re-calibrer» l'agriculture pour faire face à la dérive économique qui en résultera. C'est le principal sujet de cette intervention et indirectement lié l'exploitation à venir des minerais qui seront nécessaires au lancement de l'économie verte qui prend le relais.

L'agriculture dépend avant tout d'une ressource naturelle qui n'est pas renouvelable à l'échelle humaine : le sol. Et le sol, support de toute l'agriculture, est un système global dont dépendent:

la nutrition des humains, des animaux, des végétaux; la biodiversité qu'il contient; l'eau douce continentale; le climat; les paysans et le monde rural en général. Et *l'économie de l'agriculture n'a jamais su être évaluée à sa juste valeur car l'exploitation intensive et extensive des terres à des fins agricoles a un coût environnemental, un coût énergétique et un coût humain !*

Ce sont ces coûts qui sont déterminant sur l'impact économique et que nous allons passer en revue.

Le coût environnemental : le sol (argile et nutriments), l'eau douce (irrigation), la biodiversité, le climat.

1. Le sol arable

Sur les 14,84 milliards d'hectares de terres émergées, en tenant compte des surfaces recouvertes de glace, de sables vifs, de roches à nu, de lacs ou mers intérieures, les sols en eux mêmes ne couvrent qu'environ 11,5 milliards d'hectares (75%) dont seulement 2,5 milliards sont arables (Fig 1). Pas plus, pas moins! Les sols dans leur plus grande part ne sont donc pas cultivables car situés dans des zones trop en pente, dans des régions trop froides, voire glacées (permafrost), dans des aires trop arides, trop humides, ou tout simplement parce que les terres sont trop pauvres ou trop peu épaisses.

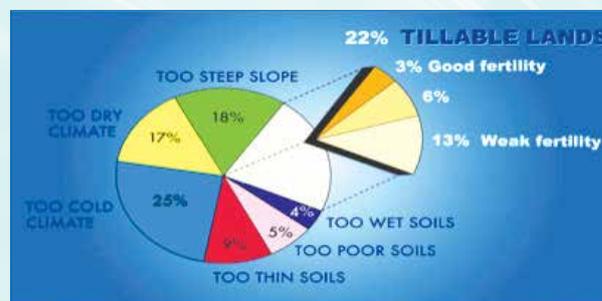


Fig 1 : 22% seulement des terres sont arables

2500 millions d'hectares, c'est peu : environ 50 fois le territoire français. Ajoutons 3500 millions d'hectares utilisés pour le pâturage mais dont les sols sont trop peu épais pour les livrer à la culture. Et déjà près de 1600 millions d'hectares sont cultivés, parmi

lesquels 70 millions sont dévolus aux biocarburants, 300 millions d'hectares sont irrigués dont 50 millions devenus inexploitable par salinisation excessive.

Bien plus, ce sont chaque année pas moins de 8 millions d'hectares de terres arables qui sont soustraites par maltraitance, par destruction, par ignorance : 6 millions d'hectares sont ainsi abandonnés par perte de fertilité suite à la déforestation, à l'érosion et à la salinisation, et 2 millions sont perdus par urbanisation (Nahon, 2012). À l'évidence, le sol n'est pas une ressource renouvelable à l'échelle humaine : sa vitesse de formation se mesure en dizaines de millénaires et pour les plus épais, situés dans les zones humides tropicales, en centaines de milliers d'années, ce qui en fait les plus fragiles alors que les «réserves» en terres arables se situent dans ces régions. La terre féconde s'épuise sous nos yeux !

Les sols cultivés sont soumis à des dégradations qui sont l'œuvre de la négligence humaine dans leur utilisation. La pollution chimique (par métaux lourds, par déchets, par radionucléides...), la stérilisation (par salinisation excessive, par perte de la biodiversité) ou la destruction (par érosion ou par urbanisation) sont autant de problèmes qui affectent les terres arables au point de craindre que l'humanité manquera de sols pour nourrir les populations (Fig 2).

Nous ne verrons ici que trois aspects de ces problèmes : l'érosion, l'urbanisation, la perte de biodiversité. Car ce sont eux qui sont responsables de la baisse de la production.



Fig 2 : Dégradation du manteau du sol labouré et diminution des rendements

L'érosion des terres arables

La structure du sol le protège de l'érosion par le vent et la pluie. Mais il suffit de labourer profondément un sol arable pour que cette structure soit détruite, livrant la partie supérieure du sol à l'érosion linéaire par ruissellement des eaux de pluie (Fig 3). Le labour est aidé en cela par les lourds engins de

travail de la terre qui écrasent les petits agrégats argileux structurant le sol, compactent les premiers décimètres de surface et empêchent l'eau de pluie d'y pénétrer. Le ruissellement ainsi favorisé parcourt la surface du sol, prend de la vitesse et incise la terre en rigoles ou chenaux d'érosion.



Fig 3 : Erosion du sol par mauvaise exploitation agricole (labours)

Et si le labour est dans le sens de la pente, il accentue considérablement la vitesse d'érosion entraînant l'argile nourricière chargée de nutriments minéraux et de matière organique. Le sol se défait ainsi de sa fertilité naturelle qu'il faudra compenser par un apport considérable d'engrais chimiques. Ces derniers ne seront pas tous puisés par la végétation et une quantité non négligeable d'entre eux seront entraînés au prochain orage avec l'argile vers les rivières en les polluant et en remplissant leur lit de sédiments. Ce qui favorisera désormais les inondations catastrophiques qu'on connaît en milieu rural.

Les sols arables sont donc soumis, par leur mauvaise exploitation agricole (labours), à une érosion considérable. À titre d'exemple alors que l'érosion naturelle moyenne à la surface du globe est inférieure à 0,5 tonne par hectare et par an (0,5t/ha/an), on considère que les sols labourés ont une érosion comme suit : supérieure à 20t/ha/an pour 20% d'entre eux, entre 7,5t/ha/an et 20t/ha/an pour 50% des sols cultivés et inférieure à 7,5t/ha/an pour seulement 30% de ces sols (White, 2006). Et si on considère sur un paysage plat un sol convenablement exploité si bien que l'érosion le concernant n'est que de l'ordre de 3t/ha/an, cela correspond tout de même à un appauvrissement de la fertilité avec une perte de 25kg/ha/an de carbone organique, de 10kg/ha/an d'azote organique, de 3kg/ha/an de phosphore, de 10kg/ha/an d'ions échangeables (potassium, sodium, calcium, magnésium, oligoéléments, et si ce sol est amendé et traité, ce qui est le cas de la presque totalité des sols arables des régions tempérées, la perte en engrais est de 10 à 25%t/ha/an et en pesticides de 30%.

On considère que la perte globale annuelle des sols arables en carbone organique minéralisé en CO₂ est de deux milliards de tonnes (2Gt).

L'érosion n'intervient pas seulement pour diminuer la fertilité du sol, mais peut également conduire à sa destruction, en particulier dans les zones tropicales où les coupes à blanc des forêts pour servir l'extension des terres agricoles, l'érosion peut atteindre des chiffres records de 200t/ha/an (Fig 4).



Fig 4 : Déforestation dans les zones tropicales qui peut entraîner la destruction du sol

D'une manière générale l'érosion entame la surface du sol (ce qu'on appelle le front d'érosion) de 0,5 à 5 m chaque millénaire, alors que l'approfondissement biogéochimique du sol au dépens de la roche sous jacente (roche mère), c'est-à-dire la formation du sol est de 0,05 m pour 1000 ans. Ce qui veut dire qu'en moyenne l'érosion actuelle des sols arables progresse de 10 à 100 fois plus vite que ne se régénère le sol (Fig 5). Le capital des terres arables se dégrade! Et il me semble que c'est là la toute première priorité de l'agriculture.

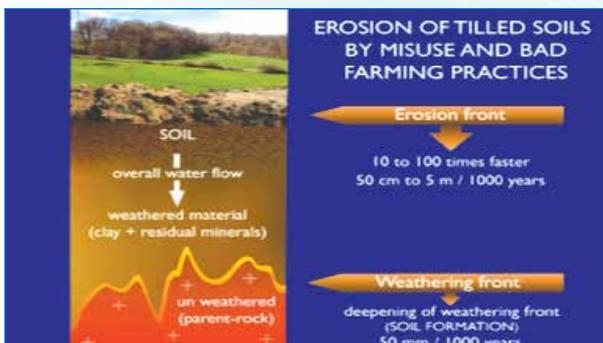


Fig 5 : L'érosion actuelle des sols arables progresse de 10 à 100 fois plus vite que ne se régénère le sol

L'urbanisation

De même l'urbanisation est responsable de la destruction de superficies considérables de sol arable. Au début du XX^e siècle, 14% de la population mondiale vivait dans les villes contre 54% au début du XXI^e siècle. Et la tendance est à l'augmentation

rapide des citadins avec plus de 5 millions de nouvelles personnes qui s'installent chaque mois dans les espaces urbains d'Asie, d'Inde, d'Amérique centrale et du Sud, d'Afrique, cinquante fois plus que dans les villes des pays industrialisés. On estime que chaque seconde, ce sont 100 m² de terres cultivées qui disparaissent par urbanisation aux États-Unis d'Amérique (Genske, 2003) et 500 m² en Chine ou au Brésil. Chine et USA développent leur surface urbaine en consommant chaque année une superficie de terres arables équivalente à cinq fois celle du Danemark! Bien d'autres causes de réduction des surfaces arables existent ; nous renvoyons le lecteur à de nombreuses publications qui traitent cela en détails.

2- La biodiversité

Les conséquences directes de l'érosion mais aussi de la maltraitance des sols cultivés par l'utilisation souvent abusive et généralisée de pesticides et d'engrais sont une diminution importante de la biodiversité de «l'ombre», celle que l'argile du sol abrite.

La matière organique du sol est constituée à la fois par tous les organismes et microorganismes vivants animaux et végétaux et par leurs cadavres et leurs débris qui s'accumulent à leur mort, étant eux mêmes décomposés par des bactéries et des champignons qui s'en nourrissent tout en libérant le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre et tous les autres éléments que contenaient végétaux et animaux de leur vivant (Fig 6). Une partie de ces éléments chimiques peut s'ancrer sur et dans les argiles. Une autre partie s'organise en molécules directement assimilables par les racines des plantes.



Fig 6 : Les vers de terre : 10 millions/ha dans le sol des prairies consomment 90 t de matières organiques/ha/an

La matière organique est plus labile. À l'origine de la litière, les végétaux qui, au fil des jours et des années, livrent d'énormes quantités de débris, feuilles, branches, tiges. Eux-mêmes, comme tout

organisme vivant, viennent à mourir sur place. Et tout ce petit monde s'amoncelle sur le sol et y pourrit doucement pour disparaître de notre vue assez rapidement et constitue l'humus noir du sol. Mais à la saison suivante, tout recommence.

Qu'est-ce qui fait pourrir ces débris de plantes et comment sont-ils incorporés dans le sol? La diversité des créatures vivantes du sol est pour l'essentiel responsable de la fragmentation, de l'incorporation, de la dégradation de la matière organique. En quelque sorte un recyclage naturel et continu, indispensable pour que la vie elle-même, animale et végétale, puisse se perpétuer. On estime que le poids des organismes vivant dans le sol serait de l'ordre de 6 à 8 tonnes par hectare.

Bien des sols sont épuisés d'avoir été exploités sans retenue, à renfort d'engrais et de pesticides. Leur fertilité pourrait reprendre des couleurs grâce aux vers de terre, à en juger les résultats obtenus sur la production du thé de l'État de Tamil Nadu en Inde par des chercheurs de l'université Pierre et Marie Curie et de l'université de Sambalpur. «Depuis une dizaine d'années, la production des plantations de thé stagnait malgré l'utilisation croissante d'engrais et de pesticides. Après quatre-vingts ans de culture intensive, les sols étaient dégradés, ayant perdu une bonne partie de leur humus. En désespoir de cause, des vers de terre d'une espèce commune, très répandue dans les régions tropicales, ont été introduits sur plusieurs plantations avec leur nourriture : des résidus de la taille des théiers et du compost. Le résultat fut spectaculaire. Après trois ans seulement, la production des feuilles de thé a augmenté de 35% à 240%, et la rentabilité des exploitations s'est accrue de 28% à 260%».

En creusant la terre, qui se soucie de ce micro monde qui pullule et qui reçoit tous nos déchets, tous nos oublis? Il est ignoré de tous ou presque, je pense notamment aux scientifiques qui leur consacrent leur vie. Et pourtant, c'est la moindre des choses, car que serait la vie et sa diversité sans lui? Nous respirons et nous digérons grâce à lui, et les plantes aussi. La terre féconde regorge de bactéries, d'actinomycètes, de champignons, d'algues, de protozoaires, dont la taille de chaque individu est inférieure au micromètre (Fig 7). La plupart d'entre eux se tapissent dans les 30 cm supérieurs du sol, là où leur nourriture abonde, car ils s'alimentent du carbone des débris végétaux et animaux morts. Le carbone n'est pas perdu pour tous! Si ces microorganismes n'existaient pas, la terre serait jonchée de cadavres.

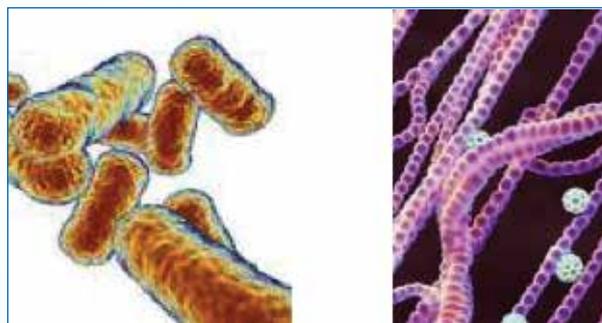


Fig 7 : Biomasse microbienne: bactéries, actinomycètes, champignons, algues, protozoaires... Contrôle du cycle d'azote et de carbone

Parmi eux, les bactéries (auxquelles nous associons les actinomycètes) ont dans le sol une activité prépondérante. Bien sûr, nous verrons aussi que le rôle des champignons filamenteux, les pseudomycéliums, est comparable à celui d'une assistante sociale pour mettre en communication de bonne entente les végétaux entre eux.

Les bactéries s'adaptent aux variations de leur environnement de façon impressionnante. Elles existent depuis des milliards d'années et seront encore là bien après les hommes. Elles ont accompagné le développement de la vie sur notre planète. Certains organites des cellules des êtres vivants (animaux, végétaux et humains) qui nous permettent de respirer, ne sont rien d'autre que des restes de bactéries ingurgitées par les espèces vivantes et dont le matériel génétique a été mis en commun pour le plus grand bien de l'évolution.

Chaque gramme de sol contient plus d'un milliard de bactéries et ce chiffre est multiplié par 10 lorsqu'on se rapproche d'une racine de plante. Il existe de très nombreuses espèces de bactéries, des dizaines de milliers, vivant en colonies pour mieux résister, mieux s'adapter aux variations répétées, discontinues, des conditions de milieu; car l'union fait la force, ou autrement dit, le multiple n'est pas l'addition du simple, il est plus, il permet à d'autres forces nouvelles de s'individualiser, de se révéler. La mise en réunion de ces bactéries, leur permet de se nourrir et de se spécialiser aux produits fournis par la matière vivante : carbone, azote, phosphore, oxygène dans lesquels elles puisent leur énergie.

Certaines bactéries peuvent même, en émettant des substances acides, dissoudre des minéraux pour libérer leur phosphore, le rendant disponible pour les plantes; nous reviendrons sur les cycles de l'azote et du phosphore plus en détail par la suite,

mais afin de bien souligner le rôle irremplaçable des bactéries, abordons en premier le devenir du carbone organique.

Les débris organiques végétaux qui s'accumulent dans la litière sont fragmentés par l'activité de la faune qui y réside, dont les lombrics. Les bactéries viennent y cueillir l'énergie et les nutriments dont elles ont besoin. Chaque molécule organique est un assemblage d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'azote, d'oxygène liés entre eux par des liaisons énergétiques plus ou moins fortes. En brisant ces liaisons entre atomes, les bactéries récupèrent l'énergie qu'elles contenaient et l'utilisent pour vivre et se multiplier. Les molécules les moins complexes sont les sucres (glucose). Elles sont consommées en premier, et rapidement, par les microorganismes. Avec la complexité grandissante de l'assemblage des molécules, c'est-à-dire avec des cohésions de plus en plus fortes entre les atomes qui les composent, leur dégradation, leur «consommation», par les bactéries, requiert plus de temps. Après les sucres, elles s'attaquent aux autres glucides (saccharose, amidon, cellulose, poly-saccharides). Vient ensuite le tour des lipides, concentrés pour l'essentiel dans les cires et cuticules des feuilles et des aiguilles et, pour une faible part, dans les tissus de réserve, d'être dégradés par l'activité des microorganismes. Enfin les lignines, aux longues molécules donnant la rigidité aux végétaux, sont peu utilisées par les microorganismes comme source de carbone; elles perdurent plus longtemps dans les sols.

L'essentiel de la dégradation des cadavres organiques de végétaux (ou d'animaux) de la litière sont des bactéries appelées saprophytes. On peut comparer ces microorganismes à des petits mécaniciens démontant sans cesse les résidus de matière organique morte, comme on défait un «mécano», à part qu'ici, chaque pièce démontée correspond à un carbone, à un atome d'azote, à de l'oxygène, de l'hydrogène, et à des tas d'autres petites pièces annexes, soufre, phosphore, silice, fer, manganèse, calcium, potassium, sodium, etc., pour les livrer à d'autres ouvriers plus spécialisés chacun dans son domaine. Le but final étant de se nourrir et de se multiplier en récupérant l'énergie libérée et une partie des atomes détachés. Le reste des atomes remis en circulation, se reconstruit en nouvelles petites molécules assimilables par les racines de plantes.

Carbone (C) et azote (N), une fois libérés de la matière organique, s'engagent dans différents périples.

Tout d'abord le carbone (Fig 8). Une partie est utilisée par les bactéries, 2 à 8%, qui s'en nourrissent. La plus grande partie, 60 à 80%, est recombinaison à l'oxygène, en petites molécules, si petites, si légères qu'elles s'envolent ! Elles sont volatiles, et constituent un gaz, le gaz carbonique ou CO_2 . Nous savons tous aujourd'hui, que ce gaz, qui diffuse depuis tous les pores du sol, est un gaz à effet de serre. Aussitôt émis, il se mêle à l'atmosphère dont il enrichit la concentration. Une petite partie de ce gaz reste dans la porosité du sol sous forme de gaz ou dissous dans l'eau qui y circule, si bien que la teneur en CO_2 contenu dans le sol reste 100 à 300 fois supérieure à celle contenue dans l'air que nous respirons. Mais imaginons un instant que cette fabuleuse histoire se déroule dans un sol qui a les pores bouchés, envahis par l'eau. L'oxygène ne peut que difficilement accéder aux atomes de carbone défaits. Ce n'est donc pas une oxydation qui se produit, mais une réduction, et le gaz émis n'est plus du CO_2 , mais bien du méthane CH_4 , accompagné de quelques uns de ses cousins germains, l'éthylène C_2H_4 et l'éthane C_2H_6 . Un tel cas existe dans les sols de rizières inondées ou dans les sols de marais. Et d'ailleurs, les rizières cultivées par les hommes contribuent à 20% des émissions anthropogéniques de méthane, dont l'effet de serre est trente fois supérieur à celui du gaz carbonique.

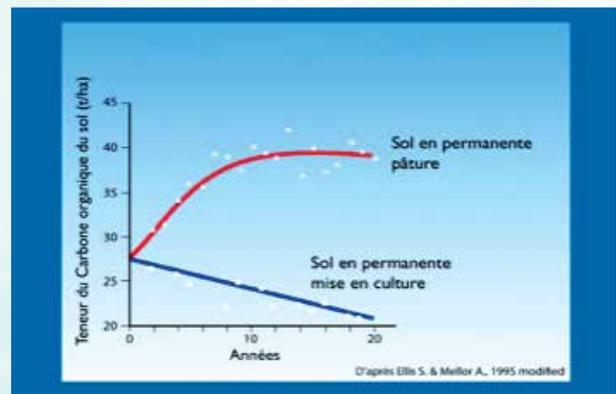


Fig 8 : Carbone organique du sol

Et l'azote, que devient-il? Une fois démonté dans la litière par les bactéries saprophytes, l'azote est livré sous forme d'ammonium (NH_4^+) à des ouvrières aux noms compliqués (Nitrobacter, Nitrosomonas, Nitrososprira, Nitrosococcus, Nitrosolobus...) spécialisées dans le traitement de ces atomes. Là aussi, ces bactéries nitrifiantes ont pour rôle d'oxyder l'azote libéré. Cette oxydation est appelée la nitrification et conduit à fabriquer des nitrates (NO_3^-), forme très soluble de l'azote et assimilable par les plantes. Comme précédemment, si le sol cultivé est inondé et sa porosité pleine d'eau, des

réactions de réduction apparaissent, ainsi que d'autres bactéries anaérobies (développées dans un milieu dépourvu d'oxygène). Celles-ci respirent l'oxygène contenu dans les nitrates (NO_3^-) qu'elles transforment en gaz, l'oxyde nitreux N_2O ou même en azote N qui diffusent vers l'atmosphère. Cette réaction est appelée la dénitrification. Elle montre combien l'utilisation d'engrais azoté dans les rizières inondées, lorsque la plante croît, doit être pensée et soupesée, la production d'oxyde nitreux risquant d'être importante. Et ce gaz a un effet de serre de 200 à 300 fois supérieur à celui du gaz carbonique.

Les cycles du carbone et de l'azote sont donc étroitement couplés. La décomposition des résidus végétaux, et notamment de culture, va dépendre des quantités relatives de carbone et d'azote, mais aussi, de l'humidité du sol et donc de sa teneur en argile. Carbone et azote sont au cœur de la fertilité des terres mais aussi de la pollution de l'air (avec le CO_2 et N_2O) et de l'eau (avec le nitrate NO_3^-).

Un sol est fertile s'il contient suffisamment de nutriments pour alimenter les végétaux qui y poussent, et si ce véritable garde-manger est régulièrement et naturellement renouvelé. Pour cela deux conditions sont requises qui sont à la source de tous les autres paramètres qui font qu'un sol est dit productif. Ce sont respectivement les argiles et la matière organique.

Les argiles sont ces minuscules minéraux de quelques milliardièmes de mètres disposés en feuillets (silicates en feuillets) empilés plus ou moins régulièrement et qui retiennent sur et entre leurs feuillets des atomes ou des petites molécules d'éléments dont les plantes ont besoin pour vivre et se développer : calcium, magnésium, potassium, fer, aluminium, oligoéléments, phosphore... tous étant entourés de molécules d'eau et solidement arrimés à l'argile. Avec tous ces nutriments accrochés de toutes parts, l'argile ressemble à des «cars rapides» qui sillonnent les routes et les pistes de terre rouge d'Afrique, débordant de passagers et de colis.

Les argiles sont issues de l'altération des roches sous-jacentes par réaction chimique de ses minéraux avec l'eau de pluie, tout comme le fait un morceau de sucre qui se dissout dans l'eau. La différence est que les minéraux ne se dissolvent comparativement que très lentement, de quelques millimètres à quelques centimètres par millénaire. Une fois mis en solution les éléments chimiques peuvent être soit entraînés par l'eau qui percole dans le sol soit se recombina

sur place en nouveaux minéraux de très petites taille, les argiles. Il est clair que la formation d'un sol argileux de quelques mètres d'épaisseur nécessite quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années. L'argile est donc très précieuse à la fertilité d'une terre. À l'échelle humaine, une fois en place, l'argile est irremplaçable. Elle constitue un capital à épargner coûte que coûte. Sa richesse en nutriments dépend tout d'abord de la composition des roches qui l'ont enfantée, et aussi du climat; car une pluie trop abondante aura tendance à entraîner avec son écoulement bien des éléments chimiques vers les rivières, çà de moins à récupérer entre les feuillets de l'argile.

3- L'eau d'irrigation et son coût

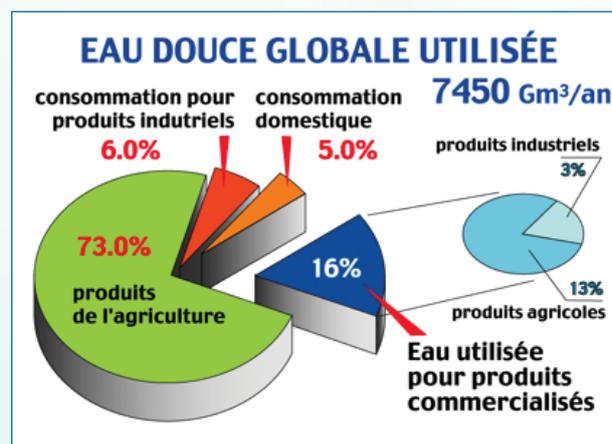


Fig 9 : Eau douce globale utilisée
AGRICULTURE= 6400 Gm³/an

L'eau verte, c'est ainsi que l'on nomme l'eau qui tombe sous forme de pluie avec une moyenne planétaire de 900 mm/an. Mais l'eau de pluie arrose différemment la surface des continents. Certaines parties du globe, comme les régions froides nordiques ou les régions chaudes équatoriales, sont particulièrement bien loties en précipitations. Elles viennent alimenter les nappes phréatiques souterraines et grossir rivières et fleuves qui abondent. La quantité d'eau charriée par tous les fleuves de monde est estimée à 36 750 km³/an ce qui correspond à environ 7% des pluies tombées à la surface du Globe pendant une année (525 000 km³) ou autrement dit presque 32% des précipitations reçues par les terres émergées. L'essentiel est le fait des grands fleuves des régions humides. Quant aux nappes d'eau souterraines continentales, elles constituent un réservoir estimé à 8.1 millions de km³. L'eau de ce réservoir est importante pour la vie des hommes mais ne représente que 0,6% de la masse d'eau planétaire. Elle est disponible et le plus

souvent accessible tout comme peut l'être l'eau des fleuves et des rivières et constitue toutes ensembles ce que les spécialistes désignent par «eau bleue».

Bien que le principal réservoir d'eau douce de la planète corresponde à l'eau stockée sous forme de neiges «éternelles» ou de glace (glaciers, calottes polaires, eau gelée des pergélisols), c'est-à-dire 33 millions de km³ (environ 2.5% de l'eau totale de la Terre), elle reste peu accessible à une exploitation quotidienne nécessitée par le travail des hommes.

L'eau douce naturellement disponible pour les hommes est donc celle qui provient des précipitations sur les continents (en gros l'équivalent de 0,0085% de toute l'eau présente sur Terre), celle des cours d'eau (0,0027%) et celle des nappes souterraines (0,6%). L'eau des pluies et des fleuves est régulièrement et annuellement renouvelée et s'infiltré en partie pour charger les aquifères profonds.

De nombreux pays souffrent d'un déficit pluvial, car situés dans les zones climatiques arides ou semi-arides. Et pourtant ils n'en sont pas moins peuplés et nécessitent, pour le développement agricole de certaines de leurs régions, d'un aménagement important à des fins d'irrigation.

L'eau servant à irriguer est puisée directement dans les fleuves ou dans les réserves souterraines que constituent les nappes phréatiques.

L'eau est donc là, partout. D'ordinaire, les cultivateurs sont des gens de bon sens et mesurent les dépenses dans leur exploitation. Mais aujourd'hui, l'eau ne leur coûte presque rien. Bien plus, ils sont encouragés à aller chercher l'eau là où elle se trouve, au plus profond des couches géologiques qui galbent leur paysage, à 1000, 2000 ou 3000 mètres! Dans certains pays, les lois leurs permettent de déduire de leurs impôts le prix des équipements nécessaires pour tirer l'eau des fleuves ou des nappes. De quoi activer leur hardiesse d'irriguer.

En creusant des puits ou en réalisant des sondages, c'est pire: la difficulté à concevoir qu'une réserve se vide lorsqu'on ne la voit pas nous est consubstantiel et nous interdit de croire que cela peut nous arriver. Les exemples ne manquent pas.

Les fleuves d'abord. Le Niger est le troisième fleuve d'Afrique, il arrose une grande partie de l'Afrique occidentale et favorise la culture du riz, du coton, de la canne à sucre. Il s'épuise désormais dans sa traversée des plaines du Mali. En Chine, le

Fleuve Jaune d'où a fleuri un des premiers foyers agricoles, est contraint à supporter l'extraordinaire développement rural du pays. Vidé d'une partie de son flux, il n'atteint la mer désormais que pendant les fortes crues. Il en est de même de l'Indus.

Les eaux du fleuve servent à irriguer les sols arables. Une partie de l'eau qui a pu percoler jusqu'à la nappe souterraine et regagner le fleuve n'est plus la même. Sa composition chimique s'est modifiée en se chargeant en sels arrachés à l'argile du sol en profondeur. C'est un effet de boucle : plus on irrigue à partir des fleuves et plus l'eau qui retourne au fleuve est salée. Pour un grand fleuve comme le Colorado aux États-Unis, tout au long de son cours, il voit ses eaux se saler (20 fois). À tel point que l'eau du fleuve devenait inutilisable pour servir l'agriculture du Mexique à l'aval. Il aura fallu construire à la fin du XXe siècle une usine de dessalement à Yuma, pour que l'eau puisse être utilisée à des fins agricoles au Mexique. La conscience du risque pour le devenir des eaux du fleuve Colorado n'était que conjoncturelle. Désormais l'eau tirée par le Mexique finit par épuiser le fleuve, qui se meurt sans atteindre son embouchure, sauf pendant les grandes crues. Et c'est tout l'écosystème marin du golfe de Californie qui se désorganise au grand malheur des artisans pêcheurs!

On ne saurait en effet modifier le débit des fleuves sans en subir à moyen terme les conséquences. L'évidence éclate lorsque ces fleuves aboutissent à des lacs ou mers intérieures. L'exemple de l'assèchement de la mer d'Aral. Autrefois plus étendue que la Suisse, la mer d'Aral figurait parmi les trois ou quatre plus grand lacs du monde : une mer intérieure qui a perdu aujourd'hui les deux cinquièmes de sa superficie parce que le débit des deux fleuves principaux qui l'alimentent est devenu insuffisant. L'eau puisée a servi pendant 30 ans à irriguer les champs de coton et de riz de l'Ouzbékistan et du Kazakhstan. Ce cas n'est pas unique. Le lac Chapala au Mexique a perdu la moitié de son volume et se réduit comme une peau de chagrin. L'irrigation, si utile aux hommes, devient pour les lacs, mers intérieures et fleuves des zones semi-arides, une plaie profonde d'où s'écoule l'eau nourricière. Certains fleuves jadis majestueux ne seront plus dans les décennies qui viennent que des ruisseaux égotants.

L'eau servant à irriguer est puisée directement dans les fleuves ou dans les réserves souterraines que constituent les nappes phréatiques.

Le volume global d'eau douce utilisé pour la production agricole est estimé, en moyenne annuelle, au début du XXI^e siècle, à 6400 milliards de m³ (6400Gm³) (Fig 9). Si chaque nation devait fournir elle-même les produits agricoles de sa consommation intérieure, cette quantité d'eau douce globale serait portée à 6750 Gm³ par an. L'échange international de denrées alimentaires permet, à l'évidence, d'économiser un peu plus de 5% de la consommation d'eau douce à des fins agricoles. L'intérêt des nations est donc de favoriser le commerce de marchandises agricoles qui nécessitent beaucoup d'eau pour être produites, depuis un pays dont la ressource en eau douce abonde vers un pays à ressource en eau limitée. C'est, à n'en pas douter un bienfait de la globalisation.

Mais la ressource en eau douce n'est pas la seule à considérer. L'abondance des terres arables et leur fécondité sont tout aussi importantes. Le Canada ne compte pas la richesse de sa ressource en eau, en revanche il est limité par ses terres à usages agricoles. Ce pays est contraint à préserver la fertilité de ses sols et pour cela doit mettre en œuvre des pratiques de conservation de sa terre.

Une culture, pour croître, a besoin d'eau et de nutriments. L'eau est celle que la plante a dû mobiliser par ses racines depuis sa germination jusqu'à sa maturité, c'est-à-dire jusqu'à sa récolte. C'est en quelque sorte toute l'eau évaporée (on parle d'eau «évapo-transpirée») par chaque individu végétal tout au long de son existence. La plante a aussi sa propre eau de constitution comme toute espèce vivante. Mais cette quantité d'eau est infime lorsqu'on la compare à l'eau consommée tout au long de sa vie. Par exemple, l'eau contenue dans un kilogramme de blé est de un litre, en revanche pour produire ce même blé, il aura fallu utiliser entre 1000 et 1500 litres d'eau selon la qualité du sol sous-jacent. Les nutriments sont fournis à la plante par l'argile du sol et par la matière organique dégradée devenue assimilable. Pompée par les racines et transportée sous forme de sève montante, l'eau gorgée de nutriments est ensuite distribuée dans tous les tissus et toutes les cellules du végétal. Si le sol est déficient en nutriments, comme c'est désormais souvent le cas après une trop longue période d'exploitation du sol, on y rajoute des fertilisants, industriels le plus souvent.

L'eau virtuelle contenue dans les produits agricoles commercialisés entre nations est un moyen d'économiser sensiblement l'usage de l'eau douce

mais aussi de préserver une partie des terres arables les plus fragiles à l'échelle de la planète. Et l'économie est d'autant plus substantielle que les denrées sont issues d'un pays à ressource en eau importante et riche en sols fertiles, et destinées à un pays dont ces deux ressources naturelles font défaut.

Plus qu'une simple question d'économie, il s'agit bien d'un fondement stratégique, dans la mesure où des conflits sociaux internes et des guerres entre états riverains peuvent être évités. Bien des pays, où les ressources en eau et en terre arable sont à la merci d'une fluctuation climatique décennale, sont concernés.

Le coût des produits issus de l'agriculture reflète le prix de l'eau, des traitements sanitaires, des fertilisants, des techniques de labourage et de fermage, du fioul consommé, etc. Cependant comment estimer l'utilisation et la dégradation des sols qui sont le soubassement de toute production agricole? Comment mesurer la vie qu'il contient et sa fertilité naturelle? Car ne nous y trompons pas à chaque usage, à chaque labour, le sol se dégrade et perd en fécondité, tout comme la déforestation, qui a permis de substituer aux arbres un sol agricole, a eu un prix dont nous nous sommes peu souciés, mais qui apparaît plus tard sous forme de modification de l'équilibre atmosphérique : changement du régime des pluies, du contenu de gaz à effet de serre...

Le prix de l'eau est-il lui même convenablement estimé? Sur les 6400 Gm³ d'eau douce utilisée chaque année par l'agriculture, 5330 Gm³/an est de l'eau verte (eau de pluie) et 1070 Gm³/an proviennent du prélèvement effectué par ou pour les agriculteurs dans les nappes phréatiques et les rivières. Heureusement, l'essentiel de l'eau nécessaire à l'agriculture est celle des précipitations naturelles. Est-ce pour autant qu'il ne faille donner aucune valeur à cette eau? Ce sont presque 5% de l'eau de pluie qui tombe sur les continents (115000 Gm³/an) et un peu moins de 3% du débit de tous les fleuves du monde qui servent à nous alimenter chaque année. Cela peut paraître dérisoire dans la mesure où la richesse est renouvelable. Et pourtant pour nourrir la population mondiale, nous avons vu qu'il faudra doubler les prélèvements d'eau bleue dans la prochaine décennie et les multiplier par cinq d'ici 2050. Prélever l'équivalent de 15% du débit mondial des fleuves en 2050 aura des conséquences sérieuses dont il faut se soucier dès à présent. Les exemples traités ci-dessus devraient nous y aider.

Le commerce global d'eau virtuelle permet de sauvegarder l'équivalent d'un tiers de l'eau dont nous nous servons pour irriguer chaque année, c'est aussi comparable au débit annuel de trois grands fleuves comme le Nil ou l'Orénoque.

Le concept d'eau virtuelle est souvent pris en dérision par les agronomes qui n'ont pas eu à travailler avec les petits paysans des régions arides. Et pourtant, il a aussi un autre avantage. Celui de faire prendre conscience au citoyen, mais aussi à l'agriculteur, de la quantité d'eau douce qu'il aura fallu utiliser pour produire notre alimentation.

L'apport de protéines est essentiel à notre régime alimentaire journalier. On les trouve dans les végétaux et les animaux que nous consommons. Produire 1kg de protéines animales nécessite d'utiliser de 3 à 10 kg de protéines végétales et fabriquer 1kg de celles-ci requiert de consommer 1000 à 10 000 litres d'eau douce. À titre d'exemple «pour fabriquer 1kg de protéines de poulet, il faut 2,5 kg de protéines végétales; le rapport est de 1 à 6 pour le porc et de 1 à 8 pour le bœuf». Les produits carnés ont donc une plus haute valeur en eau virtuelle que les produits de culture à la base de notre alimentation ou de celle des animaux d'élevage. Plusieurs études ont calculé le prix de revient en eau virtuelle d'un kilogramme de viande de bœuf désossé en additionnant, sur les trois années d'élevage, le fourrage et les grains employés à son alimentation, l'eau utilisée pour les services et pour étancher sa soif. Bien sûr les résultats obtenus dépendent du terroir, du climat et des techniques de fermage, mais en moyenne, les chiffres acquis restent impressionnants : fabriquer 1 kg de viande de bœuf nécessite d'utiliser 16 000 litres d'eau douce, 5 000 litres pour le porc, 4 000 pour le poulet.

Parmi les produits de culture les plus consommés au monde figurent le riz pour 21%, le blé pour 12% et le maïs pour 9% et fabriquer 1kg de ces céréales revient à dépenser respectivement 3 000 litres, 1 500 l et 900 l.

Aujourd'hui, nous sommes en mesure de convertir en équivalent eau toute nourriture, tout produit confectionné, comme on le fait par ailleurs pour le gaz carbonique CO₂. N'y voyez aucun engouement à la mode, mais bien une donnée nécessaire à une prise de conscience des humains sur le prix de l'eau ou de l'air. Ainsi, ce petit déjeuner pris au Brésil, dans la quiétude d'un lever de soleil tropical, aura coûté pas moins de 2000 litres: trois tasses de café, 420 litres; un petit pot de lait, 200 litres; deux verres de jus d'orange, 340 litres; deux tomates, 26 litres; une pomme de terre, 25 litres; six tranches de pain, 240 litres; le beurre (25 g) et le fromage

(50g), 375 litres; un peu de confiture et un fruit, 100 litres, une omelette de deux œufs, 270 litres !

Les données récemment publiées nous enseignent que le café est la culture qui consomme le plus d'eau, heureusement sous forme d'eau de pluie. En revanche la canne à sucre apparaît comme la culture la moins exigeante avec 142 litres par kilogramme produit. Tout l'intérêt de cette dernière culture pourra être saisi lors de la confection de biocarburants en la comparant aux autres produits employés : oléagineux ou aux autres céréales, maïs, blé, orge. Nous y reviendrons.

Construire des barrages et des retenues, forer des puits jusqu'aux nappes souterraines parfois très profondes, recueillir l'eau des fleuves, aménager des canaux ou des canalisations pour acheminer l'eau d'irrigation jusqu'au champ, tout cela nécessite des investissements financiers considérables. Comparés au prix de l'eau payée par l'agriculteur à l'arrivée, il faut bien reconnaître, quel que soit le pays, que le compte n'y est pas, même si les barrages sont aussi là pour fournir de l'énergie électrique et pour réguler le débit de cours d'eau qui peut s'avérer dévastateur en cas de crues.

Tout en considérant ces bénéfices secondaires, les économistes sont unanimes pour reconnaître que les gains financiers de l'irrigation sont marginaux ou négatifs. Ce qui signifie tout simplement qu'une part importante de nos impôts sert à subventionner l'irrigation. Ne peser l'activité de la ferme qu'à travers ses coûts et ses revenus, ne suffit pas à justifier le prix du litre d'eau d'irrigation.

4- Le climat

Entre 1850 et 2000, la contribution cumulée de l'agriculture en CO₂ atmosphérique est estimée à 264 milliards de tonnes (Gt) de carbone, alors que les émissions dues à l'utilisation des combustibles fossiles et à la fabrication de ciment seraient de 200Gt. D'autres auteurs inversent l'importance relative des contributions : de 81 à 191Gt de carbone pour l'agriculture et de 240 à 300Gt pour les autres (Fig 10).

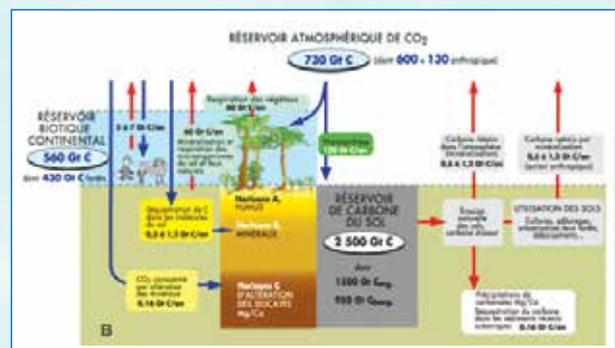


Fig 10 : Le rôle de l'agriculture dans la production de gaz à effet de serre a été minimisé

Peu importe les différences d'estimations, c'est la tendance qu'on doit considérer, surtout qu'il faudrait remonter au moins jusqu'à 1720 pour calculer pleinement la contribution cumulée de l'agriculture aux émissions de gaz à effet de serre. Ces différences d'estimations laissent également entrevoir les difficultés des hommes de sciences à cerner la réalité si complexe du devenir de la matière organique du sol. Les mécanismes biologiques et chimiques impliqués dans la séquestration du carbone ont de nombreuses implications secondaires qu'on cerne mal. La compréhension du stockage du carbone organique du sol repose très largement sur des expériences de laboratoire. Ce qui fait que les relations entre les processus de dégradation et la composition des communautés microbiennes du sol, ne sont pas bien prises en compte dans les modèles dynamiques traitant de la matière organique du sol

Les émissions de gaz carbonique dues à l'usage du sol doivent rassembler celles provenant de la déforestation, qu'elle résulte de l'extension des champs, de l'exploitation du bois d'œuvre, ou des incendies de forêts mais aussi, celles dues à l'augmentation du bétail, à la conversion des terres, à la mise en labour, aux différentes cultures... et bien sûr, celles redevables à la diversité biologique qui œuvre dans l'obscurité, notamment les microorganismes. C'est la raison pour laquelle les modélisations numériques ou thermodynamiques, qui traitent du bilan carbone, aboutissent encore à des résultats bien insuffisants. Dans toutes les tentatives de modèles, la part attribuée au sol reste une inconnue de taille.

En comparaison, malgré la perte de matière organique due à l'exploitation du sol pendant trois siècles, la terre contient un stock de carbone impressionnant qui est 3,3 fois celui de l'atmosphère. Il constitue un réservoir de carbone estimé à 2500 Gt incluant 1500 Gt de carbone organique (inclus dans la matière vivante et morte) et 950 Gt de carbone inorganique (essentiellement sous forme de gaz, de minéraux).

Globalement, plus de 20% des terres arables sont aujourd'hui dégradées par érosion, et chaque année 0,5% de la couverture cultivable disparaît, perdue à tout jamais. Le carbone du sol qui est déplacé par érosion est estimé par an, entre 1 à 2 milliards de tonnes (Gigatonnes, G/t), soit de un à deux fois l'équivalent carbone de la production industrielle des États-Unis. L'homme est devenu le principal agent d'érosion en ayant multiplié par 2,4 les

quantités de terre déplacée par l'érosion naturelle. Celle-ci, estimée à 11 milliards de tonnes de matière annuellement et naturellement transportée à l'océan, est passée désormais à 26 milliards de tonnes.

5- Quelles solutions pour une économie plus durable ?

Les Biocarburants

Aujourd'hui les sociétés industrialisées prennent conscience de la pénurie à venir des combustibles fossiles ou tout au moins de la nécessité d'exploiter des gisements de plus en plus profonds et des ressources à teneur en huiles carbonées réduites. Le coût des carburants fossiles devenant important, les pays tournent leur regard vers les plantes cultivées annuelles susceptibles d'être transformées en combustibles. On les appelle les biocarburants ou agro-carburants.

Pourquoi utilise-t-on des cultures à de telles fins? Est-ce justifié, alors que les denrées alimentaires semblent si précieuses pour assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale grandissante? Pour comprendre les nécessités énergétiques des pays et leur engouement pour les biocarburants, essayons de cerner comment se sont formées les combustibles fossiles et comment les plantes vivantes peuvent s'y substituer.

Le raisonnement est simple au départ. Ce que la nature a pu faire des végétaux en les transformant en combustibles fossiles, au cours de plusieurs dizaines de millions d'années, ne peut-il être fait à l'échelle de quelques jours ou semaines par les technologies humaines? La réponse est bien sûr oui, et les produits obtenus sont des biocarburants.

À partir de là, les pays qui sont, pour leur approvisionnement en pétrole, sous forte dépendance d'autres pays, peuvent palier, en partie, à leur besoin énergétique, en produisant leur biocarburants et en adaptant technologiquement les moteurs qui les utiliseront. Un double avantage pour leur économie. Le Brésil est, encore une fois, un bon exemple. Depuis la crise de 1929, ce pays travaillait sur le procédé de fabrication de carburant biologique pour équilibrer une balance commerciale compromise par les importations. Puis, avec les crises pétrolières des années 1970, la production de biocarburants s'est généralisée, grâce à la création, dans tout le pays, d'une infrastructure remarquablement efficace, avec des plantations

dévolues, des usines de fabrication, des réseaux de distribution. Aujourd'hui, avec plus de 180 millions d'hectolitres, le Brésil est de loin le premier producteur mondial. Son industrie automobile a connu un développement insigne, produisant à ce jour des véhicules pouvant indifféremment fonctionner à l'essence ou au biocarburant.

Deux biocarburants sont actuellement produits industriellement : les esters (composés organiques) issus d'huiles végétales et l'éthanol (alcool) issu des glucides (sucres) végétaux tels que le saccharose, l'amidon, la cellulose, tous trois produits par la photosynthèse.

Les esters d'huiles végétales sont obtenus à partir de graines d'oléagineux, colza, tournesol (dont on fait nos huiles domestiques), soja, palmier à huile. Ces extraits huileux ne peuvent pas être utilisés directement, ils sont transformés avec du méthanol (alcool obtenu à partir du bois d'arbre à croissance rapide comme l'eucalyptus, ou à partir de paille, de coque d'arachide, etc.). Le produit obtenu est un biodiésel appelé par les spécialistes EMHV (ester méthylique d'huile végétale).

L'éthanol est directement issu de la distillation de végétaux riches en sucres comme la canne à sucre, la betterave sucrière, le maïs, l'orge, le blé. Des pays, comme le Brésil ou les États-Unis, l'utilisent directement ou mélangé à l'essence. En Europe, il n'a pas été employé pur, mais sous forme ETBE (éthyl tertio butyl éther) afin d'éviter, en présence d'eau, une séparation entre alcool et essence lors des mélanges. Depuis 1998, l'Europe autorise les mélanges pour une vente à la pompe sans aucune indication pour le public.

Aujourd'hui, seuls les graines des plantes sont utilisées pour la fabrication de biocarburants dits de première génération. Et chaque plante n'a pas le même rendement énergétique à l'hectare. Le colza produit en moyenne 1200 litres d'équivalent pétrole à l'hectare (1200 l/ha) ou en gros 1,2 tep/ha, le blé 1700 l/ha; la betterave entre 2000 et 3000 l/ha; le maïs entre 3000 et 4000 l/ha; la canne à sucre 6800 l/ha. Chiffres éloquentes, montrant qu'il faudrait utiliser la canne à sucre qui, en plus, peut se contenter de

sols dégradés, et consomme le moins d'eau douce (140 litres pour un kilogramme produit). Hélas, elle ne pousse pas sous tous les climats.

Les recherches sont activement menées dans de nombreux pays, pour augmenter le rendement en équivalent pétrole à l'hectare. Peu de solutions existent: ou bien, on trouve la plante rare dont le rendement serait miraculeux, et là peu d'espoir, ou bien on utilise la totalité du végétal et non plus qu'une partie des fruits ou des graines. Cette deuxième voie est celle qu'ont abordée la plupart des pays qui se destinent à la production de carburants d'origine végétale. Ces biocarburants sont dits de deuxième génération et ils permettraient de multiplier par un facteur 5 la productivité à l'hectare.

En 2006, un rapport de la commission européenne et de deux associations engagées auprès des industriels du pétrole et de l'automobile a été cité par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) pour évaluer l'intérêt des biocarburants. «L'éthanol, produit à partir des grains de blé, permet une réduction d'environ 30% de la consommation d'énergie fossile et 22% d'émission de gaz à effet de serre par rapport à une filière essence conventionnelle. La substitution du gazole par du biodiésel de colza, conduit à une réduction d'environ 64% de la consommation d'énergie fossile et de 53% des émissions des gaz à effet de serre. La substitution par des biocarburants de la deuxième génération, issus de résidus forestiers et agricoles et de déchets de papeterie, porterait ces réductions aux alentours de 90%. Cette estimation se rapproche du bilan de l'éthanol de canne à sucre qui permet aujourd'hui les plus fortes économies d'énergie fossile (presque 100%) et de gaz à effet de serre émis (environ 85%), car les besoins énergétiques de la conversion du sucre en alcool sont (aussi) assurés par les résidus de canne.

Les biocarburants sont-ils, comme ce rapport le présente, la solution énergétique d'avenir en tant que carburants liquides? Une sorte de filon d'or vert! Rien n'est moins sûr. Voyons pourquoi?

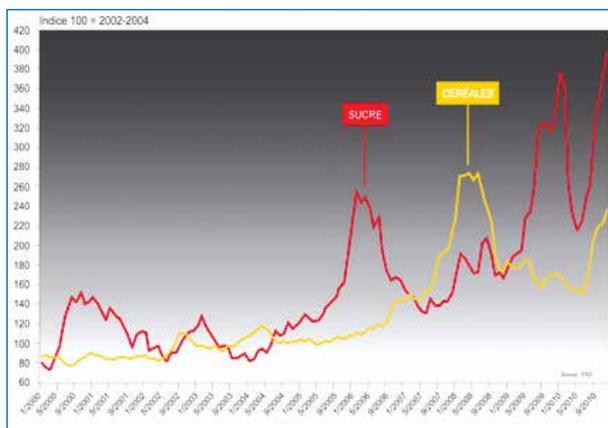


Fig 11 : Implication de la diminution des Gaz à effet de serre et de l'utilisation des biocarburants

L'engouement pour les biocarburants pousse de nombreux pays tropicaux à exploiter leur forêt. Ils y voient un nouvel Eldorado économique grâce aux débouchés offerts par les pays occidentaux. La demande de bois d'œuvre, de pâte à papier, avait permis d'entamer sérieusement les grandes forêts humides, et voilà que l'huile de palme s'en mêle! Prisée par l'industrie, cette huile végétale entre dans la composition de milliers de produits alimentaires, de savons, de cosmétiques et aujourd'hui les plantations de palmiers à huile permettent d'obtenir un carburant de meilleur rendement à l'hectare que le coprah, le colza ou le soja : deux à cinq fois plus! Et depuis une quinzaine d'années, les forêts tropicales humides s'effacent à toute allure de la carte de certains pays, pour faire face à d'immenses plantations, souvent illégales, de palmiers à huile. L'Indonésie, la Malaisie et désormais la Papouasie-Nouvelle-Guinée apparaissent comme les principaux pays producteurs d'huile de palme. Pour cela, ils auront sacrifié près de 100 millions d'hectares de forêt primaire.

L'exemple de ces trois pays laisse supposer que l'impact écologique de l'utilisation des biocarburants si souvent présenté comme bien meilleur que celui dû à l'usage des carburants fossiles, notamment au niveau du bilan carbone, n'est peut-être qu'une fausse idée. Consommer pour les transports des biocarburants plutôt que des combustibles fossiles, permet sans aucun doute une économie de gaz à effet de serre rejeté dans l'air de 20 à 30%. Mais si on prend le temps de raisonner comme un scientifique et non plus comme un ingénieur, c'est-à-dire si l'on dresse un bilan écologique de chacune des étapes de fabrication des biocarburants et de ce qu'elles impliquent comme perte en carbone, en biodiversité,

en eau d'irrigation, ou comme utilisation d'engrais ou de pesticides, on s'aperçoit que le résultat final ne plaide guère en faveur des biocarburants.

Des études récentes montrent au Brésil, en Asie du Sud est, aux États-Unis, que la conversion des terres de forêts tropicales, de savanes, de prairies ou tout simplement de cultures alimentaires, en terres à plantes destinées à la fabrication de biocarburants, entraîne un rejet annuel de gaz carbonique dans l'air de 20 à 400 fois plus important que celui libéré par les carburants fossiles qu'ils devraient remplacer ! Il faudrait des décennies, voire des siècles pour que le bilan carbone retrouve un équilibre en faveur des biocarburants (Fig 11). Prenons l'exemple des États-Unis qui projettent de produire, cinquante six milliards de litres d'éthanol à partir de cultures de maïs, ce qui équivaut en volume de biocarburants à 1/100^{ème} de la production pétrolière actuelle par an. Pour atteindre cet objectif, il faut convertir environ 13 millions d'hectares de forêts, et de terres à soja et à blé jusqu'alors utilisées à des fins de productions alimentaires. Les conséquences de cette conversion sont multiples. Tout d'abord les prix des denrées alimentaires, à en croire les modèles de calculs de scénarios proposés, vont connaître sur le marché national américain et sur les échanges mondiaux de fortes perturbations. On devrait voir augmenter le prix du maïs de 40%, celui du soja de 20% et celui du blé de 17%. Dans le même temps, les exportations des États-Unis déclineraient de 62% pour le maïs, de 31% pour le blé, de 28% pour le soja et par voie de conséquence une chute des exportations de la viande de porc de 18% et de 12% pour celle de poulet. Ensuite, cette conversion de terres produirait une augmentation de 25 à 50% de gaz carbonique au moins pour les trente années à venir. Soustraire environ 13 millions d'hectares de bonnes terres fertiles, «alimentaires», reviendrait à retirer 10% en poids de la production mondiale de grains à des fins de nourriture, 0,9% en poids de la consommation de viande et 0,6% de produits laitiers, et tout cela à une période où la croissance démographique exigerait une plus grande production de denrées alimentaires. Il faudrait donc que ces 13 millions d'hectares dévolus à la fabrication de biocarburants puissent être compensés par la mise en culture d'autant de terres, à condition qu'elles soient tout aussi fertiles que les terres nord-américaines. Dans le cas contraire, ce sont vraisemblablement de plus grandes surfaces de sols qu'il faudrait utiliser dans d'autres pays, avec toujours plus de labours, plus d'engrais, plus d'irrigation, plus de pesticides.

Et ces scénarios calculés ne prennent pas en compte bien sûr les changements importants que connaîtrait la biodiversité! Ni les incertitudes climatiques qui pourraient survenir brusquement, comme à l'été 2008 aux États-Unis, où les intempéries avaient conduit à inonder le grenier céréalier du pays, ou bien comme la sécheresse et les incendies qui ont décimé une partie de la production russe au cours de l'été 2010.

Si donc les biocarburants sont incontournables, il faut savoir quel en sera le prix à payer pour l'environnement. En revanche, il faudrait orienter leur fabrication à partir de plantes non utilisées pour nourrir les hommes et les animaux. En ce sens, avec les biocarburants, on est en plein paradoxe. Les terres servant la chaîne alimentaire sont trop précieuses pour être détournées, surtout dans les pays qui en ont le plus besoin. Les pays pauvres subissent, plus que d'autres, le poids des factures pétrolières. Ils souhaitent pour s'en soulager, comme le fit le Brésil en son temps, développer une filière énergétique alternative à partir de la biomasse. Plusieurs nations africaines et asiatiques sont dans ce cas.

Le souci majeur pour les scientifiques est de résoudre ce problème et plusieurs solutions sont à l'étude. Des plantes pérennes de pays chaud comme le jatropha curcas avec un potentiel de production d'huile de 1800 litres à l'hectare sont sous les projecteurs de la recherche; et déjà la Chine et l'Inde encouragent sa culture en sachant que cette plante pourrait pousser dans toute une partie du continent africain et du Sud-Est asiatique. Au Japon, on se penche sur la valorisation des algues marines, sous le regard intéressé de plusieurs grandes compagnies aériennes. Mais n'oublions pas l'énorme potentiel de la canne à sucre capable de s'adapter à des sols dégradés et même à en stopper l'érosion. Pour l'instant, le Brésil reste le principal producteur d'éthanol, et a lancé, tout comme les États-Unis, plusieurs programmes de biotechnologie soit sur l'amélioration génétique de la canne, pour augmenter sa teneur en sucre, pour la rendre résistante à la sécheresse et tolérante au virus de la maladie dite de la mosaïque ; soit pour transformer la bagasse, ce résidu restant après en avoir extrait le jus, en éthanol par la modification d'enzymes impliquées dans la fermentation, cette réaction biochimique qui permet de transformer le sucre en alcool. Dans une poignée d'années, tous ces procédés seront lancés à une échelle industrielle.

Enfin, de très nombreuses publications scientifiques rapportent des résultats très prometteurs sur la transformation de la biomasse (résidus végétaux de tous ordres) et des déchets organiques domestiques ou animaux par procédés de pyrolyse ou microbiologique. L'intérêt se porte même sur un champignon (*Trichoderma reesei*) qui dégrade de façon complète les débris végétaux en sucres simples, offrant de nouvelles perspectives pour la fabrication de biocarburants de deuxième génération.

Cultiver autrement, c'est s'assurer d'une économie agricole durable.

Le labour aère la terre en la retournant, ce qui était son but, puisque la terre, ainsi «ameublie», permettrait aux racines des plans cultivés de mieux la pénétrer, tout en supprimant les mauvaises herbes. Aérer veut dire oxygéner! La matière organique qui était enfouie, prête à fertiliser les racines des végétaux, est subitement portée à l'air et s'oxyde en gaz carbonique qui s'échappe de la terre pour gagner l'atmosphère. Et avec lui, la fertilité part en fumée. Bien plus, l'eau liée à la fine porosité des argiles arrangée en agrégats, s'évapore et le sol, livré aux rayons du soleil, voit sa température de surface multipliée par deux ou trois, asséchant davantage la terre. Microorganismes, champignons filamenteux, vers de terre et bien d'autres créatures vivantes diminuent alors de façon marquante.

Après un tel constat ne pourrait-on pas cultiver sans labourer ou tout au moins en réduisant le travail du sol? Depuis des premières expériences concluantes menées à Rothamsted dans les années 1930, de nouvelles méthodes de mise en culture, mélangeant pratiques anciennes et modernes, furent proposées. En gros, trois méthodes de techniques culturales simplifiées sont de nos jours utilisées dans de très nombreux pays où l'agriculture joue un rôle important. Il s'agit des cultures sous couvertures ou sous paillis («mulch tillage»), le non labour («no-tillage»), et le labour réduit («reduced till»). Bien que ces trois méthodes diffèrent, elles tendent toutes à préserver et développer un sol fertile, un milieu vivant, (et cela) requiert une attention quotidienne qui permet à terme d'assurer des niveaux de production équivalents voire supérieurs aux méthodes traditionnelles tout en autorisant des réductions d'intrants. Car il ne faut pas rêver, ces méthodes ne suppriment pas les pesticides, elles les limitent. Elles ne les emploient que spécifiquement avant le travail limité du sol ou avant le semis direct.

Limiter le travail du sol ou encore mieux, le réduire à un simple sillon fendu par un disque ou un couteau, le temps d'y déposer le semis refermé aussitôt, reste une façon de préserver son intégrité naturelle. La technique du non labour ou du semis direct convainc de plus en plus de pays. Elle est la forme la plus accomplie de la simplification du travail du sol et de sa préservation. Aujourd'hui, près de 100 millions d'hectares à travers le monde y sont consacrés, quelque soit le type de sol et quel que soient les conditions climatiques. En Amérique du Nord (États-Unis et Canada), ce sont entre 20 et 25% des terres cultivées et environ 50% au Brésil, Paraguay et Argentine, mais déjà tout le reste de l'Amérique latine s'y est mis. L'Inde, la Chine, l'Afrique du Sud, l'Australie consacrent des millions d'hectares à ce procédé de culture... mais l'Europe reste drapée dans ses certitudes ancestrales : seulement 1,5% des terres sont dévolus au non labour ! Et lorsqu'on sait que la Grande-Bretagne à elle seule se sert de cette méthode pour un tiers de ses terres à céréales, on imagine la réticence majoritaire chez la plupart des autres européens. En France, seulement 0,7% des sols cultivés sont consacrés au semis direct.

Le semis planté sans retourner la terre, sous les résidus ou paille de la végétation précédente, conduit à une culture à bon rendement. Quel que soit le sol. Et en plus, l'évaporation de l'eau du sol est considérablement réduite, la température de surface chute d'un facteur deux, l'érosion est diminuée d'un facteur treize pour les champs dont la pente est de 5% et d'un facteur 23 pour un modelé avec une pente de 9%. Ce qui signifie tout simplement que l'érosion due au facteur humain disparaît tout simplement avec des valeurs de moins d'une tonne à l'hectare et par an. Le ruissellement minimisé, ce sont des tonnes de fertilisants à l'hectare qui ne sont plus entraînés avec l'argile vers les rivières et les fleuves diminuant leur pollution. Mais avec le non labour (ou le semis direct), la fertilité en matière organique se reconstitue dans les dix premiers centimètres et les populations de vers de terre se multiplient par deux ou trois, entraînant rapidement une meilleure infiltration des eaux de pluie, ce qui est particulièrement important pour les terres des pays frais et humides qui ont tendance à s'engorger sous les pluies fréquentes.

L'augmentation de la matière organique dans les premiers centimètres du sol s'accompagne d'une augmentation de potassium, de phosphore, d'azote,

qui, protégés au sein des agrégats argileux, sont moins lessivés, moins entraînés en profondeur par les eaux de percolation. Et tant que le sol reste humide, leur disponibilité pour les plantes est totale. C'est une économie d'engrais potentielle. Mais les bactéries pullulant à nouveau, elles peuvent entraîner par leur action une dénitrification et libérer de l'oxyde nitreux vers l'atmosphère.

Tout est-il si merveilleux dans ces pratiques de semis direct? Non, mais c'est l'approche de travail qui préserve le mieux le sol et qui lui restitue ses fonctions naturelles. Si à cela s'ajoutent les économies d'énergie (fuels essentiellement) estimées entre 10 et 20% en moyenne (voire jusqu'à 50% dans des fermes expérimentales du Brésil), la moindre usure des outils et engins agricoles, et donc une économie du temps de travail, on peut dire sans hésiter que la pratique agricole du semis direct présente d'énormes avantages comparée au labourage moderne devenu, en un siècle seulement, une tradition avérée.

Les fertilisants chimiques tels que l'azote, le phosphate, la potasse, sont employés pour compenser le manque en nutriments d'un sol, soit parce que sa composition minérale et organique originelle est déficiente, soit parce que cette dernière s'épuise par excès d'exploitation agricole. Les produits servent à obtenir des plantes de qualité et des récoltes suffisantes.

Au début du XXI^e siècle, le monde agricole avait recours à près de 140 millions de tonnes de fertilisants par an. Avec un souci évident de diminuer leur impact sur la dégradation de l'environnement, de nouvelles formes de fertilisants apparaissent sur le marché. Ceux-ci présentent des dissolutions plus lentes et mieux contrôlées dans les horizons supérieurs du sol, rendant l'utilisation des nouvelles formes d'azote mieux adaptées à la sauvegarde des nappes, et des rivières. Mais leur prix plus élevé et la réponse des plantes cultivées, inférieure par kilogramme d'azote, limitent leur généralisation.

Il paraît impossible de se passer de fertilisants minéraux qui restent un facteur limitant de la production agricole. Car chaque récolte soustrait du sol une quantité donnée de nutriments minéraux qu'il faut connaître pour éviter les carences. Par exemple, en pays tempéré une production d'environ 8 tonnes de grain de blé à l'hectare ponctionne 25 kilogrammes de phosphore et autant de potassium. Cependant, un sol développé

sur granite ne présentera pas les mêmes besoins qu'une terre sur calcaire. Le retour régulier de nutriments à la terre est une obligation.

Les ajouts d'engrais y pourvoient, car dès la première récolte, la terre perd de son contenu nutritionnel. Ils restent indispensables mais peuvent être considérablement réduits dans leur usage grâce à la connaissance que nous avons désormais de leur cycle chimique, de leur interaction avec l'argile du sol et les racines des végétaux, de leur actions sur la vie diversifiée de la terre. Leur diminution et leur usage plus précis s'ils s'accompagnent de techniques de conservation du sol que nous avons précédemment mentionnées, constitueraient à n'en pas douter une révolution dans la façon de traiter le sol arable pour nos besoins. Bien plus, certains engrais peuvent être remplacés s'ils devaient contenir trop de cadmium ou autres métaux toxiques, par de la farine de roches basaltiques, qui a prouvé son efficacité sur le rendement des cultures des sols brésiliens.

Réduire les pertes et les gaspillages

Les produits alimentaires entre le champ et l'assiette connaissent une grande perte. Il s'agit d'un tiers des aliments produits pour la consommation humaine soit 1,3 milliard de tonnes, ce qui est considérable (Fig 12). En gros ce sont 30% de céréales, 20% de viande, 45% des fruits et légumes, 45% de racines et tubercules. Les pertes sont de tous ordres, mais dans les pays sous-développés, le stockage apparaît comme un facteur de pertes importantes (essentiellement par des bactéries et microchampignons) et il serait nécessaire d'envisager une politique massive de construction de silos métalliques.



Fig 12 : Ampleur des pertes et gaspillages : un tiers des aliments produits pour la consommation humaine, soit 1,3 milliards de tonnes (FAO, 2011)

Changer de paradigme économique

Les révolutions agricoles puis industrielles notamment au cours du XX^{ème} siècle avec une exploitation sans retenue des ressources naturelles

a donné naissance à une croissance économique linéaire basée sur la consommation dont les coûts climatique, écologique et humain sont considérables (indicateurs de bien-être en décroissance depuis 50 ans). Récemment, les coûts énergétiques ont été en augmentation considérable après les accidents survenus à Fukushima pour le nucléaire et dans le Golfe du Mexique pour le pétrole, car désormais le coût du risque est venu s'ajouter à la simple exploitation du combustible. Et de plus, le modèle économique actuel détruit plus qu'il ne crée d'emplois (impact prévu sur le PIB: chute de 0,7% à 2,5% en 2060).

Il paraît urgent de changer de paradigme économique !

Le monde change et vite ! Les progrès en santé et en nouvelles technologies de la communication et de l'information remodelent notre économie. Les nouvelles énergies font fureur. C'est le monde de demain et il s'ouvre au débat car les sociétés s'y invitent.

À la croissance économique linéaire que nous connaissons depuis la fin du XIX^e siècle se substituent l'économie de la connaissance avec notamment le biomimétisme dont les OGM font évidemment partie, l'économie circulaire avec la chasse au gaspillage, la réutilisation et le recyclage des métaux, du plastique, des bois, du papier, du verre, des composants électroniques...; l'économie collaborative par l'échange au sein des sociétés et entre les sociétés; la mise en réseau de l'information, de la connaissance, des cultures et des libertés démocratiques; la prise de décision citoyenne, etc.; l'économie verte qui fait appel à une diminution drastique des gaz à effet de serre et qui cède la place à la préservation des sols, de l'eau douce, des mers, des lacs et des forêts à qui il faudra désormais donner un prix et non plus justifier de l'indice de performance sociale sur le seul indice de PIB.

Pour autant ces économies de substitution sont-elles dépourvues de danger ? Non bien sûr. Les énergies vertes consommeront de nombreux métaux stratégiques et l'accaparement des réserves à venir engendrera de nouveaux conflits. Le cas des terres rares est démonstratif par exemple.

Hausse du niveau de la mer : observations et causes

Anny CAZENAVE

*Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie
Spatiales (LEGOS) - Toulouse
Académie des Sciences de France*



Le niveau de la mer et ses variations constituent un des meilleurs indicateurs du changement climatique global. En effet, le niveau de la mer intègre les variations de plusieurs composantes du système climatique en réponse au réchauffement d'origine anthropique et à la variabilité naturelle et interne du climat. Depuis quelques décennies, la Terre est en état de déséquilibre énergétique : elle réémet moins d'énergie vers l'espace qu'elle n'en reçoit du soleil. C'est une des conséquences majeures de l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, résultat de l'utilisation des combustibles fossiles par les activités humaines. Cet excès d'énergie – essentiellement sous forme de chaleur – s'accumule majoritairement dans l'océan, à hauteur de 93% en moyenne sur les 40 dernières années. Les 7% restants servent à réchauffer l'atmosphère et les surfaces continentales, et à faire fondre les

glaces (banquise, glaciers et calottes polaires) (von Schuckmann et al., 2016). L'augmentation du contenu en chaleur de l'océan ainsi que la fonte des glaces continentales (glaciers et calottes polaires) contribuent à leur tour à la hausse du niveau moyen des océans observée depuis un peu plus d'un siècle (IPCC, 2013).

L'observation directe des variations du niveau de la mer a débuté avec l'ère industrielle et l'installation systématique de marégraphes dans quelques ports de l'Europe du nord, puis progressivement dans d'autres régions du globe. Bien que peu nombreux et mal répartis sur la planète, les séries marégraphiques 'historiques' nous indiquent que depuis le début du 20^{ème} siècle, la mer est montée globalement à une vitesse moyenne comprise entre 1.2 et 1.9 mm par an (Fig.1). Depuis le début des années 1990, on mesure en routine la hausse de la mer depuis l'espace, grâce aux satellites altimétriques de haute précision, tels que Topex/Poseidon et ses successeurs Jason-1, Jason-2 et Jason-3, ainsi que les satellites ERS-1/2 et Envisat, et depuis peu SARAL/Altika, Cryosat et Sentinel-3. On dispose aujourd'hui d'une série d'observations depuis l'espace longue de près de 25 ans. Celle-ci montre que le niveau moyen de la mer s'est élevé à la vitesse de 3 mm par an entre 1993 et 2016 (Fig.2).

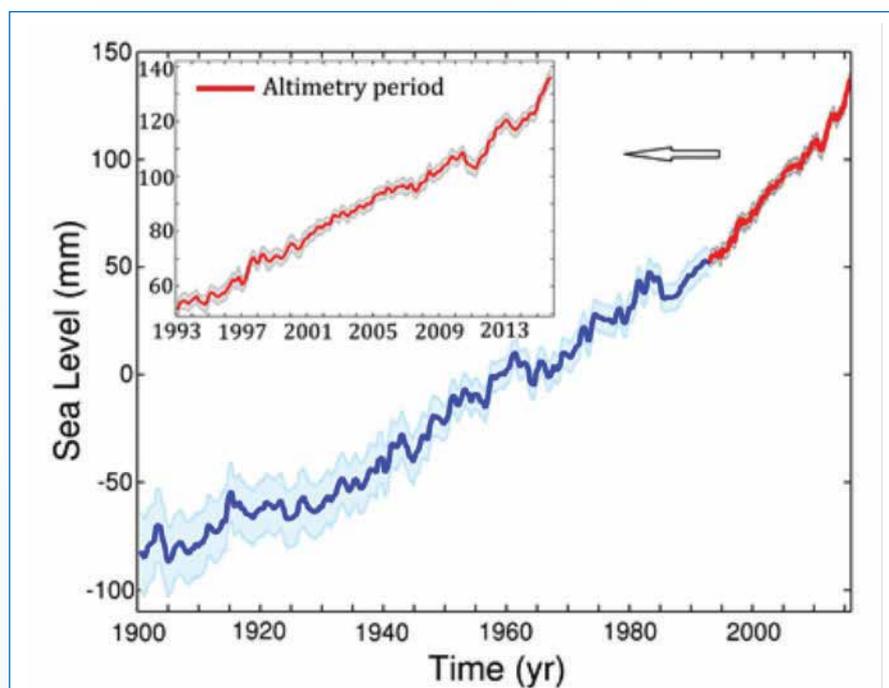


Figure 1 : Evolution du niveau moyen de la mer au cours du 20^{ème} siècle basée sur les mesures marégraphiques (reconstruction de Church and White, 2011; courbe bleue). En rouge : niveau moyen global de la mer mesuré par altimétrie (d’après Dieng et al.,2017). Les zones ombrées représentent les erreurs des données.

Grâce à leur couverture quasi globale du domaine océanique, les satellites altimétriques ont aussi révélé que la hausse du niveau de la mer présente d’importantes disparités régionales. Dans certaines

régions, comme le Pacifique tropical ouest, la hausse de la mer a atteint 12 mm/an depuis 1993, soit une hausse 3 fois plus grande que la moyenne globale (Fig.2).

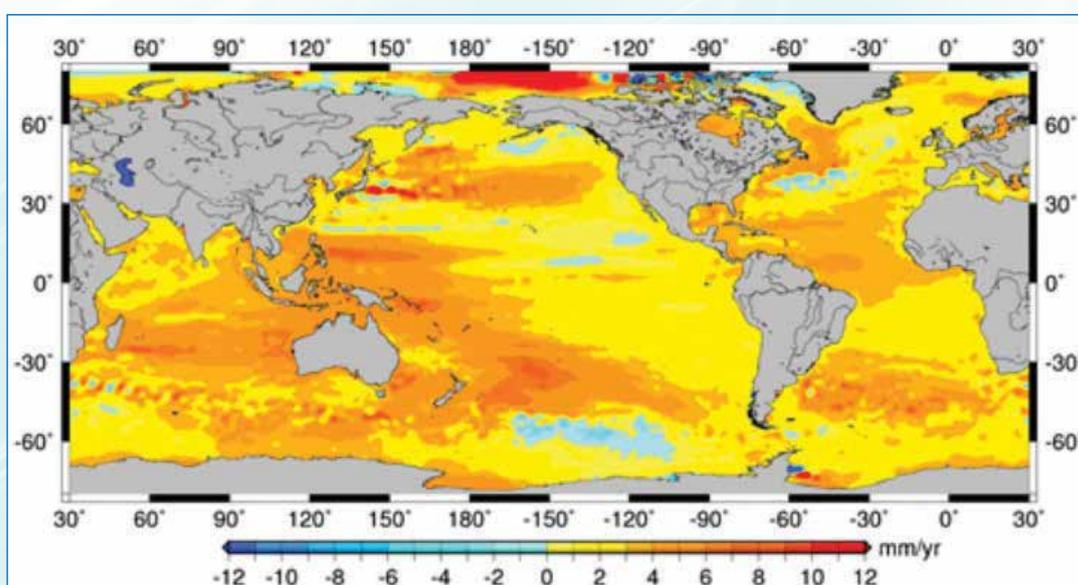


Figure 2 : Variabilité régionale des vitesses de variation du niveau de la mer observée par l’altimétrie spatiale entre 1993 et 2015. Données AVISO (www.aviso.altimetry.fr)

Les contributions principales de la hausse actuelle du niveau moyen global de la mer sont le réchauffement de l'océan (qui se dilate), la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires, enfin les échanges d'eau avec les terres émergées. A l'échelle régionale, l'expansion thermique non uniforme des océans est la cause dominante des disparités régionales de la hausse de la mer (Stammer et al., 2013). Mais dans certaines régions, les variations de la salinité de l'océan peuvent jouer un rôle non négligeable. D'autres phénomènes, par exemple les déformations des bassins océaniques en réponse à la fonte passée et actuelle des glaces continentales, ont également un impact sur le niveau de la mer régional.

Depuis plusieurs années, on dispose de divers systèmes d'observation spatiaux et in situ permettant d'estimer à la fois les variations globales et régionales du niveau de la mer (l'altimétrie spatiale de haute précision et la marégraphie) ainsi que les principales contributions à ces variations. Il s'agit notamment du système mondial de flotteurs automatiques Argo assurant la mesure des variations de température et de salinité de l'océan avec une couverture quasi globale, la

gravimétrie spatiale GRACE pour estimer les variations de masse de l'océan et des stocks d'eaux continentales, l'altimétrie laser et radar, GRACE et l'interférométrie radar pour quantifier le bilan de masse des calottes polaires, l'imagerie spatiale haute résolution et des mesures de terrain pour estimer la fonte des glaciers. Utilisées conjointement avec la modélisation, ces observations permettent d'étudier le «bilan» du niveau de la mer aux échelles globale et régionale, et donc de mieux comprendre les processus en jeu. Par ailleurs, la confrontation entre modèles et observations contribue à la validation et l'amélioration des modèles climatiques utilisés pour simuler les variations de la mer dans le futur, et en particulier dans les régions côtières.

La figure 3 montre l'évolution du niveau moyen global de la mer entre 1993 et 2015 mesurée par altimétrie spatiale, ainsi que différentes contributions (d'après Dieng et al., 2017). La somme des contributions est superposée à la hausse de la mer. On note que les deux courbes sont en très bon accord, ce qui indique la fermeture du bilan sur cette période.

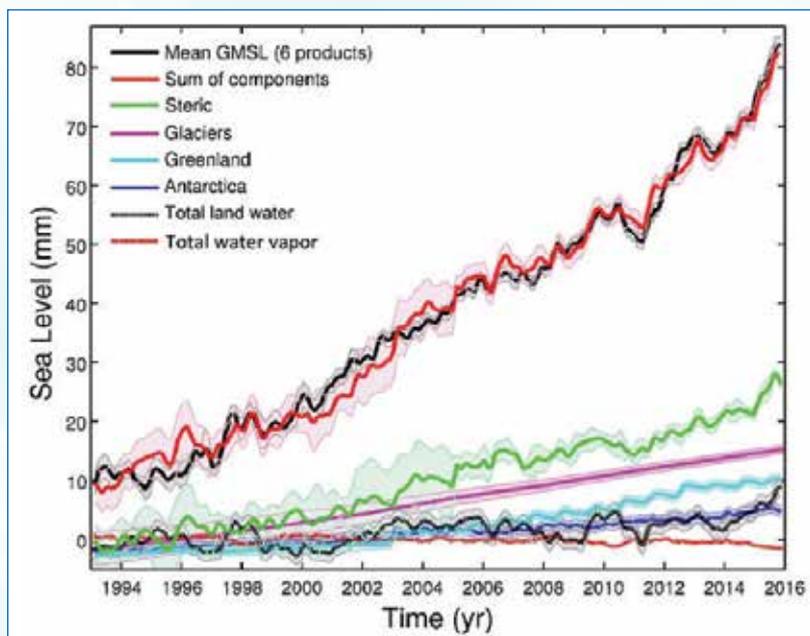


Figure 3 : Niveau moyen global de la mer observé (en noir) et contributions individuelles (en couleur) entre 1993 et 2015. La courbe rouge superposée au niveau de la mer observé représente la somme des contributions (adapté de Dieng et al., 2017).

L'ensemble des glaces continentales - glaciers et calottes polaires - ont contribué pour 56% à la hausse de la mer observée entre 1993 et 2015. La dilatation thermique de l'océan a contribué pour environ 38%. Le reste est attribué à une diminution des stocks d'eau sur les continents, en

particulier à cause du pompage de l'eau dans les nappes souterraines pour l'irrigation des cultures. A l'échelle régionale, comme mentionné plus haut, la cause principale de la variabilité observée résulte de l'expansion thermique non uniforme de l'océan : dans certaines régions, il y a plus

de chaleur stockée dans l'océan donc plus de dilatation. Il en résulte une hausse de la mer non uniforme. Les tendances régionales du niveau de la mer observées par altimétrie satellitaire et celles résultant de l'expansion thermique de l'océan montrent un accord remarquable.

Avec la poursuite du réchauffement climatique en réponse aux émissions passées et futures de gaz à effet de serre, la hausse du niveau marin va se poursuivre au cours des prochaines décennies, et même des prochains siècles. Comme aujourd'hui, les deux contributions principales seront la fonte des glaces continentales et l'expansion thermique des océans, et aussi comme aujourd'hui, l'élévation future de la mer présentera d'importantes variations régionales (Church et al., 2013). La cause principale de cette variabilité régionale est la distribution non uniforme de la température de l'océan et de la salinité (en lien avec la fonte de la banquise et des glaces continentales, et avec les variations du cycle hydrologique). Les variations géographiques de la pression atmosphérique jouent aussi un rôle, mais faible. La fonte actuelle (et future) des glaces continentales (glaciers de montagne et calottes polaires) génèrent aussi de manière indirecte une part de la variabilité régionale du niveau de la mer : sous l'effet des redistributions de masse de glace et d'eau, la croûte terrestre (élastique) se déforme, ce qui modifie légèrement le contour et la profondeur des bassins océaniques, donc le niveau de la mer à l'échelle régionale. De plus, la Terre continue de se déformer de façon visco-élastique en réponse à la dernière déglaciation (phénomène appelé 'rebond post-glaciaire'), ce qui induit une autre contribution à la variabilité régionale de la mer. Ainsi, la fonte future des calottes polaires causera une amplification de l'élévation de la mer dans les océans tropicaux de 20 à 30% par rapport à la hausse moyenne globale. Le phénomène de rebond post glaciaire a quant à lui un impact important dans les régions des hautes latitudes. Le long de la côte est de l'Amérique du Nord, ce phénomène combiné au ralentissement de la circulation thermohaline induite par les changements de la dynamique océanique, devrait donner lieu à une hausse locale de la mer très supérieure à la moyenne globale.

Les conséquences de la hausse future de la mer dans les régions côtières sont multiples : submersions temporaires et inondations permanentes, érosion du littoral, salinisation des aquifères, disparition des zones humides, etc. Si la hausse de la mer causée par le réchauffement climatique global reste un phénomène lent, il est néanmoins inexorable et à très longue durée de vie (même si les émissions de gaz à effet de serre

s'arrêtaient immédiatement, la mer continuerait à monter pendant plusieurs siècles en raison de la très grande inertie thermique de l'océan et de la longue durée de vie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère). Avec les événements extrêmes et les ressources en eau, la hausse du niveau de la mer est un des phénomènes les plus préoccupants causés par les changements globaux affectant la planète. Assurer la continuité des observations spatiales et *in situ* de façon à disposer de séries longues et précises des paramètres climatiques, améliorer les projections de la hausse future de la mer aux échelles globale, régionale et locale, et amplifier les recherches sur les impacts côtiers de la hausse du niveau marin tenant compte de la complexité des systèmes littoraux constituent des défis importants pour la communauté scientifique internationale, qu'il s'agit de relever.

Références citées

- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D., and Unnikrishnan, A. S.: Sea level change, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.
- Dieng H., Cazenave A., Meyssignac B. and Ablain M., New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach, *Geophys. Res. Lett.*, 44, doi:10.1002/2017GL073308, 2017.
- Church, J. A., and N. J. White, Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century, *Surveys in Geophysics*, 32(4-5), 585-602, doi:10.1007/s10712-011-9119-1, 2011.
- IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.
- Stammer D., Cazenave A., Ponte R. and Tamisiea M., Contemporary regional sea level changes, *Annual Review Marine Sciences*, 5, 21-46, 2013.
- von Schuckmann K., Palmer M.D., Trenberth K.E., Cazenave A., D. Chambers, Champollion N. et al., Earth's energy imbalance: an imperative for monitoring, *Nature Climate Change*, 26, 138-144, 2016.

Résumés des communications de la 12^{ème} session plénière solennelle

Role of oceans and seas in the regulation of the climate and the response of marine ecosystems to climate change

Carlos M. DUARTE

Université Le Roi Abdullah des Sciences et de Technologies, Arabie Saoudite



The Oceans, with its vast capacity to store heat and green house gases is a major motor of climate regulation in the planet, buffering change but also generating variability through couple atmosphere-ocean oscillations. About 1/3 of the green house gasses releases by human activity are stored in the ocean, as well as most of the excess heat resulting from the green house effect these gases exert on the atmosphere. However, the resulting warming of the seas and increased storage of CO₂ have themselves profound consequences on marine biota, which may compromise the delivery of key resources to society. In this keynote I will elaborate on the nature of these aspects and the scope for adaptation of marine biota, as well as that of society. I will do using examples from the rich and diverse marine waters around the Kingdom of Morocco.

atmosphérique et les événements météorologiques. Les vents mettent en mouvement les eaux de surface et constituent le moteur des phénomènes de remontée des eaux profondes, froides, riches en nutriments vers la surface, par exemple sur la côte atlantique marocaine. Dans l'Océan Atlantique, la circulation méridienne de retournement est pilotée par les gradients de densité de l'eau de mer, liés à sa température et sa salinité.

Grâce à l'étude des archives du climat, comme les sédiments marins, la paléoclimatologie a mis en évidence des réorganisations majeures de la circulation de l'Océan Atlantique Nord, en particulier lors des périodes glaciaires, associées à des instabilités abruptes du climat des régions voisines. Aujourd'hui, l'influence humaine sur le climat est clairement établie; les rejets de gaz à effet de serre affectent l'état physico-chimique des océans. Comprendre et représenter le rôle des océans dans le système climatique est essentiel pour évaluer les risques associés à l'évolution future du climat. Dans cette présentation, je présenterai les points clés issus du 5^{ème} rapport du GIEC (Groupe I) qui concernent les océans et le climat, et les principales limites des connaissances identifiées en 2013.

J'illustrerai quelques aspects des progrès des connaissances depuis 2013, et décrirai l'état des lieux vis-à-vis de la préparation des prochains rapports du GIEC, en particulier pour les aspects liés aux océans, de l'échelle globale à l'échelle régionale.

Importance des océans pour le changement climatique, du passé au futur

Valérie MASSON-DELMOTTE

Co-présidente du groupe de travail I du GIEC (Bases physiques du changement climatique) LSCE (CEA-CNRS-UVSQ/IPSL), Université Paris Saclay, France Co-chair of IPCC WGI



Les océans jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement du système climatique : bilan d'énergie, cycle du carbone, cycle de l'eau, modes de variabilité du climat...

L'intensité et la structure spatiale de la température de surface des océans affectent la circulation

Modélisation du rôle des océans sur le changement climatique : état de nos connaissances, défis, le cas du Maroc

Abdellah MOKSSIT

Membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Secrétaire Général de (IPCC/GIEC), Genève, Suisse



Les océans représentent 70% de la planète bleue, créent la moitié de l'oxygène de la planète, fournissent 20% des protéines animales

qui sont consommées par +5 billion d'humains, sont le refuge de diverses espèces offrant une biodiversité riche et fournissent des produits pour les médicaments innovants. Les océans assurent 90% du transport des marchandises. Sur le plan climatique, les océans ont un rôle de régulation du climat à l'échelle globale, absorbent plus de 90% de la chaleur cumulée dans l'atmosphère, absorbe 25% du CO₂ créée par l'homme.

Le risque le plus apparent pour les océans à cause des changements climatiques est l'élévation du niveau de la mer. La majeure partie des modèles projettent 45-82 cm à l'horizon 2100 selon le scénario pessimiste avec absence d'efforts de réduction (RCP8.5). Ces élévations sont prévues avoir un caractère d'extrême surtout pour les États insulaires et les plats pays. La fonte des neiges et la réduction des glaciers sont également une préoccupation déjà observée et prévue.

Comme impact signalé dans le 5^{ème} rapport du GIEC, il a été observé des migrations d'espèces marines à cause des changements climatiques. Les projections nous informent qu'à cause du réchauffement prévu vers 2051-2060 les stocks des poissons et invertébrés connaîtront des réductions et des migrations. L'acidification qui a connu une diminution remarquable des années 1850 jusqu'à nos jours (selon les observations) continuera à baisser légèrement pour se stabiliser selon le scénario RCP2.6 (optimiste où des actions concrètes seront prises) mais continuera à baisser de façon significative pour le scénario RCP 8.5 (pessimiste où aucun effort ne sera déployé «Business as usual»).

Ces manifestations seront accompagnées de perte d'oxygène et de déformation des récifs coraux. Pour minimiser la réduction des récifs coraux, le recours à la Mitigation est incontournable. Pour protéger au moins 50% des récifs coraux, le changement dans la moyenne globale de température devrait ne pas dépasser 1,2° C (1,1 – 1,4° C).

Pour le Maroc, si l'amplitude des impacts diffère par rapport aux pôles arctique et antarctique, aux États insulaires et grands sommets, il reste vulnérable avec plus de 3000 km de côtes qui sont et seront concernées en premier lieu des effets du changement climatique car l'océan

Atlantique et la mer Méditerranée constituent une source de revenus substantielles des populations et contribuent en grande partie à sa sécurité alimentaire. Les propriétés physico-chimiques des océans changent, ce qui a des conséquences sur les propriétés et la dynamique de l'océan, sur ses échanges avec l'atmosphère et sur les écosystèmes marins et leurs habitats.

Réchauffement climatique et acidification des océans de la région Nord Ouest Africaine

Karim HILMI

Institut National de Recherche Halieutique
Casablanca, Maroc
hilmi@inrh.ma



Le travail présenté lors de cette session porte essentiellement sur les conclusions de l'atelier organisé par l'INRH en été 2016 sur le réchauffement climatique et l'acidification des océans de la région Nord Ouest Africaine, en mettant l'accent sur l'état de nos

connaissances actuelles en la matière et sur les impacts du changement climatique et les scénarios relatifs à la zone du Courant des Canaries (CCLME) et de la mer d'Alboran comme cas concrets. Les principales investigations des récents travaux du Cinquième Rapport d'Evaluation (AR5) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC/IPCC) sur les océans, les facteurs et les causes du changement climatique ainsi que les impacts sur les océans sont aussi présentés au niveaux global et régional, selon les différents scénarios préconisés par le GIEC/IPCC aux horizons 2030, 2050 et 2100.

Mots clés : changement climatique- acidification des océans- région Nord Ouest Africaine- Impacts du changement climatique sur les océans- projections du GIEC/IPCC.

Hausse du niveau de la mer : observations et causes

Anny CAZENAVE

Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS)- Toulouse
Académie des Sciences de France



Among the consequences of current climate change, increase of the ocean heat content, melting of glaciers, ice mass loss from the Greenland and Antarctica ice sheets and sea level rise are the most visible.

In this presentation, we summarize the most up-to-date knowledge about ocean warming, land ice melt and sea level rise. We discuss how different global observing systems, available since 1-2 decades, in particular from space, inform us about these evolving processes.

We also present sea level projections for the 21st century under different warming scenarios, highlighting the regional variability that superimposes the global mean rise.

Changement climatique et sécheresses récurrentes

Fatima DRIOUECH

Direction de la météorologie Nationale,
Casablanca, Maroc



La présentation donne un aperçu sur l'évolution du climat au Maroc et en Afrique du Nord, à la fois en termes de changements observés et prévus selon différents scénarios, avec un focus particulier sur l'aspect sécheresse en tant qu'évènement extrême.

scénarios, avec un focus particulier sur l'aspect sécheresse en tant qu'évènement extrême.

Partant des rapports du GIEC et des résultats des études menées par les services météorologiques du Maroc et d'autres pays de la région d'Afrique du Nord, la lumière sera mise sur le réchauffement généralisé à toute la région et qui se manifeste à la fois sous forme d'aspects moyens et extrêmes, en plus des évolutions et changements constatés et prévus au niveau du cycle pluviométrique.

La présentation fera aussi un état des lieux des tendances et évolutions observées en termes d'indices de sécheresse ainsi que les changements futurs et les impacts potentiels.

The ocean as a reservoir of carbon, today and tomorrow: what we know and what we don't know

Laurent BOPP

Laboratoire de Météorologie Dynamique
Institut Pierre Simon Laplace
Ecole Normale Supérieure
Paris, France



The ocean is currently absorbing one quarter of all anthropogenic carbon emissions due to fossil fuel combustion and deforestation, thus significantly limiting

the pace of increasing atmospheric CO₂ and anthropogenic climate change. The more recent estimate of the ocean carbon sink amounts to 2.6 (+/- 0.5) GtC/y for the last decade available (2006-2015), and is obtained through a combination of atmospheric and oceanic observations as well as ocean models.

For the next decades, ocean models indicate that ocean carbon uptake will continue under all representative concentration pathways through to 2100 (very high confidence, IPCC, 2013). There is also high agreement between models that climate change, through ocean warming and circulation changes, will partially offset this increase of the sink caused by rising atmospheric CO₂.

Yet, there are still some severe inconsistencies between model simulations and carbon cycle observations over the last decades, very large regional differences in future projections performed with ocean carbon cycle models, and important processes that are still missing in the models used for the last IPCC assessment. In this presentation, I review some of these shortcomings and present some on-going work aiming at resolving these issues.

Change of the chemistry and the temperature of the oceans and their impacts on marine biodiversity

David OSBORN

Directeur, Laboratoires de l'environnement de l'AIEA,
Principauté de Monaco



The impacts on coastal and marine ecosystems stemming from increased atmospheric concentrations of carbon dioxide go well beyond higher temperatures and

rising sea levels. Stratification, the expansion of oxygen minimum zones, coastal eutrophication and ocean acidification all combine with rising temperatures to threaten the biodiversity of complex ecosystems and the services they provide. Coastal upwelling systems, such as the system off the coast of Mauritania and the Southern Province of Morocco, are hot spots for these cumulative pressures.

The International Atomic Energy Agency, through its Environment Laboratories in Monaco, uses nuclear applications for targeted observations and is leading global efforts to improve our understanding of how marine species respond to changes in temperature and ocean acidification – the other CO₂ problem.

Despite the large body of scientific information about ocean acidification rapidly generated in recent years, there are still many knowledge gaps. These include the potential modulating role of evolution and ecological interactions as well as the interaction between multiple global and local stressors. Understanding the effect of ocean acidification on marine ecosystems requires the combination of different approaches and disciplines, including observational, experimental, palaeo and modelling studies – linking interactions that are physico-chemical, physiological/behavioural, genetic, ecological, biogeochemical and socio-economic. Importantly, if we are to truly understand this problem, and accurately predict its impacts, the scientific community must increasingly move from research focused on single species, single drivers and short time frames, to ecosystem scale research looking at multiple drivers over longer time frames.

Ocean as provider of food: building a global approach for sustainable fisheries and aquaculture in the context of the climate change, the Blue Belt Initiative

Abdelmalek FARAJ

Directeur Général, Institut National de Recherches Halieutiques, Casablanca, Maroc



The ocean covers two thirds of our planet and provides many ecosystem services to humans (Oxygen, Food, Drugs, Transport, Energy etc.). Among

these services, fisheries and aquaculture sector is crucial to preserve for the world food security: more than 3.5 billion people depend on the ocean for their primary source of food. In 20 years, this number could double to 7 billion.

However, the combined effects of climate change (acidification, rising temperatures etc.) and polluting and/or extractive activities are increasingly affecting the ocean health that the deterioration accelerates for many decades. We have seen a 26% rise in ocean acidification since the beginning of the industrial revolution.

Despite its key role in the global climate machinery and its sensitivity to the impacts of climate change, the ocean had until recently very little attention in global climate change policy and has been relatively absent from discussions on climate change. During the Cop21 in Paris, a real awareness has emerged on the fate of the climate could not be discussed without the ocean and in particular on the importance of protecting the oceans for climate resilience. In other words, the fight against climate change makes no sense without the oceans, knowing that climate change is a major driver of ocean change. The common urgent need of an action for climate and oceans, have led Morocco with many other partners as UN's Food and Agriculture Organization (FAO), to propose during the Cop22 in Marrakech, the Blue Belt Initiative (BBI), where fisheries and aquaculture can become a factor of sustainability based on the models of the green economy and the Blue economy. The BBI is stemmed from the Blue Growth concept, launched by the FAO in 2013 that aim at

building the resilience of coastal communities and promoting sustainable fisheries and aquaculture in keeping with Sustainable Development Goal number 14 (SDG14) expectations.

The BBI target the Coastal areas and exclusive economic zones where concentrate the bulk of the fishery and aquaculture activities and are responsible for more than 85% of world catches and as one of the most sensitive ocean areas to climate change.

The BBI is built on priority solutions for adaptation in the fisheries and aquaculture sectors, which could contribute to mitigating climate change, as part of a global roadmap for the fight against the climate change and more specifically for the resilience of the oceans. To promote research and scientific knowledge, it will support the emergence of integrated coastal observing systems and their integration at the World level. In the current context of the degradation of fish stocks, the goal is to produce more by fishing less while protecting more. It will therefore be to encourage initiatives to promote sustainable fishing and for the enhancement of the ecosystem to consumer. And finally, knowing the many interactions between aquaculture, ecosystem and fisheries, to continue the growth of sustainable aquaculture, it will foster the emergence of sustainable aquaculture and seaweed farming in particular.

A collaborative platform is proposed for better integration of these fisheries sector smart climate actions in the priorities of the National Determined Contributions (NDCs) but also to support the implementation of solutions based on the necessary link and integration of all the components: research, innovation, expertise, state institutions, financial institutions and execution agencies.

The Blue Belt Initiative is meant to support other initiatives launched across Africa and the world to bolster the fisheries sector as a driver for growth, while enhancing resilience to climate change through collective effort. In this presentation, we will focus on presenting the initiative main objectives and we will discuss the potential implementation scenarios.

Key words: Blue Belt Initiative, Coastal, Fisheries, Aquaculture, Sustainable Development, Climate Change, Resilience, Blue Growth Initiative, Integrated Observing System, Monitoring, Algoculture.

Les implications économiques du réchauffement global

Daniel NAHON

Professeur émérite, Université Aix Marseille, France



Le progrès scientifique et technologique a permis de mettre en évidence l'exacerbation anthropique du réchauffement climatique par l'utilisation de gaz à effet de serre et au delà une prise de conscience des dégâts faits sur l'environnement. La nécessité d'un changement de paradigme économique prend corps progressivement. Un exemple est pris : celui de l'agriculture que le changement climatique va affecter en premier. Comment faire face à l'érosion des sols arables, à la chute des rendements, au besoin d'irrigation grandissant, à l'urbanisation, quelle énergie utiliser? Plusieurs regards se tournent vers une nouvelle agriculture qui préserverait au mieux la terre nourricière, vers une économie verte. Mais est-ce suffisant pour s'assurer d'un développement durable et du bien être d'une population en pleine croissance et demandeuse d'un partage des décisions?

Baisse de la pêche de poissons dans les mers et rôle de l'aquaculture

Omar ASSOBBEI

Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Président de l'université Sidi Mohammed Ben Abdellah de Fès



La pêche et l'aquaculture sont des secteurs stratégiques à l'échelle planétaire au regard de leurs impacts considérables sur l'économie, les sociétés, l'emploi et l'environnement, entre autres. Elles sont prometteuses de la sécurité alimentaire et de nombreux équilibres économiques. Cependant, elles font l'objet de mutations radicales, en raison du changement climatique, de la surexploitation et de pressions anthropiques croissantes.

D'après la FAO (2016), la production mondiale de la pêche de capture s'élevait à 93,4 millions de tonnes en 2014. La consommation mondiale de poissons par habitant dépasse les 20 kilos par an. Près de 57 millions de personnes travaillaient dans le secteur primaire de la production de poisson, dont un tiers dans l'aquaculture. La production globale de l'aquaculture a atteint les 73,8 millions de tonnes en 2014, dont un tiers de mollusques, crustacés et autres animaux hormis les poissons.

Actuellement, la surpêche prend des dimensions alarmantes et menace de nombreuses espèces de disparition. En 2013, quelque 31,4 pour cent des stocks de poissons commerciaux, régulièrement surveillés par la FAO, étaient surexploités. Les écosystèmes marins souffrent de menaces grandissantes qui posent de réelles problématiques de durabilité des ressources.

Le Maroc n'est pas écarté de ces tendances. Avec une zone économique exclusive de plus d'un million de Km² et un littoral de 3500 Km, il dispose d'importantes ressources halieutiques qu'il faut valoriser, sauvegarder et exploiter raisonnablement. Le Maroc a accordé, dans le cadre de ses politiques publiques et depuis longtemps une attention particulière au secteur de la pêche et a récemment créé une Agence Nationale de Développement de l'Aquaculture.

L'approche adoptée dans cette présentation consiste à analyser l'état des lieux en matière de ressources halieutiques aussi bien dans le Monde qu'au Maroc. Quelques réflexions sur les alternatives et perspectives de l'action pour développer le secteur ainsi que les opportunités de l'aquaculture seront mises en exergue. L'accent doit être mis sur la conservation des ressources marines et des activités de pêche responsable. Un travail international concerté doit être investi pour gérer les ressources transfrontières et les aires marines protégées sont à déterminer et traiter convenablement.

Au Maroc, les objectifs annoncés par la loi de finances et les programmes de développement en cours pour le secteur (Plan Halieutis par exemple) seront discutés, en mettant l'accent sur les défis, les orientations de durabilité qui s'imposent et le rôle de la recherche scientifique et technique pour la valorisation des ressources halieutiques et de l'aquaculture, en respect des équilibres en place et des exigences du marché en termes de qualité, de sécurité et de compétitivité des produits. Il est donc prioritaire de renforcer le potentiel de recherche en sciences marines (structurations, axes prioritaires, financement), et mettre en oeuvre des visions stratégiques viables dans ce secteur à court et à moyen terme.



**De la recherche à l'industrialisation :
quel éclairage permet d'apporter
l'échelle de mesure des Niveaux
de Maturité des Technologies?**

**Allocution du Secrétaire Perpétuel à l'occasion
de la commémoration du 11^{ème} anniversaire de l'installation
de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques**

Rabat, le 17 mai 2017



Excellences,

Chers Académiciens,

Chers Invités,

Mesdames et Messieurs,

Le thème scientifique choisi pour la commémoration du onzième anniversaire de notre Académie porte sur: «**de la recherche à l'industrialisation: quel éclairage permet d'apporter des niveaux de maturité des technologies?**»*. Dans quelques instants, nous aurons l'honneur d'écouter avec un grand intérêt Madame Nakita Vodjani de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) de France qui va nous présenter les programmes et les actions de l'ANR et les modalités de leur mise en œuvre ainsi que les instruments pour stimuler le partenariat avec les entreprises et le transfert des résultats de la recherche publique vers le monde économique. Permettez-moi de saisir cette occasion pour lui souhaiter la bienvenue parmi nous et la remercier pour l'effort quelle a fait, malgré un agenda chargé, pour participer à notre séminaire et y faire la conférence introductive, je salue et remercie également tous ceux qui ont répondu à notre invitation et plus particulièrement le Président de l'Université Mohamed V de Rabat, Pr. Said Amzazi, le Directeur de l'Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Renouvelables (IRESEN), M. Badr Ikken ainsi que tous les représentants des différents organismes et établissements marocains présents avec nous, pour avoir accepté notre invitation à participer à la commémoration du onzième anniversaire de l'installation de notre Académie, et à présenter une communication au cours de cette rencontre et à contribuer ainsi au débat sur le thème adopté pour cette session ordinaire, je les remercie tous bien vivement.

Mesdames et Messieurs,

Comme vous le savez sans doute, l'histoire retient quatre révolutions industrielles : la première apparaît à la fin du 18^{ème} siècle au Royaume-Uni, avec l'extraction massive du charbon qui a permis l'invention de la machine à vapeur et a fait émerger de nouvelles industries, notamment textiles. Dès 1800, de nombreux brevets ont abouti à la commercialisation de machines à coudre mécanisées au Royaume-Uni puis en France. Par ailleurs, grâce au travail de la fonte et l'apparition de métaux nouveaux, l'industrie métallurgique puis sidérurgique se développe et favorise la construction notamment de ponts puis, au milieu du 19^{ème} siècle, le développement du chemin de fer.

La deuxième révolution industrielle apparaît entre 1890 et 1910 en Allemagne et sur la côte est des États-Unis. L'extraction du pétrole puis la découverte de l'électricité, et l'invention de l'ampoule à incandescence par Thomas Edison, ont permis d'adapter les matériaux en vogue (l'acier et l'aluminium) à des industries de pointe. Le secteur automobile explose en Europe et dans quelques États de l'est des États-Unis.

La troisième révolution industrielle apparaît entre 1970 et 2000 sur la côte ouest des États-Unis et au Japon. L'électricité d'origine nucléaire motive la recherche, fait émerger des matériaux révolutionnaires (résines, silicones, céramiques) et annonce l'ère numérique avec la diffusion mondiale de nouveaux moyens de communication (Internet) et le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication.

* Thème de la journée organisée en commémoration du 11^{ème} anniversaire de l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

La quatrième révolution industrielle, dite du «Big Data» masses de données ou données massives, commencée à partir de 2010, est définie par la convergence des technologies du «numérique», des biotechnologies et de la physique de l'infiniment petit. Elle est caractérisée surtout par des développements sans précédent dans la génétique, la robotique, l'intelligence artificielle, la nanotechnologie, l'impression 3D et la biotechnologie. Les changements et les perturbations qui en résultent signifient que nous vivons un moment de grande promesse mais aussi de grand péril. Aujourd'hui le monde a le potentiel de connecter des milliards de personnes aux réseaux numériques, d'améliorer considérablement l'efficacité des organisations, et même de gérer les actifs de manière à contribuer à la régénération de l'environnement naturel, ce qui pourrait détruire les dégâts des révolutions industrielles antérieures.

Nous savons, par ailleurs, que les activités humaines épuisent les ressources de la planète et modifient son fonctionnement. Ces transformations sont aggravées par la taille de la population qui a augmenté de façon continue depuis l'apparition de l'Homo sapiens et qui, malgré certaines irrégularités au cours des âges, dépasse maintenant sept milliards d'habitants. La croissance démographique a été particulièrement rapide au cours du 20^{ème} et au début de ce 21^{ème} siècle.

Au début de la première révolution industrielle (1780) la population mondiale se situait à environ 700 millions d'humains. Un siècle plus tard au début de la seconde révolution industrielle (1880) la population mondiale avec 1,4 milliard d'habitants a doublé. Encore un siècle plus tard au début de la troisième révolution industrielle (1980) la planète compte 4,4 milliards d'habitants, soit plus du triple qu'au début de la seconde révolution industrielle. A partir de 2010 où s'amorce le passage dans la quatrième révolution industrielle, la population mondiale dépasse les 7 milliards. Autrement dit, en l'espace des trois révolutions industrielles la

population mondiale a été multipliée par 10 sur un peu plus de deux siècles.

La croissance démographique apparaît aussi comme le fruit de l'amélioration des conditions de vie. Toutefois, cette croissance et les explosions successives de la bombe démographique entraîneront certainement l'épuisement des ressources naturelles fossiles, dont certaines seront accrues par les nouveaux besoins de la quatrième révolution industrielle, d'où la nécessité de passer à une cinquième révolution industrielle que certains qualifient d'écologique qui toucherait tous les secteurs et qui serait caractérisée par ce qu'on appelle l'énergie verte et l'économie circulaire (protection de l'environnement, préservation des ressources et recyclage des déchets).

Mesdames et Messieurs,

Derrière toutes ces révolutions industrielles nous trouvons des hommes et des femmes de science de talent qui ont établi des lois et qui ont conduit à toutes ces découvertes et ces inventions qui sont pour la plupart bénéfiques à l'Homme.

Aujourd'hui encore, la science constitue plus que jamais l'enjeu majeur de nos sociétés et le facteur décisif de leur évolution. En augmentant les connaissances dont l'Homme dispose, la science accroît sans cesse sa maîtrise sur son environnement, lui permettant d'utiliser son imagination pour améliorer sa condition, s'adapter et faciliter son quotidien. Le savoir scientifique, construit au fil des siècles, en continu mouvement, a toujours été une source indéniable de progrès.

Dans le cas de notre pays par exemple pour qu'il puisse garder un avantage compétitif sur le plan industriel, il ne suffit pas de développer ce secteur en s'appuyant uniquement sur le coût de la main d'œuvre qualifiée, la sous-traitance et autres incitations en particulier financières; on a aussi besoin de développer les activités de R&D et d'innovation.

Si la recherche-développement et l'innovation sont devenues dans les pays développés un élément incontournable de la stratégie des grandes entreprises et un des moteurs essentiels de la croissance économique, de la création de richesses et d'emplois et de bien être social, il est devenu impératif, pour notre pays de promouvoir les mécanismes du soutien à la recherche-développement et l'innovation et de réussir l'efficacité du couplage entre la recherche publique et le monde économique.

Aujourd'hui dans les échanges commerciaux internationaux, plusieurs facteurs interviennent, en particulier deux d'entre eux paraissent déterminants : le premier consiste à posséder un réseau et un potentiel humain compétent pour vendre les produits et services, ce sont les commerciaux et technico-commerciaux; le second repose sur la capacité du pays à posséder des chercheurs, des ingénieurs entrepreneurs et des moyens financiers pour mettre en œuvre une véritable politique de recherche-développement et d'innovation.

Par ailleurs, la technique aujourd'hui dépend fortement de la science; les produits de la recherche scientifique sont pris en compte de plus en plus rapidement par les progrès techniques; c'est dans la synergie entre la science et la technique, entre la connaissance et le savoir-faire que réside la différence essentielle entre notre époque et les siècles passés.

On constate que l'industrie procède de plus en plus d'une technologie très poussée et dont la R&D et l'innovation représentent non seulement une partie intégrante du processus de production, mais constituent parfois le produit final de l'industrie. Le succès d'une telle industrie nécessite donc le développement de la R&D dans ce secteur ; en particulier, il est recommandé qu'une partie des activités R&D réalisées par les entreprises installées dans notre pays soit faite localement en s'appuyant sur le personnel de recherche national dans le cadre d'un partenariat public-privé et des passerelles entreprise-

université. C'est l'expérience que nous avons mise en place avec le Groupe SAFRAN dans le domaine de l'aéronautique.

Les universités et les institutions de recherche, actuellement dotées de compétences et de plateformes juridiques, scientifiques et techniques, doivent s'impliquer davantage dans la mise en œuvre des plans industriels et accompagner les politiques sectorielles du pays dans le cadre des différents plans de développement.

Une autre priorité majeure est de rapprocher la recherche publique et l'entreprise privée et de resserrer les liens entre le monde académique et le monde économique, grâce à une politique volontariste et une réelle coordination assurée par les instances de gouvernance d'un système national de recherche performant.

J'espère que la tenue de cette session anniversaire de l'Académie permettra d'approfondir le débat sur l'importance de la recherche-développement et l'innovation, et sur la nécessité de la diffusion de la culture de l'innovation qui est aujourd'hui au cœur des politiques économique des pays.

Permettez-moi, à la fin de cette intervention, de renouveler mes sincères félicitations aux organisateurs de cette journée notamment au Collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique et aussi de renouveler mes plus vifs remerciements aux éminentes personnalités présentes avec nous que nous écouterons avec le plus grand intérêt et le plus grand plaisir.

Je souhaite plein succès aux travaux de cette rencontre et œuvrons ensemble pour que la recherche scientifique et l'innovation technologique contribuent effectivement et activement à la solution des problèmes de développement et au bien être social de nos citoyens.

Je vous remercie pour votre attention.

Synthèse des travaux de la session anniversaire



A. BOUKHARI



M. SMANI



M. ZIYAD

Collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique.

I- Introduction

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a organisé le 17 mai 2017, de 9H00 à 14H00, à l'occasion de son anniversaire d'installation par Sa Majesté, que Dieu L'assiste, une session ordinaire de travail consacrée au thème «De la recherche à l'industrialisation : quel éclairage permet d'apporter l'échelle de mesure des niveaux de maturité (TRL) des technologies?».

En mai 2013, l'Académie a publié un document, le deuxième en son genre, sur «Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité : un état des lieux et recommandations clés». Ce rapport, destiné aux décideurs et à l'ensemble de la communauté scientifique nationale fait une analyse objective de la situation en la matière, tout en soulignant les forces et les faiblesses enregistrées et en proposant des mesures destinées à relancer la production scientifique marocaine, à en améliorer la qualité et assurer sa valorisation par les acteurs de l'économie nationale.

Le Maroc a consacré ces dernières années des montants importants au financement de la recherche. Il a su attirer de nombreuses industries dans les domaines de l'automobile, l'aéronautique, et des énergies renouvelables; renforcer son offre tant sur le marché intérieur qu'à l'export, se doit d'accompagner ses structures de recherche et son tissu industriel par une meilleure intégration des savoirs et des technologies. En effet, aucun

développement technologique ne peut être réalisé si une attention particulière n'est pas portée aux différentes étapes du processus qui démarre au niveau des principes de base de la recherche (TRL1) pour se terminer niveau de l'application qui répond à un besoin du marché (TRL9).

Il est important de souligner que l'échelle de mesure des niveaux de maturité des technologies (Technology Readiness Levels - TRLs) est reconnue dans le monde comme étant aujourd'hui un outil structurant pour la gestion de la R&D, le transfert technologique, le financement de l'innovation, les projets collaboratifs et la création de "startups", en un mot, la valorisation des résultats de la recherche.

L'objectif du séminaire est de diffuser ces notions auprès des chercheurs, des responsables d'entreprises et des organismes en charge de l'accompagnement et du financement de la recherche et de l'innovation et d'encourager à sa mise en œuvre en vue de permettre une meilleure définition des rôles, les cahiers de charges des appels à projets, de favoriser le montage de projets collaboratifs, d'accélérer le développement des innovations et leur accès au marché par le passage réussi de la «vallée de la mort».

Cette échelle peut ainsi être utile :

- ✓ pour le chercheur qui désire quantifier le degré d'avancement de ses travaux,
- ✓ pour les organismes publics qui veulent classer les différents types de financement,

- ✓ pour les projets collaboratifs,
- ✓ pour les organismes privés de financement, Comme principe de précaution contre le risque dans l'industrialisation.

Interviendront lors de cette session, pour un partage d'expérience et un débat, l'ensemble des intervenants dans la chaîne de valeur de la valorisation de la recherche.

II- Travaux de la session ordinaire anniversaire

Avant d'entamer les travaux de la session, Monsieur le Secrétaire Perpétuel a prononcé un discours rendant hommage au défunt Professeur Driss Aboutajeddine. Dans son allocution, il a rappelé le parcours exceptionnel du disparu en notant que ce décès est une lourde perte pour l'Académie et pour notre pays.

Le programme de la Session, en plus de l'accueil des participants et des allocutions officielles, comprend :

a- Une conférence introductive, donnée par Madame Nakita Vodjani de l'Agence Nationale de la Recherche – France.

La conférence a été suivie d'une discussion du conférencier avec la salle. Les principales questions abordées ont porté sur les modalités de lancement des appels à projets et les modes de sélection et d'expertise des projets retenus. La question du financement de l'ANR ainsi que sa gouvernance ont aussi été abordées. Il est à noter que dans le conseil d'administration (comité de pilotage) de l'ANR, siègent des chercheurs et des représentants de différents organismes qui donnent leur point de vue sur l'impact de la recherche sur l'économie et le développement.

b- Deux tables rondes :

- ✓ La première sur le «Retour d'expériences d'organismes marocains» avec des recommandations, dont le modérateur est

Mohamed Smani. Cette table ronde a vu la participation du Président de l'Université Mohammed V de Rabat, Professeur, Saïd Amzazi; du Directeur d'IRESEN, Monsieur Badr Ikken; de l'Université Internationale de Rabat, Professeur Abdelaziz BENJOUAD et du groupe Office Chérifien des Phosphates, Monsieur Driss DHIBA. Les différents intervenants ont exposé leurs expériences dans la gestion et la gouvernance en faisant appel aux techniques TRL.

- ✓ La deuxième sur «Quel écosystème pour favoriser le passage d'un niveau de maturité technologique au niveau supérieur?», modérée par le Professeur Mostapha BOUSMINA, Chancelier de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Les orateurs suivants, dans l'ordre, ont pris la parole pour exposer leurs expériences autour de la question posée :

- Youssef FADIL (MCIEN);
- Abdelhak MOURADI (DRSI - MENESRST);
- Ismaël SAADOUNE (UCAM);
- Mounir OUITASSANE (MASCIR);
- Abderrahmane KADDAMI (MANAGEM);
- Issam EL ALAOUI (CIH);
- Hicham ZANATI SERGHINI /BENZINA (CCG).

Les représentants de l'université, à cette table ronde, ont précisé que la recherche marocaine, dans son état actuel, n'a pas encore complètement intégré dans son mode de gouvernance les critères dictés par les TRLs à cause de problèmes plus urgents à résoudre. L'écosystème dans lequel se développe la recherche marocaine ne dispose pas encore suffisamment de liens entre les entreprises et les universités pour que la recherche dépasse le niveau 3.

III- Recommandations

Les différentes interventions et le débat des deux tables rondes ont permis de dégager les recommandations suivantes :

- Revoir la gouvernance de la recherche à tous les niveaux : accompagnement des projets, pertinence des découvertes, leur stade de maturité, leur niveau d'innovation, protection du brevet, réaliser des prototypes, sensibiliser le coordinateur du projet, ...
 - Introduire et enseigner le module TRL dans les écoles d'ingénieurs et les universités.
 - Identifier les carences dans l'utilisation des TRLs.
 - Développer et encourager une collaboration scientifique régulière université-entreprise.
 - Créer un écosystème de recherche favorisant la relation entre l'université et l'entreprise dans la formation et la recherche en sollicitant l'industriel dans le débat.
 - Travailler en synergie et intégrer les TRLs dans les projets de recherche qui le demandent.
 - Créer les fondations de recherche.
 - Multiplier les plateformes techniques.
 - Mutualiser les moyens techniques.
 - Mettre en place une vision claire à court et long terme en plaçant les TRLs dans l'évaluation et l'expertise des projets des appels d'offre.
 - Encourager les chercheurs à déposer les brevets d'invention.
 - Adapter les TRLs aux demandes d'entreprise, ne pas oublier les DRLs, échelle complémentaire.
 - Créer des bourses spécifiques pour les doctorants dans les entreprises.
 - Réactiver le Comité interministériel.
 - Ouvrir un dialogue constant avec les industriels.
 - Revoir les procédures de dépenses des budgets alloués aux projets de recherche.
 - Faire appel aux juristes pour protéger les droits des chercheurs pour leurs découvertes.
 - Impliquer les industriels dans les projets.
 - Mettre en place, pour l'innovation, un système de transfert au niveau de l'entreprise vers les chercheurs.
 - Favoriser l'aspect recherche dans le recrutement des enseignants.
 - Lever les difficultés de financements de l'innovation rencontrées actuellement en maîtrisant les risques.
- Les travaux de la session ont pris fin à 14h.



Vue générale de l'auditoire



Activités de l'Académie

Modélisation et prospective économique *

Pr. Nicolas MOUMNI

Membre du Comité Scientifique de l'École Académique

L'École Académique a organisé sa neuvième session annuelle le samedi 25 mars 2017 à Rabat. L'École Académique dépend du Collège Études Stratégiques et Développement Economique. Sa vocation est de promouvoir la recherche au Maroc en économie mathématique, en modélisation et en économétrie. Pour ce faire, elle a pour objectif d'encourager les travaux théoriques et empiriques, aussi bien sur le plan macroéconomique que microéconomique, afin de se doter d'une expertise nationale permettant, notamment, l'évaluation des politiques économiques publiques. En plus de l'invitation d'économistes venant d'universités marocaines ou étrangères réputés dans leur domaine sur des thèmes majeurs pour le développement du Maroc, l'École tient une session annuelle consacrée à la présentation et discussion des travaux de doctorants.

Lors de la session 2017, après l'allocution de bienvenue de Nouredine El Aoufi, 9 travaux ont été exposés par des chercheurs confirmés et doctorants appartenant à des centres de recherches d'universités marocaines et étrangères, françaises notamment. Les textes exposés pendant la session 2017 sont d'un grand intérêt, à la fois, pour la recherche économique aujourd'hui au Maroc mais aussi dans le reste du Monde. Ces travaux qui font appel à des approches théoriques et empiriques variées et éprouvées selon les standards internationaux s'articulent autour de trois thèmes majeurs :

- Le questionnement à propos de la primauté de l'analyse théorique sur l'empirie, dans un contexte de recherche caractérisé par le foisonnement des études empiriques et des expérimentations aléatoires en économie;
- L'intérêt et l'apport de la modélisation, pour l'économie marocaine, en théorie micro-

économique par l'approche de l'équilibre général calculable;

- Modélisation de l'impact d'un certain nombre d'actions de politique économique spécifiques sur l'économie marocaine.

Le questionnement à propos de la primauté de l'analyse théorique sur l'empirie, dans un contexte de recherche caractérisé par le foisonnement des études empiriques et des expérimentations en économie. Deux textes ont été exposés à ce sujet.

Rédouane Taouil de l'université Pierre-Mendès France de Grenoble fait une analyse critique de la conception qui accorde aux études empiriques, dont les publications, qui auraient tendance à supplanter celles à caractère théorique depuis les années quatre-vingt. La démarche méthodologique en économie, basée sur un savoir privilégiant les résultats d'observation, est défendue par J. Angrist et J-S Pischke (2010). Elle accorde à l'empirie le statut de connaissance scientifique à l'instar de la biologie ou de la médecine. S'agissant de la macro-économie qui s'appuie depuis quelques décennies sur l'économétrie, R. Taouil considère que la place des procédures et les résultats des études empiriques ne seraient pas décisifs. Les formulations empiriques sont occasionnelles car dépendant des données et des protocoles de leur calcul. Par exemple, dans le nouveau consensus monétaire qui s'érige en connaissance macroéconomique de premier plan, la primauté est à la théorie. Dans ce domaine, l'observation est largement imprégnée de la démarche conceptuelle. De même que la modélisation économétrique implémente des hypothèses et des règles d'inférence qui ne font pas de la vérification empirique un critère de validation du corpus théorique.

* Compte rendu de la 9^{ème} session de l'école académique organisée par le Collège Etudes Stratégiques et Développement Économique.

Poursuivant la problématique de la première présentation sur le thème de l'expérimentation en économie, Mohamed Soual du Groupe OCP et Centre d'études et de recherche de Grenoble s'interroge sur la pertinence de la méthode de l'expérimentation aléatoire -ou en laboratoire- en économie de développement. Dans ce champ, les recherches d'Esther Duflo consistent en une conceptualisation de la problématique du développement en s'appuyant sur des procédures d'analyse basées sur les expériences par tirage aléatoire. Les comportements individuels sont au cœur de l'explication des facteurs déterminants de causalités dans de nombreux domaines tels que la santé, l'éducation, la microfinance ou la gouvernance,... etc. Mais, pour l'orateur, la démarche de l'expérimentation qui peut être perçue comme un gage de scientificité de la science économique et d'avancée en économie du développement fait aujourd'hui débat. Et ce, à cause de certaines limites comme : la difficulté d'isoler les facteurs de causalité, les limites des fondements théoriques et la fragilité de pertinence de la valeur empirique des résultats.

L'intérêt et l'apport de la modélisation, pour l'économie marocaine, en théorie micro-économique par l'approche de l'équilibre général calculable. Trois présentations sur l'économie marocaine ont concerné ce volet.

Dans une première communication, Nezha Bousselhami (Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan) s'est intéressée à l'impact des politiques budgétaires sur la croissance économique et la pauvreté au Maroc à travers une analyse en termes d'équilibre général calculable micro-simulé. Le modèle développé fait le lien entre micro-macro. Il permet de quantifier les effets d'un ensemble de mesures fiscales d'une part et des politiques de dépenses publiques d'autre part. Les résultats concluent que la baisse de l'IR total et de la TVA sont les mesures les plus favorables à la croissance économique. S'agissant des dépenses publiques, parmi toutes les mesures proposées, la hausse des dépenses allouées à l'éducation et à la santé en même temps est la plus favorable.

Hicham Belkouch (Université Mohammed VI de Rabat, Université Paris Nanterre, Université Internationale de Rabat) a présenté son travail, modélisé par une approche de micro-simulation dynamique, sur l'extension de la couverture sociale aux travailleurs informels et aux personnes

âgées non couvertes et la réforme du système de retraite au Maroc. L'implémentation du modèle consiste à prendre appui sur un échantillon de données individuelles et à simuler les transformations des événements démographiques et économiques (tels que le mariage, les naissances, le divorce, le chômage, la retraite etc.) de ces individus au cours du temps. Il apparaît que l'évolution du nombre de retraités par rapport aux cotisants ne soit pas due principalement qu'au vieillissement démographique de la population marocaine, mais sans doute aussi au résultat de choix politiques des pouvoirs publics au cours des quarante dernières années en matière d'emploi et de recrutement dans la fonction publique.

Enfin, Marouane Idmansour (Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan) a exposé ses recherches sur la production domestique à l'aide d'un modèle d'équilibre en théorie micro-économique. Au Maroc, les femmes seraient à l'origine d'environ 92% de la production domestique. Sur le plan macroéconomique, le HCP fournit de nombreuses données empiriques sur le travail domestique des femmes. Cependant, ces études chiffrées restent insuffisantes en matière d'explication. L'orateur critique la démarche du corpus microéconomique qui réduit le ménage en une unité de production injectant le facteur travail dans de ce processus. Le travail seul ne peut pas expliquer le phénomène, ses circonstances, ses mécanismes, ses causes et les interactions qui le créent. Dans le travail domestique, l'activité ne peut pas être individualisée débouchant sur une fonction d'utilité par membre du ménage. Les utilités sont endogènes et inter-reliées.

Modélisation de l'impact d'un certain nombre d'actions de politique économique spécifiques sur l'économie marocaine. Depuis la période post coloniale, le Maroc poursuit la modernisation de ses institutions. Pour cela, il cherche à agir sur les différents leviers de la politique économique, tels que la fiscalité, l'industrie, le marché du travail ou le régime de change du Dirham, pour maintenir son économie sur un sentier de croissance forte de long terme, favorisant ainsi son développement économique et social. Quatre orateurs ont présenté leurs contributions dans ces domaines.

Ainsi Rachid Boukbech (Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan) a mené une analyse des déterminants des recettes fiscales dans le cas des pays à «revenus intermédiaires, tranche inférieure».

Il a utilisé la technique de l'économétrie des données de panel sur un échantillon de 33 pays en voie de développement dont le Maroc sur la période 2001-2014. Dans cette communication, l'auteur s'est intéressé à l'impact sur les recettes fiscales des déterminants du potentiel fiscal et de l'effort fiscal. Les résultats de l'estimation relative au potentiel fiscal indiquent l'existence d'un lien significatif et positif du revenu par habitant, de la valeur ajoutée, de l'agriculture et du degré d'ouverture avec les recettes fiscales. L'impact de l'évolution démographique est négatif et non significatif. S'agissant des déterminants de l'effort fiscal, l'influence de l'inflation et des dépenses publiques s'avère significative et positive, alors que le lien entre la dette extérieure et l'effort fiscal est significatif mais négatif. Pour l'aide publique reçue, la liaison avec l'effort fiscal est positive mais non significative.

Sanae El Ouhabi (Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan) a présenté ses résultats sur l'analyse de la productivité du secteur industriel marocain. L'objectif de ce travail est d'identifier les secteurs industriels sur lesquels le Maroc peut s'appuyer pour assoir son développement économique riche en croissance et emplois et consolider son attractivité au plan international. Les résultats de la modélisation laissent penser que les branches industrielles intensives en main d'œuvre, et attestant d'une productivité du travail dépassant celle du capital, sont celles qui affichent les meilleures performances et contribuent le plus à la croissance économique du Maroc. Par exemple, la branche chimique et para chimique se situe en bonne place pour les investissements, les exportations et la production sur la période 1985-2014. Son impact a été positif sur la croissance économique des dix dernières années. Cela étant, l'analyse doit être poursuivie et approfondie à propos de l'influence, sur la productivité des 7 branches industrielles traitées et d'autres variables telles que le taux d'ouverture commercial, le capital humain et la poursuite dans l'investissement en formation, recherche et développement.

Mustapha Zirloili (Université Aix-Marseille) offre une analyse sur la segmentation du marché du travail et d'inégalités dans le contexte de relations d'emploi informelles dans les pays en voie de développement comprenant le Maroc. L'auteur considère, dans un premier temps, l'hypothèse du dualisme selon laquelle l'économie formelle constitue le secteur primaire, alors que l'économie

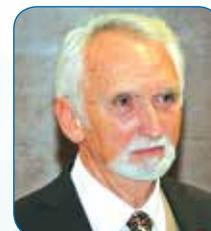
informelle est dans le secteur secondaire. Mais l'existence de non-linéarité dans les équations de prix d'un marché concurrentiel l'incite à estimer, ensuite, un modèle à changement de régime endogène avec une règle de séparation inconnue. Après l'évaluation des mécanismes des inégalités salariales basée sur l'hypothèse de la segmentation, le questionnement porte sur la capacité des politiques publiques à réguler le marché du travail permettant d'aboutir à une distribution des salaires relativement moins égalitaire et à un marché du travail un peu plus homogène.

Enfin, Kaboul Elyamani (Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan) étudie les effets macro-économiques du taux de change fixe du Dirham sur le PIB. Après la période postcoloniale, le choix d'un régime de change intermédiaire de parité fixe avec ancrage de la monnaie nationale sur un panier de devises (dollar et euro) avait pour objectif, principalement, d'assurer une stabilité du taux de change effectif nominal du Dirham et de réduire les effets néfastes des fluctuations des devises internationales sur celui-ci. Les autorités monétaires marocaines envisagent, actuellement, de faire évoluer le régime de change de façon graduelle dans le temps vers la flexibilité. Adoptant la méthode hypothético-déductive, la communicante envisage de mener une étude empirique en vue d'apprécier l'influence du régime de change sur le mécanisme de l'inflation importée (pass-through) vue la prépondérance de la part de la consommation dans le PIB. De même, étant donnée la forte dépendance du Maroc vis-à-vis de l'extérieur et l'importance que prend le déficit extérieur, l'étude empirique portera également sur l'influence du régime de change sur la balance commerciale marocaine.

Les 9 présentations ont été ponctuées de séances de discussions et débats entre les orateurs et l'assistance composée de doctorants et d'enseignants chercheurs confirmés, permettant aux premiers d'améliorer leurs travaux. Noureddine El Aoufi a clôturé la session en prodiguant quelques recommandations sur le plan méthodologique et sur le protocole de rédaction de la thèse. Il a remercié l'assistance et a rappelé l'intérêt de ces rencontres ouvertes notamment aux doctorants, leur permettant d'exposer l'évolution de leurs travaux et de bénéficier des discussions enrichissantes, lors des débats, avec les chercheurs confirmés.

Visite d'une délégation de l'Académie d'Agriculture de France

Allocution de Monsieur Gérard TENDRON, Secrétaire Perpétuel de l'Académie d'Agriculture de France



Au nom de la délégation française de l'Académie d'agriculture de France, qui réunit vingt sept académiciens, je remercie très sincèrement M. Omar FASSI-FEHRI, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et techniques du Maroc de nous avoir présenté l'organisation, le fonctionnement et les travaux de cette prestigieuse académie créée par feu Sa Majesté, le roi Hassan II.

A mon tour, je vais vous présenter l'Académie d'agriculture de France.

L'Académie d'agriculture de France est l'héritière de la Société royale d'agriculture créée en 1761, sous Louis XV. Constituée dès l'origine de personnalités parmi les plus éminentes dans le domaine de l'agronomie, elle a étendu ses champs de réflexion dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, de l'environnement et du développement durable.

Établissement reconnu d'utilité publique par décret du 23 août 1878, ses statuts approuvés par décret du Président de la République, adopté en conseil des ministres après avis du Conseil d'Etat, ont été modifiés le 4 juin 2014. Le Président de la République est le protecteur de l'Académie et le ministre chargé de l'agriculture en est le président d'honneur.

L'élection des 120 membres titulaires et des 60 membres associés étrangers, ainsi que l'élection du Secrétaire perpétuel et du Trésorier perpétuel sont approuvées par un décret du Président de la République; l'élection des

180 membres correspondants et des 60 membres correspondants associés étrangers est approuvée par arrêté du ministre de l'agriculture.

L'Académie a pour mission de contribuer, dans les domaines scientifique, technique, économique, juridique, social et culturel à l'évolution de l'agriculture et du monde rural. Elle étudie sous leurs aspects nationaux, européens et internationaux :

- la **production, la transformation, la consommation et l'utilisation des produits** de l'agriculture et de l'élevage, de la forêt, de la pêche et de l'aquaculture
- l'**utilisation et la gestion des ressources naturelles**, afin de préserver et améliorer l'environnement, la protection et la restauration de la biodiversité, en tenant compte de la conséquence de ces choix sur la qualité de vie de la population
- les **évolutions sociales, économiques et culturelles** dans les domaines de l'agriculture, la forêt, le bois, la pêche, l'alimentation, l'eau et l'environnement
- les **rapports entre mondes ruraux et citadins**.

L'Académie :

- **formule des avis** sur toutes les questions relevant de sa compétence, notamment sur celles dont elle est saisie par le gouvernement
- **organise des séances et colloques publics**, dont des séances **communes** avec d'autres académies

(*) L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a reçu le 04 avril 2017 en son siège une délégation de l'Académie d'Agriculture de France au cours de laquelle une présentation des deux académies fut effectuée par les secrétaires perpétuels respectifs.

- **récompense** par des prix, bourses et médailles les auteurs de travaux qui contribuent à l'avancement des sciences, des techniques et de l'économie, relatives à l'agriculture et à l'agroalimentaire
- **assure des liaisons** avec des institutions françaises et étrangères sur des problématiques communes
- **contribue à l'étude de l'histoire de l'agriculture** et du monde rural, en relation avec l'Association pour l'Etude de l'Histoire de l'Agriculture (AEHA).

L'Académie est organisée en dix sections thématiques, qui comprennent des membres titulaires et émérites, des membres correspondants et correspondants honoraires, des membres associés et correspondants associés étrangers. Leur intitulé permet d'appréhender la variété des thèmes de réflexion qu'elle aborde :

- 1- Productions végétales
- 2- Bois et filière bois
- 3- Production animale
- 4- Sciences humaines et sociales
- 5- Interactions milieu-êtres vivants
- 6- Sciences de la vie
- 7- Environnement et territoires
- 8- Alimentation humaine
- 9- Agrofournitures
- 10- Economie et politique

Les sections conduisent des réflexions internes en associant souvent des intervenants extérieurs sur des sujets d'actualité de leurs domaines de compétences. Cela leur permet de préparer et d'organiser des séances publiques (30 au cours de l'année) et des colloques (une douzaine dans l'année), de proposer des avis et des rapports publiés sur le site Internet de l'Académie. Les sections s'investissent dans les groupes de travail transversaux. Conformément à leurs attributions, elles proposent des récompenses (prix scientifiques et médailles), notamment pour des travaux de recherche, d'administration de la

recherche ou des mémoires de fin d'études, ainsi que des bourses de recherche. Elles participent à la préparation du recrutement de nouveaux membres en vue des élections annuelles, afin de pourvoir à la vacance de membres titulaires ou de correspondants nationaux, français et étrangers.

Vingt-trois groupes de travail sont actifs en 2016-2017. Certains sont internes à une section, mais la majorité mobilise plusieurs sections, certains sont inter-académiques et intègrent des personnalités extérieures à l'Académie. Ils conduisent des réflexions qui aboutissent généralement à la publication de rapports, d'avis, d'ouvrages ou à l'organisation de séances publiques. En voici la liste :

- *Eau et sécheresse*
- *Veille Agriculture biologique*
- *Biocontrôle*
- *Potentiels de la science pour une agriculture durable*
- *Politique agricole commune*
- *Agriculture, filières et sécurité alimentaire*
- *Relations Académie/Enseignement supérieur agronomique*
- *Produits biosourcés et chimie végétale*
- *Gaspillage alimentaire*
- *Sols*
- *Climat et agriculture*
- *Nouvelles technologies et agriculture*
- *Nouvelles biotechnologies agricoles et alimentaires*
- *Utilisation des drones en agriculture*
- *Agricultures ultramarines*
- *Agro-écologie*
- *Développement des agricultures africaines*
- *Réécriture du génome, éthique et acceptabilité sociale*
- *Agriculture et droit de l'environnement*
- *Etre agriculteur autrement*
- *Veille antibiorésistance*
- *Communication*
- *Livres de l'Académie*
- *Notes académiques*

Le programme de travail de l'Académie, actualisé chaque année, s'articule autour de six thèmes principaux :

- *Produire mieux et nourrir les hommes*
- *Adapter la gestion des écosystèmes agricoles et forestiers pour accompagner les changements globaux*
- *Intégrer les politiques agricoles, environnementales et territoriales*
- *Contribuer au débat sur l'innovation et l'acceptabilité par la société des pratiques agricoles*
- *Diffuser des connaissances*
- *Approfondir des concepts.*

En application de ses statuts, l'Académie d'agriculture de France se positionne à l'interface de la science et de la société, avec pour mandat d'éclairer les citoyens et les décideurs sur les évolutions actuelles et futures dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement.

En effet, les préoccupations de la société en termes d'alimentation et de santé, de partage des usages de la nature, de qualité des paysages, de sauvegarde de la biodiversité, de bien-être animal, génèrent de nouvelles exigences en ce qui concerne la production et la transformation des produits agricoles et forestiers. L'agriculture, la

sylviculture et les industries de transformation qui y sont liées y sont confrontées plus que jamais.

L'accélération fulgurante des connaissances scientifiques et des avancées technologiques suscite de plus en plus des interrogations dans la société, amplifiées par la mise en avant du principe de précaution. Toutefois, ces connaissances et avancées sont indispensables au maintien de la compétitivité de notre pays, pour nourrir nos concitoyens, et permettre aux agriculteurs et aux sylviculteurs de continuer à proposer des produits de qualité et sans risque et en assurant leur juste rémunération et l'entretien indispensable de l'espace rural.

Le rôle de l'Académie est donc essentiel. Elle est tout d'abord un creuset de disciplines multiples, résultant de l'extraordinaire richesse de connaissances et d'expériences de ses membres, qui lui donne la capacité d'être un lieu de débat et de propositions. Par une approche dynamique du monde rural, elle participe à la formulation des réponses qu'il peut apporter en termes d'attentes sociales le concernant. Elle est productrice d'analyses objectives et de synthèses et permet un éclairage pédagogique, par un discours clair, sous forme d'avis motivés. Elle participe ainsi activement à promouvoir l'innovation et à donner du sens au progrès.

9^{ème} congrès Pan Africain des Mathématiciens (PACOM 2017)

Sous le Haut Patronage de Sa Majesté le Roi Mohammed VI, la Conférence Satellite: "Les mathématiques en tant que technologie émergente" (Math-Logy), sera organisée le 5 juillet 2017 dans le cadre du 9^{ème} Congrès Pan Africain des Mathématiciens PACOM 2017, en partenariat avec l'Université Mohammed V de Rabat et l'Union Mathématique Africaine.

La programmation de la conférence satellite Mathlogy vise à renforcer le rôle des mathématiques dans l'aide à la décision pour un développement socio-économique durable en Afrique.

Citons à ce sujet le professeur Jean-Paul Bourguignon, président du Conseil Européen de la recherche :

«Les domaines qui mobilisent les mathématiques avancées sont aujourd'hui considérablement

plus nombreux qu'il y a 20 ans. Ils sont aussi plus stratégiques. (...) Nous voyons aujourd'hui apparaître de nouveaux métiers et de nouveaux modèles économiques dans lesquels les statistiques et le traitement des données jouent un rôle important. La collecte, la structuration, la transformation et l'exploitation des données collectées passent par des processus mathématiques de très haut niveau donnant lieu à de nouvelles activités à valeur économique. Derrière les graphes, les images et les aides à la décision ou à la localisation, il y a des algorithmes complexes qui sont au cœur de la création de valeur. (...) Dans le nouveau paradigme marqué par la continuité entre mathématiques fondamentales et appliquées et par la présence des mathématiques fondamentales au cœur du monde économique, la question de la communication est centrale».

Journées Nationales des Doctorants et des Jeunes Chercheurs

Les journées nationales des doctorants et des jeunes chercheurs seront organisées les 18 et 19 juillet 2017 par le Collège des sciences physiques et chimiques de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, en collaboration avec des acteurs ayant acquis une expérience dans cette matière. L'édition 2017 sera animée par six enseignants-chercheurs experts à travers des conférences plénières couvrant quatre grands domaines des sciences physiques :

- Matériaux et Energies;
- Physique Quantique, Interaction Rayonnement-Matière;
- Physique des Hautes Energies, Gravitation et Cosmologie;
- Méthodes Mathématiques pour la Physique.

Le principal objectif de ces journées est de contribuer au développement des échanges entre doctorants, jeunes docteurs nationaux et des enseignants chercheurs en vue de :

- mutualiser les compétences et le savoir-faire;
- renforcer les liens entre les scientifiques nationaux travaillant dans les domaines des sciences physiques et chimiques à travers d'échanges d'expertises, de co-encadrement et des co- publications;
- aider pour plus de structuration et plus d'efficacité des réseaux de jeunes chercheurs en sciences physiques et chimiques.

Ces journées offrent aussi une tribune permettant aux doctorants et aux jeunes chercheurs de présenter, sous forme d'ateliers, leurs résultats scientifiques, de discuter leurs travaux de recherche et de s'informer sur les avancées dans les domaines des sciences physiques et chimiques qui les intéressent. Les présentations retenues par le comité de lecture des journées seront publiées en quelques exemplaires de références sous forme de "proceedings" des journées.

Mathématiques Appliquées à des questions de Développement (MADEV17)

Les mathématiques constituent un domaine de recherche nécessitant peu d'investissement en comparaison avec d'autres disciplines faisant appel à des dispositifs expérimentaux très coûteux. Dans ces conditions, les mathématiques pures et appliquées ont pu se développer plus largement en Afrique et dans les Pays en Développement pour atteindre un niveau scientifique souvent excellent. Les mathématiques trouvent de nombreuses applications dans pratiquement tous les domaines de la science, des sciences physiques et de l'énergie, à la biologie, dans les sciences de l'environnement, de la santé et de la médecine et plus récemment en économie et même dans les sciences sociales.

L'esprit de MADEV 17, congrès prévu du 16 au 19 octobre 2017 en collaboration avec

l'Académie des Sciences de France, est de partir de problèmes concrets du développement et de montrer comment les mathématiques (et plus largement l'informatique) contribuent à résoudre ces problèmes, ou encore aident à la décision pour ces problèmes. MADEV 17 sera l'occasion de mettre en avant les travaux de recherche en mathématiques appliquées développés par des équipes Africaines sur des questions importantes de développement qui ont été regroupées en une série de sept thèmes: (contrôle des systèmes ; épidémiologie; exploitation des ressources marines; production, dynamique et diversité des peuplements végétaux; santé; économie; énergie). Chaque thème est en général animé par un binôme Franco-Africain. Dans chaque session thématique, au moins 50% des conférenciers sont africains.

Savoirs et patrimoines locaux : des atouts pour le développement des arrière-pays au Maroc dans un monde qui change

A partir de l'expérience marocaine, et des résultats que présente l'ouvrage **Terroirs du Sud, vers un nouveau modèle? Une expérience marocaine** (cf. Bulletin N°20, pp.122-128), le séminaire «**Savoirs et patrimoines locaux**», prévu pour le 2 novembre 2017, organisé par le Collège Etudes Stratégiques et Développement économique, rappellera les grandes lignes de ces résultats, avant d'inviter d'autres chercheurs à y réagir et à les discuter.

Plusieurs points seront proposés à la réflexion :

- Les modalités et les enjeux du transfert au Sud de concepts et de dispositifs forgés au Nord;
- La pertinence de ces concepts et de ces dispositifs pour appréhender et valoriser la diversité des rapports des sociétés à la fois à l'espace, aux ressources et au pouvoir;
- La redéfinition, à travers les dynamiques de terroir, aussi bien de l'identité que de la gouvernance (locale et nationale) des ressources ou des modalités de la gestion collective des territoires;

- L'impact social et territorial de la mise en marché d'éléments autrefois soustraits de l'ordre marchand.

On examinera également le risque que la mise en avant du terroir efface, faute de l'avoir comprise ou d'en avoir mesuré l'importance, la complexité bio-culturelle des lieux. Et on s'interrogera sur les capacités des politiques des terroirs à générer au niveau local un projet intégrateur, alors qu'elles ont largement montré leur capacité à créer ou à consolider des filières, à redéfinir des produits locaux de façon à ce qu'ils puissent répondre aux exigences de qualité des consommateurs urbains. L'enjeu principal étant la capacité des acteurs locaux à s'approprier les démarches descendantes et à les redéfinir pour éviter qu'elles ne dérivent vers une «mise en conformité» des sociétés, des systèmes de production et des produits qui font toute la richesse et la diversité du monde rural.

Les Conférences

Conférences	Conférencier	Lieu et date
Les défis des Mathématiques au XXI^{ème} siècle	Frank Pacard , Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'Ecole polytechnique, France	Académie Hassan II des Sciences et Techniques 18 septembre 2017
Gene-based therapy for Motor Neuron Disease	Mimoun Azzouz , Directeur de la recherche et de l'innovation, Université Sheffield, Royaume Uni	Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès 20 septembre 2017
Cancer et nouvelles thérapies	Alain Fischer	30 octobre 2017
Genetics of sudden cardiac death	Connie Bezzina , Academic Medical Center, Amsterdam, Netherlands	Octobre-novembre 2017



Les Conférences de l'Académie

Les conférences de l'Académie

Cinq conférences ont été organisées au cours de ce semestre, dont certaines, avec le concours du service culturel de l'ambassade de France à Rabat. Ces conférences sont disponibles sur le site de l'Académie (www.academiesciences.ma) et certains textes choisis sont publiés dans leur intégralité dans cette rubrique du Bulletin d'Information.

Conférences	Conférencier	Lieu et date
L'instabilité structurelle du système international	Thierry de Montbrial , (IFRI), Membre de l'Académie des Sciences Morales et Politiques- France	Académie 07 avril 2017
Le futur de l'exploration spatiale	Jean-Yves Legal , Président du CNES	Académie 24 avril 2017
Le CERN, la découverte du Boson de Higgs, un nouveau palier de la connaissance et une aventure scientifique hors norme	Michel Spiro , Président de la Société Française de Physique (SFP)	Académie 29 mai 2017
L'histoire des sciences	Mohamed Abattouy , Université Mohammed V - Rabat	Académie 12 juin 2017
Applications des micro-algues : présent et futur	Emilio Molina Grima	Oujda 24 avril 2017

Le futur de l'exploration spatiale et le programme Galileo

Jean-Yves LEGALL

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), France



Mesdames et Messieurs,

En tant que Président du Centre National d'Études Spatiales, je vous remercie avant tout pour cette invitation à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Mon intervention d'aujourd'hui permettra de revenir sur le rôle essentiel du spatial dans l'activité humaine. Je montrerai comment les développements spatiaux s'inscrivent dans une volonté d'agir ensemble pour offrir aux populations mondiales des sources inépuisables de nouvelles informations, permettant d'une part, de mieux comprendre notre univers et d'autre part, de mieux maîtriser l'activité humaine, tant pour la protection de notre planète que pour l'amélioration des conditions de vie de nos concitoyens.

Aujourd'hui, le secteur spatial mondial est dans une phase d'évolution qui s'articule autour de trois enjeux structurants : l'exploration, le climat et l'innovation qui, parmi ses multiples facettes, met l'accent sur les nouvelles applications du spatial comme un outil et non comme une fin en soi. Si les deux premiers thèmes s'inscrivent tout naturellement dans un cadre multilatéral, les nouvelles applications peuvent aussi être une source de coopération. Je l'illustrerai par l'exemple du grand programme spatial européen de positionnement par satellites qu'est Galileo. Aujourd'hui, alors que les services initiaux ont été annoncés, il devient un relai de coopération, notamment avec l'Afrique et je souhaite que le Maroc, par la compétence de ses acteurs scientifiques et techniques, nous aide à orienter au mieux ce système pour répondre aux besoins du continent africain.

La coopération spatiale franco-marocaine



Dans le domaine spatial, le Maroc dispose de deux centres de recherche, le CRERS et le CRTS, avec lesquels le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) est heureux de coopérer. Cette coopération s'est d'ailleurs renforcée en 2015 avec la signature d'un accord-cadre entre le CNES, le CRERS et le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS), au cours d'une réunion des Premiers ministres de nos deux pays. Parmi les résultats les plus notables, nous pouvons mettre en avant notre organisation conjointe de la rencontre des chefs d'agences spatiales, qui a eu lieu à Marrakech le 11 novembre durant la COP22 et qui a permis de rappeler le rôle majeur des données spatiales pour la gestion de l'eau. De plus, plusieurs rencontres ont permis d'identifier des actions de coopération concrètes, en particulier sur les thèmes «Ressources en eau et agriculture» et «Océanographie et littoral» avec du transfert de savoir-faire et un accès privilégié aux données Copernicus distribuées par le CNES.

Les actions récentes montrent que notre coopération est désormais dans une phase opérationnelle. Après la formation d'experts du CRTS sur la chaîne automatique de cartographie d'occupation des sols organisée par le CNES à Toulouse, au CESBIO, nous organiserons un atelier à Rabat dans les mois à venir pour présenter les produits de télédétection pour le suivi de l'environnement, de l'agriculture et des ressources en eau. Par ailleurs, une première visite des moyens de tests du LAM à Marseille, a également été organisée pour un expert du CRERS début 2017.

Un environnement qui évolue très vite



Un nouvel ordre mondial spatial s'est instauré, dans lequel les Etats-Unis jouent toujours un rôle de leader incontestable et incontesté et où l'Europe, le Japon, la Russie ont été rejoints par la Chine et l'Inde en tant que grands acteurs du spatial capables de programmes innovants. Mais derrière, se profilent désormais de plus en plus de pays qui affirment leur volonté d'établir un programme spatial proposant à la fois une réponse aux besoins de leurs citoyens et de nouvelles pistes scientifiques, notamment en terme d'exploration.

Il serait trop long de lister tous ces pays qui, ces dernières années, sont devenus propriétaires d'un satellite pouvant aller du simple cubesat au satellite avancé en observation de la Terre ou en télécommunications. Pourtant, il est clair que nous pouvons parler d'une nouvelle communauté de pays émergents du spatial, prêts à se tourner vers des programmes de plus en plus pointus même s'ils restent conformes à leurs moyens, en faisant appel à des satellites plus petits et surtout moins chers.

En parallèle de ces mouvements étatiques, est apparu aux États-Unis le "NewSpace", un nouvel espace façonné de toutes pièces par des entrepreneurs empreints de l'esprit, des moyens et de l'ambition de la Silicon Valley et animés par la volonté de transformer les activités spatiales et de transporter dans le cosmos les nouvelles frontières du rêve américain. Si Richard Branson, exception de nationalité faite, a été le premier à lever la tête vers les étoiles, Elon Musk et maintenant Jeff Bezos lui ont emboîté le pas. Toutefois, ils ne sont que des chefs de file : dans leur sillage, se glissent déjà plusieurs centaines d'entreprises, moins riches peut-être mais non moins ambitieuses. Plusieurs acteurs chinois annoncent également de nouvelles constellations dédiées aux télécommunications, à l'observation de la Terre ou aux expérimentations scientifiques avec plus d'une dizaine de satellites testant ces constellations, déjà lancés depuis 2015.

L'Europe et la France



Dans ce contexte, l'Europe joue sa partition. D'abord avec l'ESA, qui est l'agence spatiale de l'Europe toute entière, nous développons ce dont nous avons collectivement besoin pour utiliser au mieux le spatial : les lanceurs Ariane et Vega, la participation européenne à la station spatiale internationale, des satellites pour les sciences spatiales, depuis l'étude de l'univers jusqu'à celle de notre planète et de son climat. Nous contribuons ainsi à l'accroissement de la compétitivité de l'industrie spatiale européenne.

Nous jouons un rôle tout aussi important au sein des programmes de l'Union européenne : Galileo, Copernicus et Horizon 2020. Il s'agit d'une part, de s'assurer que les services offerts par Galileo et Copernicus seront largement utilisés et d'autre part, de promouvoir l'innovation grâce aux mécanismes de soutien à la recherche mis en place par Horizon 2020. Par ailleurs, la Commission s'est engagée dans la mise en œuvre d'une stratégie spatiale pour l'Europe, récemment adoptée, tout à la fois pour consolider les programmes existants et pour encourager de nouvelles solutions remettant en question les concepts traditionnels du spatial.

En France aussi, l'environnement évolue très vite. Dans le domaine industriel, de nouvelles responsabilités voient le jour, l'industrie se positionnant plus ouvertement comme un investisseur prêt à prendre davantage de risques que par le passé. Dans le même temps, de nouveaux acteurs apparaissent, qui poussent à la recherche de solutions innovantes comme le montre la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) et ses projets d'utilisation des satellites pour le contrôle fin et régulier de ses voies ferrées ou bien l'Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale (INSERM), intéressé par le suivi médical des astronautes en orbite et les enseignements qu'on peut en retirer en matière de santé publique.

Les organismes de recherche ne sont d'ailleurs pas en reste. Outre la santé, les partenariats du CNES avec le CNRS, bien au-delà de la recherche spatiale à proprement parler et jusque dans les sciences humaines, le CEA, l'ONERA, l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), montrent bien que les initiatives se multiplient et s'appuient sur de nouveaux usages du spatial, riches eux-mêmes de nouveaux débouchés.

Je voudrais à présent détailler les trois enjeux structurants dont j'ai parlé : **l'exploration, le climat et l'innovation.**

L'exploration

La révolution que connaît le secteur spatial, portée par le NewSpace et les pays émergents du spatial, pourrait bien avoir une conséquence inattendue: la formidable accélération de l'exploration martienne. Envisagée il y a encore un an pour 2040-2050, la mission habitée vers Mars est en train de se rapprocher à une vitesse vertigineuse, puisque ses promoteurs nous parlent à présent de 2030, voire de 2025 !

La raison? Les bénéfices apportés par la spectaculaire diminution du coût des satellites et des lancements, rendue possible par la multiplication des projets et l'augmentation des cadences. Et ce qui n'était qu'un concept, l'envoi vers Mars d'un vaisseau suffisamment grand pour permettre à quatre ou six personnes de séjourner deux ans dans l'espace, est en train de devenir un projet et bientôt une réalité. Au 67^{ème} International Astronautical Congress tenu à Guadalajara en septembre dernier, la mission habitée vers Mars était partout, présentée comme une véritable épopée des temps modernes.

Le CNES et Mars



C'est pour cela que le CNES a fait de l'exploration de Mars, son cheval de bataille. Nous avons ainsi mis en place à Toulouse un centre d'opérations pour deux instruments auxquels nous sommes associés sur le rover Curiosity qui explore la surface de Mars depuis 2012 dans le cadre de la mission de la NASA, "Mars Science Laboratory". Il permet aux ingénieurs, techniciens et scientifiques français du CNES et des laboratoires du CNRS d'opérer d'une part ChemCam, qui permet de connaître la composition chimique des roches martiennes en analysant les spectres de lumière obtenus à la suite de la fusion d'une zone atteinte par un laser et d'autre part SAM, qui analyse le sol

et le proche sous-sol de Mars grâce au couplage entre un module de préparation d'échantillons solides ou gazeux et un module d'analyse de la phase gazeuse résultant de la préparation.

Nous participons également aux deux missions particulièrement ambitieuses du programme ExoMars de l'ESA. En octobre dernier, la première a injecté en orbite martienne, le Trace Gas Orbiter (TGO), qui étudie l'atmosphère de Mars et son évolution. En 2020, une deuxième mission déposera sur Mars, une plateforme et un véhicule équipé de neuf instruments scientifiques dédiés à l'étude du sol et sous-sol. Pouvant forer jusqu'à deux mètres de profondeur, il recueillera des échantillons préservés des rayonnements et des oxydants qui détruisent la matière organique.

D'autres missions sont aussi en développement avec la NASA, InSight qui sera lancée en 2018 et dont l'instrument principal, un sismomètre, sera fourni par la France, Mars 2020 qui succèdera à Curiosity et qui disposera d'une version améliorée de ChemCam, appelée SuperCam, pour sélectionner les échantillons qui pourront être récupérés et envoyés sur Terre. Enfin, nous venons de signer un accord avec la JAXA au Japon afin de participer à la mission MMX de retour d'échantillons de Phobos.

Le CNES et le système solaire



L'exploration du système solaire, c'est aussi pour le CNES, l'extraordinaire réussite de la mission Rosetta qui a atteint en 2014 la comète Churyumov-Gerasimenko et qui a mené une mission de deux ans avec, en particulier, l'atterrissage sur le noyau de la comète de la sonde Philae qui a permis de collecter de nombreuses données. On dispose désormais d'une carte de l'eau sur toute la comète, ce qui va permettre de répondre à de nombreuses interrogations. La lecture des données montre

une construction des deux lobes de la comète en pelure d'oignon. Autre surprise, alors que de nombreux modèles de formation cométaire recouraient à l'hypothèse de la présence d'un champ magnétique afin d'améliorer le processus de formation et de cohésion du noyau, le magnétomètre de Philae est formel : il n'y a pas le moindre champ magnétique rémanent en surface. Autre résultat étonnant, la comète émet dans sa chevelure de surprenantes proportions d'oxygène, jusqu'à 10% de la vapeur d'eau mesurée ! Enfin, la texture de la comète fait apparaître des régions régulièrement tapissées de blocs de 3 mètres, présents sur les parois de puits d'effondrement circulaires qui seraient des sortes de briques élémentaires à partir desquelles les comètes se sont formées, fruit de l'agglomération, grain par grain, de poussières, de glace, de silicates et de matière organique jusqu'à une taille de l'ordre du mètre, ce qui est en phase avec les modèles de formation du système solaire.

L'étude d'un astéroïde géocroiseur est également en cours avec la mission de la JAXA Hayabusa-2 lancée en 2014 qui prévoit, en octobre 2018, d'analyser la composition minéralogique de la surface et de prélever des échantillons sur un astéroïde grâce à l'atterrissage de MASCOT développé par le DLR et le CNES. Enfin, le CNES est fortement impliqué dans la mission Juice de l'ESA, qui doit être lancée en 2022 pour analyser l'atmosphère et la magnétosphère de Jupiter et les interactions avec ses lunes glacées. Juice tentera aussi de répondre à partir de 2030 à de nombreuses questions fondamentales telles que les conditions qui président à la formation des planètes et à l'émergence de la vie afin de mieux comprendre comment est né le système solaire.

Le climat



Si les missions d'exploration nous aident à mieux comprendre l'univers, les missions d'observation sont celles qui apportent les preuves du changement climatique et ont servi de base à la COP21 qui a fait accepter universellement la réalité du changement climatique. Sans les satellites, il eut été impossible de démontrer l'élévation du niveau des océans : 3,2 mm par an, certifiés par Topex-Poseidon, puis Jason 1, 2 et 3. De la même façon, ce sont les satellites qui permettront de mesurer les efforts réalisés par les États en matière de limitation des émissions de gaz à effet de serre.

A la faveur de la COP21, le CNES a proposé une coordination des agences spatiales du monde entier pour faire de la lutte contre le changement climatique, une priorité pour le spatial. Dans ce cadre, les chefs d'agences spatiales ont adopté la Déclaration de Mexico en 2015 et une coordination, menée par le CNES, s'est mise en place pour mieux bénéficier du spatial autour du suivi des gaz à effets de serre à New Dehli en 2016 et, avec le CRTS, des ressources en eau à Marrakech lors de la COP22.

En effet, parmi les 50 variables climatiques essentielles, 26 ne peuvent être mesurées que depuis l'espace : le réchauffement global, l'élévation du niveau des mers, la disparition de la couche d'ozone, tous ces phénomènes sont documentés grâce aux satellites. Le succès des COP21 et COP22 n'aurait pas eu lieu si les satellites n'avaient pas alerté l'opinion publique sur l'importance des changements en cours. Et ce n'est pas fini : nous sommes à l'aube d'une révolution pour le suivi des gaz à effet de serre puisque la technologie permet aujourd'hui la mesure des concentrations de gaz dans l'atmosphère depuis l'espace. Les premiers satellites, OCO2 américain et GOSAT japonais, suivis du TANSAT chinois vont être rejoints par MicroCarb pour la mesure du dioxyde de carbone, dont la France a lancé le développement à la COP21 et de Merlin pour la mesure du méthane que nous réalisons avec le DLR. Les prochains satellites du programme Copernicus de l'Union européenne, auxquels participe largement la France, devraient apporter également une contribution majeure à la mesure de la distribution des gaz à effet de serre.

Les ressources en eau



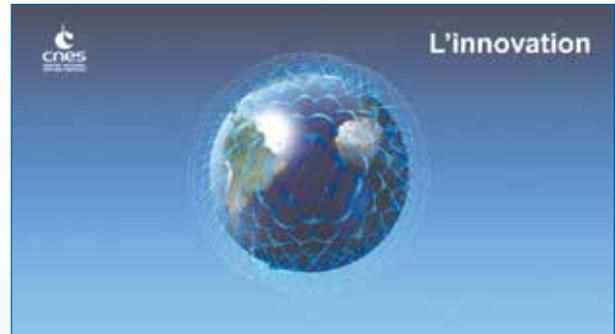
Le suivi des ressources en eau, prend lui aussi une nouvelle dimension, les gaz à effet de serre altérant le cycle de l'eau, tant au niveau des précipitations que des zones stockant de l'eau. Les perturbations induites sur les écosystèmes et l'activité humaine en général peuvent être observées puis modélisées grâce aux données spatiales de nombreuses missions, notamment celles où le CNES est impliqué, en altimétrie avec les missions Jason avec les Etats-Unis et SARAL-AltiKa avec l'Inde, pour la mesure des précipitations avec la mission Megha-Tropiques avec l'Inde, sans compter les multiples instruments des Sentinel du programme européen Copernicus. En 2021, la mission SWOT en partenariat avec les Etats-Unis, le Royaume-Uni et le Canada offrira une nouvelle génération d'altimètre à large fauchée avec des niveaux de résolution spatiale inégalés.

Pour accompagner ces projets, il s'agit désormais de faciliter le partage des données et des résultats, non seulement pour que la communauté en bénéficie mais aussi parce que les calibrations croisées de ces données permettront d'atteindre plus vite un consensus sur les résultats obtenus. C'est l'esprit des Déclarations de New Delhi sur les gaz à effet de serre et de Marrakech sur la gestion de l'eau, adoptées par 60 agences spatiales, un résultat remarquable destiné à traduire dans les faits à la COP22 les décisions prises à la COP21.

Au-delà, un changement majeur se dessine, très proche de ce que nous avons vécu pour la météorologie. Un nouvel écosystème émerge sous la pression des scientifiques et des besoins sociétaux : les satellites vont créer des données qu'il conviendra de traiter et d'intégrer dans des modèles toujours plus performants. A terme,

il est probable qu'elles seront utilisées par des entrepreneurs audacieux et imaginatifs, comme c'est déjà le cas aujourd'hui pour les données météorologiques.

L'innovation



L'innovation est à l'origine du NewSpace qui peut être défini comme tout un ensemble d'applications faisant de l'espace, non plus une fin mais un moyen. Les ambitions de Google ou d'Amazon ne se focalisent pas sur l'espace en tant que tel, mais sur l'espace comme moyen de connexion, d'observation ou de tout ce qui reste à imaginer. Chez SpaceX, un tiers du personnel est issu du spatial historique, formé chez McDonnell puis successivement passé chez Boeing et Sea Launch avant d'atterrir chez SpaceX, même si, le temps passant, cette communauté s'étirole. Un second tiers est issu du monde de l'Internet et le dernier tiers vient d'ailleurs. Les parcours sont divers et seule compte ici l'expertise dans un domaine particulier : ainsi Elon Musk a recherché pour sa chaîne de production de moteurs une personne capable de produire chaque année 100 objets d'une valeur d'un million de dollars. C'est finalement un ingénieur venu de l'automobile qui a été choisi : jusque-là, il produisait des voitures de sport.

Construire de nouvelles applications en Europe est également une priorité. Il s'agit tout d'abord d'innovation en s'appuyant sur les technologies NBIC (nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information et sciences cognitives), non seulement à bord des satellites mais aussi au sol pour transformer la donnée en information directement utile, grâce à des systèmes spatiaux plus petits, plus modulaires, plus flexibles, plus évolutifs et plus diversifiés. Il s'agit ensuite de tirer le meilleur parti de nos grands projets et à cet égard, je mettrai en avant le projet Galileo.

Galileo, un projet fédérateur



Au début des années 2000, l'Union européenne ne s'était pas encore impliquée dans le domaine spatial, qui restait dominé par des considérations scientifiques et techniques. Dans ce contexte, le lancement de Galileo a été révolutionnaire à plus d'un titre. D'abord, parce que Galileo a symbolisé un changement de paradigme majeur, faisant du spatial un outil au service de politiques publiques sectorielles, notamment dans les transports. Ensuite, parce que Galileo a constitué la première infrastructure majeure de l'Union, au bénéfice direct de ses citoyens et de son indépendance stratégique. En ce sens, Galileo dépasse le seul secteur spatial pour constituer un projet européen fédérateur. Le Parlement européen a d'ailleurs très rapidement saisi la dimension éminemment politique de ce projet, en le soutenant sans faille depuis ses débuts, que ce soit lors de l'élaboration des textes législatifs successifs ou des discussions portant sur son financement et son inclusion dans le Cadre Financier Pluriannuel. Avec 7 Md€ sur la période 2014-2020, le programme a pu ainsi obtenir un financement à la hauteur de ses enjeux.

A présent, la pérennisation de Galileo passe évidemment par des investissements publics dans les infrastructures, justifiés par la nécessité de maintenir l'autonomie stratégique européenne, mais surtout par le développement du secteur applicatif, qui engendrera des bénéfices socio-économiques directs et indirects. Aujourd'hui, Galileo est en bonne voie : le système est en train de s'imposer sur le marché des récepteurs, qui permettent de recevoir un signal de navigation ou de positionnement sur son "smartphone" ou dans son véhicule. Cela permettra en retour de développer un marché de services applicatifs et donc de créer une communauté d'utilisateurs des signaux Galileo.

Galileo, sur la bonne orbite



Après des débuts compliqués, marqués par la redéfinition du "Business Model" et quelques retards et surcoûts, qui sont néanmoins propres à toutes les activités spatiales, le système est à présent en bonne voie. Par ailleurs, le premier volet des programmes européens de navigation par satellites est opérationnel depuis 2010. Il s'agit du système EGNOS, qui permet d'augmenter la précision et l'intégrité des signaux de navigation par satellites, provenant du GPS aujourd'hui et de Galileo demain.

Pour ce qui est de Galileo, les lancements sont à présent réguliers. Avec 18 satellites en orbite dont 15 opérationnels sur les 30 de la constellation finale prévue en 2020, les services initiaux ont débuté dès 2016 et doivent être améliorés en 2018 et finaux en 2020. La complémentarité d'EGNOS et de Galileo, à l'horizon 2022, finalisera le déploiement opérationnel.

Les applications de Galileo

Le succès à long terme de Galileo passe impérativement par le développement rapide du secteur applicatif européen. Cela justifiera les investissements publics réalisés, en contribuant à la croissance et à l'innovation européennes dans des secteurs de pointe, en crédibilisant Galileo auprès des utilisateurs internationaux mais surtout en induisant des bénéfices socio-économiques pour tous les citoyens européens. Dans ce contexte, il importe de ne pas prendre en compte uniquement les bénéfices directs comme la vente de récepteurs Galileo mais aussi de considérer les bénéfices liés à la vente de nouveaux services et plus encore, les bénéfices indirects liés aux externalités positives. Vu sous cet angle, Galileo ne constitue pas seulement un levier pour la création de nouveaux marchés commerciaux, mais également un vecteur de politiques publiques.

Cet aspect peut être illustré par un exemple concret parmi d'autres, les bénéfices attendus de l'utilisation de Galileo dans le secteur du transport ferroviaire. Le marché direct des récepteurs GNSS pour le rail ne représente que 0,2% du marché total, loin derrière les segments des "smartphones" et des transports terrestres. Malgré ces bénéfices directs très limités, l'utilisation de Galileo aura des bénéfices indirects importants, en remodelant entièrement l'architecture de signalisation du réseau ferré secondaire. Une étude menée dans le cadre du 7^{ème} PCRD, réalisée dans 15 Etats européens, a ainsi démontré qu'un investissement de 16 Md€ sur 35 ans dans ces technologies, induira des bénéfices de 35 Md€ pour les exploitants, permettant notamment de rendre viable économiquement des lignes régionales aujourd'hui déficitaires. Les externalités positives afférentes seraient également nombreuses, en termes d'impact écologique ou d'aménagement du territoire. Et ce raisonnement est bien sûr valable pour tous les secteurs pouvant bénéficier de Galileo, de l'agriculture aux transports intelligents.

Le rôle central du Maroc en Afrique



Face à cet environnement qui évolue très vite et à ces grands défis que sont les prochaines étapes, l'exploration robotique voire habitée, la lutte contre le changement climatique et l'industrie spatiale de demain, la France et l'Europe ont su réagir grâce à une politique d'innovation à la fois vigoureuse et ciblée.

Mais si innover est indispensable, structurer des programmes d'envergure l'est tout autant. Pour cela, l'expérience montre que la mise en place de projets en coopération est non seulement un outil qui permet d'agrèger les ressources humaines et financières mais qui est surtout un formidable

tremplin pour associer des compétences et des qualités complémentaires sur des systèmes ou des instruments spatiaux.

A l'occasion de la COP22, le CRTS, le CRERS et le CNES ont su mobiliser la communauté spatiale internationale pour mettre les outils spatiaux au service du climat et favoriser l'émergence de nouvelles utilisations de l'espace, en phase avec les défis climatiques et environnementaux.

Cette coopération va aller de l'avant sur d'autres thèmes spatiaux scientifiques et techniques. Le rôle de relai du Maroc vers l'Afrique notamment pour le développement et la diffusion de nouvelles applications me semble être l'un des points clés de cette coopération. A cet égard, je suis particulièrement heureux que cette présentation ait été l'occasion d'ouvrir de nouvelles réflexions avec vous en ce sens.

Je vous remercie.

L'instabilité structurelle du système international

Thierry de MONTBRIAL

*Membre de l'Académie des Sciences Morales et Politiques - France
Fondateur et Président de l'Institut Français des Relations Internationales
Fondateur et Président de la World Policy Conference*



Quand nous avons parlé avec Mohammed Kabbaj de cette conférence dans votre auguste Académie, je pensais qu'il fallait aborder cette question d'une manière un peu plus structurée que ce qu'on peut faire devant les littéraires purs, les gens qui n'ont pas de formation scientifique. C'est pourquoi je me suis proposé de mettre l'accent sur la notion de stabilité ou d'instabilité structurelle qui est bien connue des mathématiciens, physiciens, etc. Alors, ce dont je vais vous parler, c'est de l'instabilité structurelle du système international contemporain.

Comme l'a dit Mohamed Kabbaj, c'est un sujet dont on pourrait parler pendant des heures et je pourrais peut être faire ce que faisait Léonid Brejnev au cours des dernières années de sa vie, quand il était comme on dit en termes familiers, un peu gâteux. Un jour, il fait un discours pendant six heures. Et au cours de ces six heures, il est très fatigué, et ceux qui l'écoutent le sont encore plus. Alors, s'adressant à son secrétaire, il lui dit: "*mais tu m'avais dit que c'était un discours de trois heures!*"; et l'autre lui répond «*oui camarade secrétaire général, mais vous n'avez pas vu que je vous ai donné deux exemplaires du discours*". Moralité : premièrement, il faut savoir être relativement bref et deuxièmement, il peut, dans certains cas, être utile de ne pas avoir de papier à lire. Alors, je vais essayer de ne pas être très long d'autant plus qu'il serait plus intéressant d'interagir avec vous sur des aspects particuliers de la question.

Quand on parle d'instabilité ou stabilité structurelle d'un système, la première question qu'on se pose est : dans quel sens peut-on parler d'un système international? Il est évident qu'on ne peut parler de notion de système international que d'une manière un peu floue, comme peut l'être la logique floue par rapport à la logique traditionnelle. Mais je pense quand même que cette notion de système international est assez commode.

On peut décrire le système international actuel, celui dans lequel nous sommes aujourd'hui, par quatre caractéristiques de base qui sont :

- «**globalité**», globalisation, mondialisation. Ce sont des termes qui sont souvent utilisés l'un pour l'autre;
- «**multipolarité**» : terme très utilisé mais qu'entend-on précisément par là?
- «**hétérogénéité**», notion je crois très souvent omise et absolument fondamentale. Elle est à la base de la réalité internationale.
- et enfin «**complexité**».

1) **Globalité, globalisation**, pour moi, a un sens extrêmement précis, extrêmement simple : c'est la tendance pour toute unité active (*) à raisonner stratégiquement¹ à l'échelle planétaire. Une des caractéristiques du monde actuel, c'est que, effectivement, même les entreprises dont les activités paraissaient naguère encore purement

1- Alors, il faudrait là aussi avoir défini ce qu'on appelle stratégie. Je ne vais pas le faire en détail. Je vais admettre que chacun comprend ce qu'on appelle stratégie mais on peut y revenir pendant la discussion parce que le mot stratégie fait partie de ceux qui sont constamment utilisés; mais j'ai des raisons de penser que beaucoup de gens qui parlent de stratégie ne savent pas ce dont ils parlent. Alors admettons que nous nous comprenons si vous voulez de la même manière. Cela me rappelle en Mathématiques Spéciales, mon professeur qui disait «je ne vais pas vous définir ce que c'est qu'un Ensemble, j'admettrais que nous en avons tous l'intuition et que c'est la même»- Il est certain que, ayant par la suite étudié la Logique Mathématique, j'ai compris en effet pourquoi ce n'était pas si facile de définir la notion d'Ensemble. Mais c'est très souvent vrai dans les concepts en général: voilà pourquoi il n'est pas forcément évident que tout le monde ait la même chose en tête en parlant de stratégie.

locales sont devenues globales ². Alors en même temps, cette tendance, comme souvent dans les choses de la vie, ne va jamais jusqu'au bout.

La globalisation est un phénomène. On n'est pas pour ou contre la globalisation: c'est un fait. La globalisation est un fait, dont la racine fondamentale est technologique, dont la raison fondamentale est -je ne dirais pas la révolution des technologies de l'information et de la communication- mais une suite de vagues déferlantes de révolutions technologiques. Parce que si nous regardons les révolutions technologiques en question en admettant qu'elles ont commencé dans les années soixante avec l'invention d'internet ³, il n'y avait absolument pas à l'époque de signes précurseurs suggérant que ça allait déboucher sur ce que nous connaissons aujourd'hui. Si vous prenez les années soixante comme début de la révolution

technologique, ce que nous savons aujourd'hui presque soixante ans après, c'est que, non seulement cette révolution est un phénomène, mais qu'il y a des vagues successives qui ont de plus en plus d'ampleur, qui sont de plus en plus hautes. **Et ça, c'est absolument sans précédent historique.** Donc, on comprend que c'est ce phénomène là qui est à la racine de la globalisation; et parler d'interdire la globalisation comme le font certains qui se déclarent anti-globalisation, n'a pas grand sens. Il faut gratter beaucoup plus pour voir exactement contre quoi on est, contre un certain nombre de conséquences de la globalisation. On peut regretter, on peut même parfois être affolé par les perspectives que certaines technologies actuelles ouvrent, et je n'ai pas besoin ici de vous faire de dessin là-dessus. Mais c'est aussi un sujet dont on peut parler après.

(*) Les unités basiques du système international sont ce que j'appelle dans mes travaux des unités actives, un ensemble d'individus au sens ordinaire du terme, qui est structuré par une Culture commune (qui les unit, qui en fait un ensemble organique) et par une Organisation ayant pour finalité de prendre des décisions qui concernent l'ensemble en question, vis-à-vis de l'extérieur et vis-à-vis de l'intérieur. La finalité ultime, (comme le disait Spinoza, la finalité d'un être, c'est de persévérer dans son être), la finalité d'une unité active (dans le sens que je viens de définir rapidement), c'est de persévérer, de survivre quand il y a en cause un aspect de sécurité, d'identité, de défense; l'Organisation, c'est ce qui permet donc à cette unité active de survivre et de se défendre contre tous ce qui pourrait la détruire à la fois vis-à-vis de l'extérieur et vis-à-vis de l'intérieur. Alors, ce qu'il faut bien voir (dans mes livres j'ai développé tout ça longuement mais ce que je viens de dire suffit probablement pour avoir l'intuition de la chose), c'est que les unités actives sont de toutes sortes: par exemple ça peut être un Etat, et vous remarquerez tout de suite que ce genre de définition peut conduire à faire la distinction entre des Etats forts et faibles. Par exemple un empire multi-ethnique, comme l'était l'empire russe ou l'Union Soviétique, qui avait habillé idéologiquement une réalité impériale, avait une Organisation forte et une Culture faible. Si vous prenez l'Allemagne au 19^{ème} siècle, avant l'unification par la Prusse, c'était l'inverse: une Culture forte et une Organisation faible. On peut discuter aussi la notion de fragilité d'une unité active par la référence au rapport qu'il peut y avoir entre la force ou la faiblesse de l'Organisation et celles de la Culture. Je parle des Etats, mais une entreprise est une unité active, une association à but non lucratif est une unité active (en tout cas peut l'être, on peut toujours en discuter, c'est une question de force ou de faiblesse, etc.), mais aussi une organisation criminelle. Al Oaida ou Daech aujourd'hui sont des unités actives (l'unité active

2- Remarquez que pendant très longtemps, dans les cours d'Economie, on donnait des contre-exemples : on avait l'habitude de dire que les coiffeurs par exemple avaient une activité de proximité et que donc le métier de coiffeur n'impliquait pas d'avoir une approche mondiale. Ce qui n'est plus vrai, parce qu'aujourd'hui, les grandes marques de coiffure sont présentes partout dans les grandes villes à l'échelle mondiale.

3- Quand je faisais mon doctorat à Berkeley durant les années 1967-1968, je ne savais pas que c'était là qu'en même temps les scientifiques découvraient ce qu'on a appelé ensuite l'Arpanet, qui fut à la base de l'internet et qui était à l'époque une simple mise en communication des ordinateurs pour les besoins des scientifiques, principalement dans l'ordre militaire.

n'a rien à voir avec l'aspect légal de la chose et, a fortiori, avec son aspect moral). Les organisations religieuses sont des unités actives et ainsi de suite. Alors, toujours dans cette notion d'unité active, je distingue aussi les unités politiques et j'appelle unité politique (là aussi ça demande des nuances et je crois que le principe est assez facile à comprendre) une unité qui n'en reconnaît aucune autre supérieure à elle-même, supérieure au sens d'avoir la capacité de prendre en son nom des décisions qui peuvent la concerner soit vis-à-vis de l'extérieur soit vis-à-vis de l'intérieur. Evidemment, si vous prenez la notion d'Etat, par exemple au sens du droit international, un Etat (même dans la réalité contemporaine, où le droit international est organisé autour du système de l'ONU) est toujours souverain. L'Etat est toujours souverain dans le système juridique actuel et donc il ne reconnaît aucune unité supérieure à lui-même. Mais, si vous prenez Al Qaida, Daech, ISIS (enfin, quelle que soit la terminologie qu'on emploie), ce sont des unités actives certes mais qui ne reconnaissent, elles, aucune autorité supérieure à elles-mêmes alors que les autres ne les reconnaissent pas en tant que telles (c'est-à-dire que la reconnaissance de la non existence d'une unité supérieure n'a pas besoin d'être bilatérale et ce n'est pas une notion juridique). Al Qaida ou Daech (on va prendre ces deux exemples d'organisations criminelles) ne reconnaissent aucune autorité supérieure à elles-mêmes.

2) La deuxième caractéristique est la **multi-polarité**. Alors là aussi, il faut s'entendre. Blaise Pascal, l'auteur français, disait *«je ne dispute point du mot pourvu qu'on m'avertisse du sens qu'on lui donne»*. Multi-polarité, cela veut dire qu'il y a plusieurs pôles. Vous avez des gens qui disent que depuis la chute de l'Union soviétique, il y a un seul pôle, les Etats-Unis. Et puis il y en a d'autres, quand ça a commencé à déraiser, qui ont dit qu'en fait, il n'y a pas de pôle du tout et que le monde est apolaire. Ces discussions sont vaines si on ne regarde pas d'un peu plus près ce qu'on appelle «pôle».

Alors, je vais simplifier aussi un peu : un pôle, c'est une unité politique reconnue-on va dire un Etat si vous voulez ou une association d'Etats, mais pour simplifier on va dire un Etat-, qui a deux attributs qu'on peut objectivement identifier.

Le premier, c'est d'avoir une certaine puissance. Le second, c'est la volonté de la mettre au service d'une conception large de l'intérêt national, dans le cadre du droit international.

La puissance, ce n'est pas seulement le pouvoir entendu comme capacité d'agir et de mettre des ressources en mouvement (chaque terme là aussi est important) mais c'est aussi la capacité du passage à l'acte. Parce que là, on peut parfaitement avoir des ressources, avoir la capacité de mobiliser ces ressources et c'est la mobilisation effective de ces ressources qui produit des effets. Si vous

avez des ressources sans capacité de les mobiliser, c'est comme si vous n'aviez rien et si vous avez la capacité de mobiliser des ressources et que vous n'avez pas de ressources, c'est pareil. Il faut les deux: ressources et capacité de mobiliser ces ressources. C'est une notion qui fait évidemment penser à celle de travail en physique.

La puissance, c'est donc *la capacité de passage à l'acte* : parce que vous pouvez parfaitement avoir des ressources et la capacité de les mobiliser (donc du pouvoir dans ma terminologie) mais, pour des raisons qui peuvent être psychologiques, politiques ou autres, ne pas être capable de passer à l'acte. C'est pour ça que, pour moi, dans la puissance, il y a la notion fondamentale de passage à l'acte et vous voyez bien qu'il y a un certain nombre d'Etats (cela peut provenir des traditions, de l'histoire, etc.) qui ont les attributs du pouvoir et qui ont ou qui n'ont pas la capacité ou la volonté de passer à l'acte.

Donc pour moi, le premier attribut d'un pôle, c'est d'avoir les ressources de la puissance, la capacité de les mobiliser mais aussi la volonté de le faire, et de le faire avec une conception de son intérêt qui dépasse les visions strictement étroites selon lesquelles on peut se représenter l'intérêt national, c'est-à-dire qu'il faut qu'il y ait une vision de contribution à l'organisation d'un espace environnant plus large que l'espace de l'unité politique de l'Etat directement concerné. Alors, quand on parle de puissance régionale,

on peut s'y retrouver avec les définitions que je donne⁴. Une puissance régionale, c'est un Etat qui a la capacité et la volonté d'intervenir, pas forcément et exclusivement sur le plan militaire parce que la notion de ressources, la notion de mobilisation de ressources et la notion de puissance ne s'appliquent pas strictement et exclusivement à la chose militaire. La capacité de mobiliser des ressources à des fins économiques peut aussi avoir une finalité politique et c'est pourquoi on parle aujourd'hui de plus en plus de géo-économie (la géo-économie étant l'utilisation de l'économie à des fins stratégiques) comme un outil de la puissance. Tout cela fait aussi partie de cette notion de pôle, de cette notion de puissance dont je vous parle.

Si vous me demandez maintenant quels sont les pôles du système international actuel, là on doit entrer dans une logique d'ensemble flou. Vous savez que dans la notion d'ensemble flou on remplace la relation binaire (telle chose appartient ou n'appartient pas à tel ensemble) par une notion de degré d'appartenance :

- Chacun voit qu'aujourd'hui, les Etats-Unis sont un pôle du système international, le principal pôle par rapport aux définitions ou aux critères que je propose.
- On voit bien évidemment que la Chine répond également à ces critères.
- Si on doit reclasser la Russie telle qu'elle est devenue (la Russie a un PIB - je le signale au passage car on a toujours tendance à l'oublier - inférieur à celui de l'Italie. C'est pourquoi quand on dit que la Russie menace le monde, il faut relativiser les choses), la Russie reste incontestablement un pôle parce que si vous cherchez à la regarder à travers les critères que

je viens d'esquisser, il est évident (que ce soit typiquement au Moyen-Orient ou dans l'ex-empire ou dans l'ex Union soviétique) que les capacités et la volonté d'agir sont présentes.

- Si vous parlez de l'Inde, la réponse est également positive: l'Inde est incontestablement un pôle dans la mesure où l'Inde a toujours eu une conception marquée de la participation à l'organisation de son environnement. De ce point de vue là, la notion de pôle s'applique encore plus à l'Inde sans doute depuis la chute de l'Union Soviétique et surtout d'ailleurs depuis le début des années 1990 où elle a fait sa révolution libérale, où elle est entrée dans un cycle de croissance après avoir rompu avec les visions socialistes, etc.
- Pour parler de l'Union Européenne en tant que pôle, il faudrait rentrer beaucoup plus dans les détails, mais je pense que certains pays comme la France, la Grande Bretagne ou l'Allemagne, malgré toutes leurs difficultés actuelles, sont incontestablement des pôles du système international. Les deux premiers sont membres permanents du Conseil de sécurité de l'ONU.
- En Amérique latine, il y a quelques années, dans un exposé de ce genre, personne n'aurait hésité à mettre le Brésil dans la catégorie des pôles; mais le Brésil traverse pour le moment une mauvaise passe. Pour autant, à mon avis, du fait même que c'est de loin l'Etat le plus important d'Amérique latine, avec des ressources et parfois la capacité et la volonté de les mobiliser, il faut mettre le Brésil dans cette catégorie. Mais peut-être que si on établissait une hiérarchie ou des degrés d'appartenance, il faudrait nuancer.

4- Les Etats-Unis ont connu, au cours de leur courte histoire, des périodes très interventionnistes, des périodes très isolationnistes mais l'isolationnisme n'a jamais été total parce que la doctrine Monroe par exemple, qui de facto est toujours en vigueur aujourd'hui, interdit à toute puissance étrangère de venir s'immiscer dans l'environnement immédiat des Etats-Unis (ce qui comprend en tout cas l'Amérique centrale et beaucoup de conflits dans lesquels les Etats-Unis sont intervenus dans leur histoire étaient liés à cette région). C'est pourquoi, incidemment, je trouve abusif que les Etats-Unis considèrent qu'il était scandaleux de la part de la Russie après la chute de l'Union soviétique (qui était en même temps la chute de l'empire russe: vous avez la chute de l'idéologie communiste et la chute de l'empire russe et la chute du communisme ont entraîné celle du dernier empire hérité des siècles précédents et particulièrement du 19^{ème} siècle) de s'intéresser aux ex-républiques socialistes qui faisaient partie de l'URSS et qui sont dans son voisinage immédiat. On devrait comprendre que la Russie puisse avoir des intérêts dans cette région et puisse être titillée par la présence des pays occidentaux, etc. Les Etats-Unis eux-mêmes ont toujours été interventionnistes dans leur environnement immédiat.

Je n'ai pas l'intention de donner une liste exhaustive, mais comme souvent, quand on cherche à définir quelque chose, on y voit souvent plus clair en prenant le contraire et en regardant en l'occurrence ce qui n'est pas un pôle. Si vous prenez par exemple le Mozambique aujourd'hui et vous vous demandez s'il est un pôle du système international, je pense qu'aucun d'entre vous n'aura de difficulté à répondre non. On peut donc s'y retrouver relativement facilement dans cette notion de multipolarité.

3) Le troisième concept essentiel est l'«**hétérogénéité**». Curieusement, cette notion d'hétérogénéité n'a jamais été sérieusement approfondie par les théoriciens des relations internationales. C'est l'idée que nous ne sommes pas tous faits de la même manière, pour dire les choses simplement, et en particulier par rapport à la Culture et aux formes d'organisations. Alors ça paraît tout bête mais ce ne l'est pas du tout parce que le propre de la mentalité impérialiste par exemple, c'est de considérer que ce que l'on est soi-même (sa propre culture, sa manière de s'organiser, donc les deux termes de base de ce que j'ai appelé l'unité active) doit s'appliquer partout et à tous les autres. Je pense à la phase qui a suivi immédiatement la chute de l'Union soviétique, c'est-à-dire les années 1990 jusqu'à l'élection de Poutine en Russie en 2000, donc aux dix années qui ont suivi la chute de l'Union soviétique et qui ont été marquées par un très grand désordre, en Russie notamment. Cette période était marquée aussi dans l'illusion que l'Américain d'origine japonaise Francis Fukuyama a appelé la fin de l'Histoire, en transposant la notion hégélienne. Les Etats-Unis avaient effectivement, et les pays occidentaux en général, cette vision d'une très grande naïveté que le «modèle» (entre guillemets, à supposer qu'il y ait un seul modèle) ou, disons, que le libéralisme politique et économique occidental, avait vocation à s'appliquer partout. Et c'est cela qui

a été la base de l'interventionnisme occidental, par exemple en Ukraine ou, naturellement, au Moyen-Orient :

- Si on se trouve aujourd'hui dans la situation dans laquelle nous sommes en Ukraine, c'est en grande partie parce que les Etats-Unis et les Européens (ou une partie d'entre eux) ont voulu, à marche forcée, faire rentrer l'Ukraine dans les organisations occidentales et en particulier dans l'Union européenne (alors que l'Ukraine n'était absolument pas prête à cela) mais, pire encore, dans l'Alliance Atlantique, ce qui était inacceptable du point de vue de la Russie.
- Et maintenant, si vous prenez le Moyen-Orient⁵, qu'il me suffise de dire à ce stade, que ce soit la première intervention des Américains et leurs alliés en 1991 (qui est directement à l'origine d'Al Qaida, etc) ou la seconde en 2003, dans les deux cas, il y avait une idéologie sous-jacente à savoir que «le monde avait vocation à être homogène en tant qu'unité politique»⁶, l'idéologie de ce que Bush Junior appelait le Grand Moyen Orient. Dans tout ce type d'idéologie, et c'est la même encore une fois en ce qui concerne l'Ukraine, c'est toujours l'idée que le modèle que je vais appeler occidental (en fait il y a bien sûr plusieurs modèles occidentaux mais enfin, pour simplifier, on va dire le modèle occidental) peut immédiatement s'appliquer partout et même en Chine. Quand en 1989, il y a eu les incidents de la Place Tiananmen -Deng Xiaoping était au pouvoir- il y a eu cette idéologie occidentale avec cette naïveté d'ailleurs absolument incroyable que de croire que la Chine multimillénaire historiquement et culturellement allait brusquement embrasser la civilisation occidentale. Alors, quand je parle d'hétérogénéité, je veux dire par là la reconnaissance du fait que nous sommes très divers, que nous avons tous une histoire⁷. Si

5- Chacun a 2003 en tête mais je pense qu'il faut aussi parler de 1990, c'est-à-dire quand Saddam Hussein a envahi le Koweït. On pourra éventuellement y revenir.

6- Je rappelle une fois de plus les deux attributs de toute unité politique que sont la Culture et l'Organisation.

7- A mon avis, la prise de conscience croissante de ce phénomène d'hétérogénéité joue en faveur d'un pays comme le Maroc, et aujourd'hui, je n'en connais pas beaucoup, parmi les gens raisonnables, qui s'amuseraient à vouloir le déstabiliser.

l'on veut vivre dans ce que j'appelle un monde raisonnablement ouvert, il faut reconnaître et accepter cette multipolarité et voir que l'intérêt commun (il peut y avoir un intérêt commun entre des unités politiques extrêmement diverses), c'est justement de maintenir un certain degré d'ouverture avec les bénéfiques qui l'accompagnent, pas seulement sur le plan économique, mais également sur tous les autres plans (les échanges de toute nature, y compris culturels entre des pays, des États qui ont des cultures, des histoires différentes, peuvent entretenir des relations très bénéfiques si cela se passe de manière civilisée).

4) Enfin, la **complexité**. Je la prends en réalité dans son acception directement issue des mathématiques, parce que la notion de complexité vient au départ des travaux de **Henri Poincaré**, sur la stabilité du système solaire, au tout début du 20^{ème} siècle, puisque les équations de la mécanique appliquée au système solaire, le problème des trois corps⁸ (en supposant que ces trois corps soient isolés du reste de l'Univers), est évidemment hautement non-linéaire. Ce qui est important ici, c'est la notion de non-linéarité, la non-proportionnalité des causes et des effets. Il n'est pas besoin de pousser trop loin les études mathématiques pour comprendre que les effets cumulés de la non-proportionnalité peuvent conduire à des résultats étranges (je fais exprès

d'employer le mot étrange puisqu'on parle de bassin, d'attraction, d'étrangeté, etc.). Alors là, je fais un petit "flash-back" parce que si vous reprenez ces notions d'unités actives dont j'ai parlées, si vous reprenez la globalisation et le fait que cette globalisation a une racine technologique fondamentale et que la technologie, dans la phase historique actuelle, ne se calme jamais, c'est à-dire qu'on n'a même pas le temps d'absorber les effets d'une nouvelle révolution technologique que déjà une autre révolution apparaît⁹. Chaque jour, nous voyons de nouvelles inventions qui nous stupéfient et dont on est incapables d'entrevoir même les effets utiles. Mais le problème, c'est la manière dont toutes ces choses-là interagissent, et toutes ces choses-là interagissent d'une manière hautement non-linéaire, c'est-à-dire hautement non-proportionnelle. Ajoutez-y que les unités politiques elles-mêmes tendent à se fractionner (j'ai fait une allusion rapide au fait que les unités actives, en particulier politiques, pouvaient être plus ou moins solides, par exemple une organisation forte mais avec une culture faible, une Culture forte avec une Organisation faible). Dans le cas de l'Union européenne, vous avez Organisation faible et Culture faible, ce qui est évidemment le cas le plus défavorable. Toutes ces unités ont tendance aussi à se dissocier¹⁰ et donc le système international actuel devient effectivement complexe dans son sens le plus fondamental parce que même si je parle de pôles (etc)¹¹, on

8- Poincaré était le premier à remarquer, à identifier le phénomène du chaos. Ce que nous appelons aujourd'hui le chaos, et là je parle devant une autorité dans ce domaine, c'est que, alors même que les équations de la mécanique céleste, de la mécanique tout court, sont parfaitement dépourvues de toute incertitude si tant est qu'on soit capable de mesurer parfaitement les masses, le temps, les distances, etc.; et si même on était capable de calculer, sans aucune erreur sur les données, les trajectoires des trois corps issus de ces équations, il y aurait toujours une durée suffisamment longue au delà de laquelle on serait incapable de prévoir ce qui va se passer, la forme ultime des trajectoires. Ce phénomène du chaos a été popularisé dans les années soixante du siècle dernier par la météorologie : un dénommé Lorentz a le premier évoqué la fameuse notion d'effet papillon, c'est-à-dire l'idée que les battements d'une aile de papillon quelque part pouvaient avoir des conséquences incommensurables au bout d'un certain temps à l'autre bout du monde.

9- Aujourd'hui par exemple, le maître-mot c'est "Blockchain". Beaucoup de gens prédisent que la révolution des "Blockchain" aura des effets d'ampleur comparable, voire supérieure à celle de l'internet pris globalement.

10- Si on prend la seule Europe par exemple, après le Brexit, vous avez l'Ecosse qui envisage de relancer un référendum sur l'indépendance; et la question du sort de la Catalogne n'est absolument pas réglée. S'il y a effectivement relance de la possibilité de la dissociation de l'Ecosse du reste de la Grande-Bretagne, cela aura un effet évident sur la Catalogne (et *vice versa*) alors même que les deux situations sont très différentes.

11- On a vu que la liste des pôles ne pouvait pas être définie avec beaucoup de précision et que, par ailleurs, toutes les unités en interaction, qu'elles soient des pôles ou non, ont tendance à se fissurer, à se fractionner, à développer entre elles des liens mal identifiés, que ces liens sont de nature non-linéaire...

n'a pas besoin de pousser beaucoup plus loin l'analyse pour comprendre que nous évoluons vers un système dont le potentiel chaotique est extrêmement élevé. Et si vous regardez simplement les dix dernières années, nous avons eu au moins deux cas d'écoles, qui sont vraiment des exemples de base qu'on pourrait donner dans un cours :

- le premier, dans l'ordre économique, c'est la «**crise des subprime**» puisque, en 2007, cette crise dans un secteur très particulier de la finance, que seuls les gens les plus au fait de ces questions pouvaient identifier, a entraîné de fil en aiguille une situation où l'on a été au bord de retrouver le pire de ce que l'on avait connu dans l'entre deux guerres. Le fait qu'on se retrouve avec des gens faisant la queue devant les banques pour retirer leurs avoirs, c'était quelque chose que la quasi-totalité des économistes pensaient définitivement devenue impossible, grâce justement au savoir que l'on avait accumulé¹². Ça, c'est de la haute non-linéarité.
- le deuxième exemple, dans l'ordre politique celui-là, c'est évidemment le soi-disant «printemps arabe». Là, on est dans un exemple quasi-caricatural: vous avez un malheureux qui s'immole par le feu au centre de la Tunisie et l'un des régimes les plus autoritaires de la région s'écroule. Puis cela se propage : Mubarak tombe en Egypte, la Libye se met en mouvement, intervention plus ou moins malheureuse de l'extérieur, Kadhafi est empalé (puisque'il est mort comme ça) et puis,

finalement, la Syrie est dans la situation que vous connaissez. Là, on est vraiment dans un exemple extrême de cette notion de non-linéarité.

Je voudrais terminer avec quelques remarques sur cette notion de stabilité structurelle, instabilité structurelle, etc., Ce que je vous propose après, c'est qu'on reprenne peut-être plus concrètement ce qui vous intéresserait parce que c'est impossible même en prenant le double du temps que j'ai pris de couvrir l'ensemble du spectre et c'est pourquoi **étant ici dans une Académie des Sciences et Techniques, cela m'a paru assez pertinent d'insister davantage sur les aspects méthodologiques**. Et c'est donc encore sur des aspects méthodologiques que je voudrais conclure.

Qu'est-ce que la stabilité structurelle? Je prends le risque de le dire en quelques mots simples devant des personnes -et je suis sûr qu'il y en a dans cette salle- qui connaissent parfaitement le sujet et beaucoup mieux que moi. Prenez un système d'équations dynamique, non-linéaire. S'il est linéaire, le sujet est épuisé car on sait le résoudre parfaitement. Même en «Mathématiques Spéciales» aujourd'hui, les systèmes d'équations différentielles linéaires font partie des programmes. Alors prenons un système non-linéaire paramétré. Pour des valeurs données des paramètres, il y a une famille de trajectoires. La stabilité structurelle veut dire essentiellement que si vous modifiez un peu les paramètres, vous modifiez un peu la géométrie de la famille des trajectoires ou, plus précisément, la topologie de la famille des trajectoires. Mais, il

12- On a parlé d'économie. Je suis au départ un économiste mathématicien. Je suis même fondamentalement mathématicien dans l'âme, encore maintenant, et j'ai toujours eu cette passion. Mais l'économie a eu un moment de scientisme. A l'époque où je faisais ma thèse à Berkeley, j'ai eu la chance de rencontrer de grands économistes (comme Samuelson par exemple), qui étaient persuadés que les sciences économiques allaient évoluer comme la mécanique (qu'on appelait rationnelle à l'époque et qu'on appelle plutôt mécanique classique maintenant). C'était une erreur épistémologique majeure et je suis moi-même convaincu, soit-dit au passage, que le prix Nobel d'économie, qui a été créé au début des années 1970, ne le serait plus aujourd'hui sous cette forme. Si on a introduit un prix Nobel d'économie, c'est parce qu'il y avait une idéologie derrière, qui était que l'économie allait devenir une science comme les sciences dures. J'ai sérieusement étudié l'économétrie mais je n'y ai jamais cru. Il est clair que ça fait partie des outils statistiques. Mais l'idée que l'économétrie allait permettre justement de cerner de plus en plus parfaitement ou presque parfaitement la réalité économique était une erreur épistémologique profonde.

se trouve qu'il peut exister certaines valeurs des paramètres pour lesquels ce que je viens de dire est faux, c'est-à-dire que la moindre modification de ces paramètres, de certains d'entre eux, va transformer radicalement la géométrie et la topologie des trajectoires. Et c'est ce qu'on appelle généralement les catastrophes¹³ (le mot catastrophe d'ailleurs n'ayant pas forcément de connotation d'être bon ou mauvais).

Ma conclusion est qu'il faut d'abord reconnaître cette structure hautement instable du système international actuel et, en terme positif, je dirais qu'il n'y a pas de problème plus important pour

le monde, pris dans son ensemble (ou pour le système international pris dans son ensemble), que celui de réguler ce système. Et ça, c'est le problème qu'on appelle la gouvernance, qu'elle soit mondiale, régionale ou locale - parce que vous pouvez décliner aussi ce genre de notions à différentes échelles.

Je vais donc m'arrêter là et je serais très heureux de dialoguer avec vous sur les aspects de votre choix parce que les aspects se rapportant à ces questions, il y en a évidemment énormément.

Je vous remercie de votre attention.

13- Dans les sciences économiques ou politiques, on parle souvent depuis des années de la notion de choc : par exemple on peut réinterpréter les événements des «subprime» en terme de choc, on peut réinterpréter le «printemps arabe» en terme de choc, mais si vous prenez le Brexit par exemple, le fait que le Brexit l'ait emporté à epsilon près, cela aurait pu aller dans l'autre sens; si vous me demandez qui va être élu à la présidence de la République Française dans quelques semaines, eh! bien si c'est Monsieur Macron ou Monsieur Fillon, ça n'aura pas le même effet que si c'est Madame Le Pen, on est bien d'accord. Et si d'aventure Madame Le Pen était élue, ce serait un vrai choc parce que dans le monde entier on anticiperait la possibilité de la décomposition de l'Union Européenne. La décomposition de l'Union européenne et la décomposition de l'Euro, serait un événement avec des effets en cascade hautement non-linéaire dans le monde entier. Voilà donc un exemple d'ordre politique où vous modifiez un tout petit peu un paramètre (50% des votants plus ou moins une voix) et vous déclenchez des phénomènes comme ceux dont je viens de parler.



Focus

La macroéconomie est-elle une discipline empirique?

Rédouane TAOUIL

Université Grenoble, Alpes, France
Académie Hassan II des Sciences et Techniques



Il est de plus en plus fréquent de souligner que, grâce à l'extension de l'application des méthodes quantitatives, la science économique s'avère de même nature que la biologie, la médecine ou la physique. L'argument principal fourni à l'appui de cette assertion repose sur le constat du recul des publications à caractère théorique, tous champs disciplinaires confondus, au profit de celles qui se rattachent aux expériences naturelles, aux expérimentations aléatoires ou en laboratoire ou à l'analyse des données au moyen d'approches et techniques économétriques promues depuis les années quatre-vingt. Cette configuration, qui semble participer du choc de crédibilité cher à J. Angrist et J-S. Pischke (2010), et de son idéal d'une connaissance bâtie sur des comptes rendus d'observation, s'adosse à la conception selon laquelle l'empirie est le fondement ultime de la connaissance scientifique. «La théorie économique est quasiment morte» déclare T. Cowen (N. Smith, 2013).

La macroéconomie, qui est réputée posséder des assises empiriques eu égard à la place qu'y occupe l'économétrie depuis bientôt trois quarts de siècle, est tenue pour une illustration probante. A s'interroger sur le rôle qu'elle confère aux procédures et résultats empiriques, force est de constater qu'il n'est pas crucial. D'une part, les énoncés empiriques sont nécessairement occasionnels parce que tributaires des données et des dispositifs de leur traitement. D'autre

part, comme en témoigne le nouveau consensus macroéconomique, qui incarne la macroéconomie dominante aujourd'hui, le primat échoit à la théorie : outre que l'observation est marquée du sceau conceptuel, la méthode des modèles met en jeu des hypothèses et des règles d'inférence qui écarte l'adéquation empirique comme critère de validation des propositions théoriques.

A- Le statut de l'épreuve empirique

Les tenants du triomphe de la démarche empirique soutiennent que les données quantitatives parlent d'elles-mêmes. Après avoir connu un pic de 57,6% du total en 1987, les études théoriques baissent à 28% en 1993 et à 19,1% en 2011. Suite au foisonnement des bases de données et au développement des capacités de traitement, la part relative des études empiriques sur données propres est de l'ordre de 34% tandis que celles concernant les travaux sur données externes et les expérimentations sont respectivement de 29,9% et 8,8% (N. Smith 2013). Ces travaux empruntent deux formes censées caractériser le savoir scientifique : d'un côté, l'observation dont l'objet est l'exploration de données à l'aide de plusieurs instruments en vue de quantifier et de décrire formellement des mécanismes ou comportements, de l'autre, l'expérimentation qui consiste à procéder, par le recours à des protocoles, au contrôle de conditions d'interaction de phénomènes dans le but de dégager des causes ou des déterminants d'effets.

Evolution de la répartition des publications d'articles par catégorie

Année	Théorie	Théorie avec simulation	Etudes empiriques sur données externes	Etudes empiriques sur données internes	Etudes expérimentales
1963	50.7	1.5	39.1	8.7	0
1973	54.6	4.2	37.0	4.2	0
1983	57.6	4.0	35.2	2.4	0.8
1993	32.4	7.3	47.8	8.8	3.7
2003	28.9	11.1	38.5	17.8	3.7
2011	19.1	8.8	29.9	34.0	8.2

Source : Smith Noah (2013)

La consécration de cette démarche comme garant de scientificité repose sur deux considérations placées au rang de préceptes : outre que la connaissance économique doit s'arc-bouter à des propositions d'analyse en termes de concepts qui tirent leur signification de l'observation ou de l'expérimentation, la pierre de touche tient à la validation, pour l'acceptation ou le refus des énoncés, à ces moments de l'empirie.

A examiner cette thèse, qui tire son aura de ses intentions d'une analyse rigoureuse des «faits», à l'aune du nouveau consensus macroéconomique, elle apparaît sujette à discussion. Le contrôle empirique ne semble pas apte à mesurer la valeur de la structure analytique ou de ses implications normatives. Pareille inadéquation tient autant aux caractéristiques des tests empiriques qu'à leurs liens avec les prédictions déduites de la théorie. La confrontation des propositions d'analyse aux observations débouche sur des énoncés qui sont, par construction, nécessairement occasionnels. Leur valeur est tributaire du choix de variables, du protocole d'observation comme de la charge théorique des instruments de mesure¹. De ce fait, ils ne peuvent prétendre au statut d'énoncés catégoriques susceptibles de prendre en défaut un modèle ou de participer à la formulation de propositions d'analyse stables. Cette

caractéristique, due à la variété des démarches, n'est guère surprenante. Comme l'affirme A. Pulido : «L'économie est condamnée par sa propre nature à ne pas donner des réponses uniques. En général, n'importe quelle question peut être abordée sous des angles et dans des cadres différents appliqués à des données non moins différentes» (2002, p. 29).

Il s'ensuit une préséance de la théorie sur l'empirie (B. Walliser, 2011). Les concepts théoriques sont irréductibles aux objets empiriques qui sont à l'origine de leur formation. La règle de Taylor est exemplaire à cet égard. Conçue par l'auteur éponyme comme une catégorie descriptive du comportement de la Réserve Fédérale américaine au cours de la période 1987-1992 (J. Taylor 1993), cette règle relie le taux d'intérêt directeur aux déviations d'inflation et d'activité :

$$i = i^* + \pi + a(y - y^*) + b(\pi - \pi^*)$$

i^* est le taux d'intérêt naturel, y le PIB effectif, y^* le PIB potentiel, π l'inflation courante, π^* l'inflation cible, a et b les poids associés aux écarts.

Cette règle², qui a fait l'objet de nombreux tests, n'a pas reçu de confirmation concluante. Des études de la Réserve Fédérale montrent que les coefficients des fonctions de réactions manifestent une variabilité en fonction de l'état de la conjoncture

1- La dépendance de la signification des résultats vis-à-vis des données comporte, selon J-M. Dufour, deux faiblesses : «premièrement, les modèles qui sont trop "proches" des données ont tendance à être compliqués et difficiles à généraliser; deuxièmement, une hypothèse trop "générale" peut devenir effectivement vide (non testable), sans que l'on s'en rende compte», (2000, p. 9).

2- Taylor attribue à son équation une validité générale : «les simulations du modèle mettent en évidence que de simples règles de politique monétaire fonctionnent très bien dans une variété de situations [...]. En outre, les principaux résultats obtenus concernant ces règles proposées pour les Etats-Unis semblent pouvoir s'appliquer à plusieurs pays» (J. Taylor 1997, p.657).

exprimant ainsi des déviations vis-à-vis des résultats de Taylor (P. Rabanal 2004; R. Clarida, J. Gali et M. Gertler 1998). Le comportement de la banque centrale américaine est asymétrique : la priorité est accordée au contrôle de l'inflation en période d'expansion et à l'activité lors des récessions au prix d'écarts à l'objectif d'inflation. Malgré des conclusions contrastées quant à sa portée empirique, cette règle est devenue une catégorie de la théorie de la politique monétaire qui se déduit à partir du programme de la Banque centrale sous les contraintes de la relation de Phillips et de la demande globale, elles-mêmes définies dans une optique théorique et de la demande agrégée. Sous ce rapport, elle est indéfectiblement liée à la discipline d'équilibre.

Cette surdétermination par la théorie est visible également dans la primauté accordée à la critique de Lucas qui s'est imposée à la démarche modélisatrice alors qu'elle ne possède pas de titres de validation empirique comme l'attestent des études qui réaffirment la pertinence de l'économétrie structurelle³. D'une part, l'estimation des coefficients de comportement peut incorporer les réactions des agents face à un changement de décisions publiques et servir ainsi à des prévisions. D'autre part, les paramètres ne subissent pas à court terme des variations d'ampleur significative (N. Ericsson et J. Irons, 1995). Toujours est-il que les modèles d'équilibre général dynamique se sont évertués à relever le défi lucasien en optant pour l'impératif de micro-fondements et, partant, pour la construction de modèles centrés sur l'interdépendance entre les décisions individuelles et les variables de politique économique. Ainsi que le constate L. Summers⁴: «les résultats économétriques sont rarement un ingrédient important dans la création théorique» (1991, p. 129).

L'épreuve économétrique n'apparaît pas appropriée à l'examen de la valeur d'une théorie. Comme en témoigne le régime de fonctionnement de la macroéconomie, le défaut de concordance entre les conséquences d'une théorie et les énoncés observationnels est loin de constituer une preuve contraignante. Ainsi, l'hypothèse d'anticipations rationnelles a un statut prépondérant aujourd'hui alors qu'elle a fait l'objet de tests directs portant sur les propriétés de cohérence, d'orthogonalité et d'absence de biais qui ont plaidé en sa défaveur (M. Lovell 1986 ; M. Keane et D. Runkle, 1990). Ces infirmations, qui ont mis en évidence les écarts entre les comportements des agents privés et la formation rationnelle des anticipations, n'ont cependant pas disqualifié le recours à cette hypothèse. Bien plus, elle s'est profondément ancrée au détriment de l'hypothèse des anticipations adaptatives qui, elle, bénéficie de tests qui confirment que les agents sous-estiment systématiquement l'inflation à *fortiori* lors de retournements conjoncturels.

De telles limites de la testabilité tiennent à l'ambiguïté du contrôle empirique. Comme le stipule le problème de Duhem-Quine, que J-M. Dufour (2000) tient pour omniprésent en économétrie, l'évaluation d'une théorie s'exerce sur un système de propositions insécable. Une proposition n'est pas soumise individuellement à l'épreuve en ce que le test s'applique nécessairement à toute la structure théorique autant qu'aux conditions auxiliaires de la formulation empirique. La conjonction entre, d'un côté, les hypothèses afférentes au protocole d'estimation et, de l'autre, les propositions déduites par voie logique impose de prendre la théorie soumise à examen comme un ensemble solidaire. Ainsi, l'évaluation de la stratégie du ciblage concerne à la fois la rationalité des anticipations des agents,

3- S. Fischer note à ce sujet «l'argument selon lequel les anticipations rationnelles ont signalé la fatale ambiguïté des modèles macro-économétriques keynésiens n'a jamais reçu une formulation adéquate (1996, p. 25). Dans le même ordre d'idées, E. Malinvaud soutient qu'en effet les petits modèles illustratifs présentés par Lucas et d'autres ne démontraient, pas plus qu'une possibilité qu'ils n'étaient en rien testés dans leur validité empirique. Malgré sa prétention à établir une telle validité, l'école dite des cycles réels ne changera pas fondamentalement la situation en raison de la légèreté méthodologique qu'elle appliquait à la validation empirique (notamment en évitant avec soin tout ce qui pourrait falsifier leurs modèles présentés» (1997), p.21.

4- La thèse maîtresse de Summers (1991) est que les tests statistiques formels développés dans les années 1980 ne conditionnent pas, malgré leurs aspects sophistiqués, la formulation des énoncés théoriques. Cette sentence n'a pas perdu de sa pertinence. L'ancrage au sein de la macroéconomie du principe d'invariance ou de neutralité de la monnaie à long terme, du théorème de l'équivalence ricardienne ou de l'impératif de crédibilité de la politique monétaire ne doit pas grand-chose à de succès économétriques. Ces analyses sont précisément issues de modèles théoriques qui reposent sur «la création de systèmes artificiels totalement organisés» (Lucas, 1980).

le mode de fonctionnement des marchés le comportement des autorités monétaires autant que les aménagements consécutifs à la quantification et la description des mécanismes en jeu. Il n'est dès lors pas possible d'identifier les énoncés et les hypothèses auxiliaires à incriminer ou à les considérer comme décisifs. Les résultats établis ne sauraient être tenus pour concluants quant à la portée de la mise à l'épreuve⁵. Pour autant, la testabilité empirique s'avère seconde au regard de l'examen de la cohérence interne qui implique qu'une proposition doit être évaluée compte tenu de sa position dans la stratégie modélisatrice. De ce fait, sa valeur est tout entière suspendue aux règles de compatibilité mutuelle auxquelles elle doit obéir au sein de la structure théorique d'ensemble.

Quelle que soit la qualité de la charge de la preuve et des données fournies par le test d'une analyse, celle-ci ne peut être déclarée validée ou infirmée. Ainsi que le souligne C. Wilber (1979), le contrôle empirique ne peut jouer un rôle d'arbitre et départager des énoncés en compétition. Il n'existe pas un critère pour trancher étant donné les difficultés et la variété de traduction des variables clés dans les catégories économétriques. D'abord, les propriétés conférées aux variables susceptibles de participer aux tests sont souvent établies par des réaménagements du cadre théorique. Ensuite, il y a nécessairement asymétrie entre les grandeurs observées et celles sans contrepartie empirique. Enfin, la confrontation entre le modèle et les données revient à la mise en rapport entre des concepts et des observations qui ne sont pas imprégnés par les mêmes énoncés théoriques.

B-Méthode des modèles et primat de la théorie

De par sa propre méthode, le nouveau consensus macroéconomique implique la surdétermination par la théorie (M. Woodford, 2012). Selon cette méthode, qui porte l'empreinte de l'œuvre de Lucas (1987), un modèle constitue un instrument de prédiction dont les hypothèses ne doivent en aucun cas posséder un contenu empirique. Cette récusation du principe de réalisme des hypothèses implique que des hypothèses riches, d'un point de vue descriptif, sont inadéquates parce qu'elles enfreignent la règle de parcimonie en vertu duquel une théorie doit être formulée suivant le critère de la simplicité. En ce sens, les hypothèses les mieux appropriées à la construction théorique sont celles qui sont nécessairement fausses sur le plan descriptif (R. Townsend, 1988). Il s'ensuit que les énoncés théoriques sont bâtis au moyen d'hypothèses qui ne doivent rien au comportement réel des économies. A preuve le cas exemplaire de la rationalité optimisatrice, pierre angulaire de la discipline de l'équilibre, qui est tenue pour irréfutable tant elle ne saurait être mise en doute par des procédures économétriques ou encore par des preuves issues d'enquêtes sur les principes de décision des agents. À cet égard, les normes d'analyse qui considèrent que le principe de maximisation de fonction-objectifs doit être appliqué comme si les agents s'y conforment dans leur processus décisionnel⁶. Le principe de "comme si" s'impose du fait de sa vocation heuristique qui consiste à délimiter un corps d'hypothèses et en explorer les conséquences. Dotée de cette vocation,

5- Lors de la controverse sur les anticipations rationnelles, les nouveaux classiques (R. Lucas 1986; E. Prescott 1977; T. Sargent, 1982) n'ont pas manqué de considérer, en réponse aux tests des hypothèses, que c'est en bloc qu'une théorie est confrontée aux énoncés observationnels faisant ainsi leur le holisme de Duhem et Quine.

6- Le débat sur la macroéconomie à l'occasion de la crise financière ouverte en 2008 s'est accompagné d'un questionnement sur la stratégie modélisatrice à l'œuvre dans le nouveau consensus macroéconomique. Sont significatifs à cet égard les échanges entre J. Kay (2012) qui attache une grande importance au réalisme descriptif et M. Woodford (2012) dont la préférence va à la conception des modèles comme construction artificielle. Pour J. Kay, cette conception est frappée de deux vices qui attestent que la *carte* qu'elle établit ne correspond pas à la réalité du *territoire* de l'économie. D'une part, elle s'appuie sur une gamme d'hypothèses irréelles qui n'ont pas de pouvoir descriptif. En second lieu, elle contient des prédictions qui sont désavouées par les turbulences financières et les dysfonctionnements réels. Cette critique d'irréalisme, souvent opposée à la conception des modèles comme constructions artificielles, apparaît irrecevable aux yeux de Woodford en ce qu'elle fait fi des caractéristiques de la démarche formelle qui tiennent à la congruence entre les énoncés au sein de la chaîne démonstrative, l'inférence des conclusions par voie déductive et la possibilité de questionnement des théories selon les critères de la rigueur logique dont les exigences sont autrement plus fortes que celles des tests empiriques.

l'hypothèse d'anticipations rationnelles, dont la place est insigne dans l'exploration de la dimension prospective des choix individuels, implique que les agents se comportent comme s'ils possèdent une connaissance du système économique identique à celle du modélisateur. Le recours à ces fictions (A. Barberousse et P. Ludwig 2000), découle de leur capacité à expliquer le comportement du cycle, les chocs et leur propagation, les réactions individuelles des agents et les retombées des politiques économiques dans une perspective dynamique. Dans ce contexte, le modèle théorique est un système organique constitué d'énoncés analytiques bâtis sur un langage qui ne repose pas sur des observations, mais sur des entités conceptuelles qui se rapportent les unes aux autres de sorte que la signification de chaque terme est fixée par ses relations aux autres. Le modèle canonique du nouveau consensus macroéconomique témoigne avec éloquence de ces propriétés (M. Woodford, 2003). Sous sa forme réduite, ce modèle DSGE (*Dynamic Stochastic General Equilibrium*) met l'accent sur la dimension inter-temporelle des comportements des agents et la composante stochastique des formes structurelles, en reformulant les fonctions de demande agrégée et d'offre agrégée. Il repose sur une équation de demande globale fondée sur l'optimisation dynamique de la consommation des ménages, une relation de Phillips dérivée à partir du comportement de prix des firmes en concurrence monopolistique, et sur une règle de taux d'intérêt de la Banque centrale.

La demande agrégée s'écrit :

$$y_t = \alpha E_t y_{t+1} + (1 - \alpha) y_{t-1} - \delta (i_t - E_t \pi_{t+1}) + \varepsilon_t^d$$

y_t , $E_t y_{t+1}$ et y_{t-1} sont respectivement les écarts de production présent, futur et antérieur, i le taux d'intérêt nominal à court terme, $E_t \pi_{t+1}$ l'inflation anticipée en t pour la période $t+1$, α mesure le degré de persistance et δ l'influence du taux d'intérêt réel sur le produit présent, ε_t^d est un choc aléatoire de moyenne nulle et de variance constante, et E_t l'opérateur des anticipations que font les agents conditionnellement à l'information disponible.

Ainsi définie, la demande agrégée est une fonction décroissante du taux d'intérêt réel et croissante de la production future. La sensibilité au taux d'intérêt et à la production anticipée, déduite à partir du programme de choix dynamique

d'un ménage représentatif, implique d'une part, qu'une hausse des revenus futurs se traduit par une consommation présente plus importante, et d'autre part, que la substitution intertemporelle des consommations est opérée en fonction du coût d'opportunité.

La fonction d'offre agrégée est donnée par :

$$\pi_t = \beta E_t \pi_{t+1} + (1 - \beta) \pi_{t-1} + \gamma y_t + \varepsilon_t^s$$

π_t est l'inflation à la période t , $E_t \pi_{t+1}$ l'anticipation de l'inflation future, π_{t-1} est l'inflation antérieure et ε_t^s un choc sur les coûts de production qui a les mêmes propriétés que la perturbation de demande, β reflète le degré d'inertie de l'inflation et γ la sensibilité de l'inflation à l'activité.

Une telle fonction est une reformulation de la courbe de Phillips. Elle fait dépendre le taux d'inflation de l'écart de production et des anticipations d'inflation rationnellement formées par une firme représentative. Celle-ci fixe son prix de vente en appliquant un rapport de marge aux salaires qu'elle ne révisé pas en cas de variations limitées de la demande. La conséquence d'un tel comportement est que les ajustements de prix dépendent de l'inflation passée et de l'inflation anticipée.

La Banque centrale détermine la politique monétaire optimale en minimisant sa fonction de perte de bien-être social par rapport au taux d'intérêt nominal sous les contraintes de la demande et de l'offre agrégées. Cette fonction s'écrit :

$$L_t = (\pi_t - \pi^*)^2 + \rho (y_t - y^*)^2$$

$(\pi_t - \pi^*)$ est l'écart de l'inflation à sa cible et $(y_t - y^*)$ l'écart de l'activité à son niveau désiré et ρ le poids accordé par la Banque centrale à l'emploi.

La condition d'optimalité donne la règle du taux d'intérêt, soit :

$$i_t = \rho i_{t-1} + (1 - \rho) (r_\pi E_t \pi_{t+1} + r_y y_t) + \varepsilon_t^{pm}$$

ρ est la pondération de l'influence du taux d'intérêt antérieur, r_π et r_y des paramètres positifs dépendants des paramètres associés à l'inflation et à la production. La fonction de réaction des autorités monétaires dépend ainsi du comportement passé des autorités monétaires, des anticipations d'inflation et de l'écart de production.

Les trois équations constitutives de ce modèle, qui sert primordialement de guide dans la

formulation d'énoncés et d'explications et, par conséquent, dans la dynamique des connaissances macroéconomiques, ne sont pas dérivées d'un exercice d'observation. La nature de leurs termes théoriques dépend de leur traduction formelle dans un réseau de propositions à l'aide de fictions. L'instauration de leur bien-fondé ne résulte pas, non plus, de l'aval du contrôle empirique. Ainsi que le soutient L. Laudan dans son analyse des traditions de recherche «la plupart des problèmes conceptuels sont plus lourds de conséquences que les anomalies empiriques» (1987, p. 80). Cette thèse possède un relief insigne dans le savoir macroéconomique comme en témoigne l'évolution interne des modèles théoriques. L'épreuve économétrique ne comporte pas de menace sérieuse de remise en cause pas plus qu'elle n'entraîne des changements dans la structure de ces modèles lorsqu'elle porte à leur actif des tests positifs⁷. En revanche, si l'on mesure l'efficacité d'une approche par son heuristique, le traitement conceptuel par l'intermédiaire de l'extension de la précision, de l'envergure et de la rigueur apparaît prégnant précisément dans la configuration du nouveau consensus macroéconomique à partir de l'élargissement du champ de validité de la méthode de l'équilibre général dynamique (R. Taouil, 2011). Dans ce cadre l'arbitrage entre constructions ne recourt pas à la comparaison de contenus empiriques. La faveur dont jouit une théorie semble découler d'un "trade off" qui repose, à l'image de la courbe de Phillips, sur une relation inverse entre la capacité explicative et la portée observationnelle. Ce principe, pointé par N. Cartwright (1981), souligne qu'il existe en macroéconomie un *hiatus* entre celle-là et celle-ci. Une théorie a pour visée de formuler des lois générales qui n'offrent cependant pas des descriptions adéquates ainsi que l'attestent les hypothèses de rationalité de l'agent, de concurrence parfaite ou de complétude des marchés du modèle d'équilibre général "d'Arrow-Debreu" qui est le noyau dur de la macroéconomie dominante aujourd'hui. L'analyse empirique, elle, consiste à repérer des phénomènes par le

truchement de procédures d'inférence statistique. La validité des énoncés est nécessairement contextuelle : elle dépend des relations établies par les modèles d'estimation. L'arbitrage dans ce contexte se fait au profit de la théorie. La consécration de l'impératif catégorique de micro-fondements issu de la critique de Lucas est à cet égard exemplaire.

En somme, l'épreuve empirique ne joue pas un rôle primordial dans la validation des hypothèses ou des prédictions, ni dans la reconfiguration de la structure conceptuelle des modèles théoriques. L'unification de la macroéconomie, qu'incarne le nouveau consensus, s'est opérée grâce à une grille d'analyse dont les composantes essentielles, l'appréhension de l'équilibre général dans une optique dynamique, les mécanismes de formation des anticipations et l'intégration des perturbations exogènes ne doivent rien à la macro-économétrie, laquelle reste, au demeurant, traversée de divergences autour des méthodes des séries temporelles multivariées, des modèles de cointégration, du calibrage ou de l'estimation bayésienne. Le foisonnement des travaux en la matière n'est pas significatif d'une prédominance analytique de l'approche empirique : outre que les résultats observationnels ne participent pas à l'extension de l'envergure des modèles théoriques, ils reposent, quand ils s'adosent étroitement à ces derniers, sur une estimation des relations structurelles déduites des règles de décision optimales des agents.

Références bibliographiques

- Angrist D. et J-S. Pischke (2010). "The Credibility Revolution in Empirical Economics: How Better Research Design Is Taking the Con out of Econometrics", *The Journal of Economic Perspectives*, 2010, vol. 24, n° 2, pp. 3-30.
- Barberousse A. et Ludwig P. (2000), "Les modèles comme fictions", *Philosophie*, n° 68, décembre, pp.16-43.
- Bridel P. (2005), "Cumulativité des connaissances et science économique, que cherche-t-on

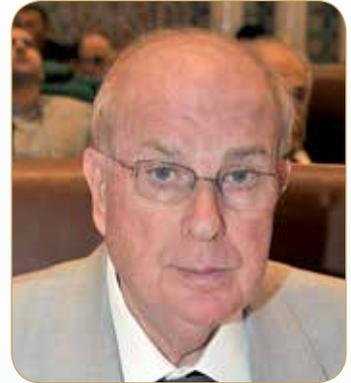
7- Parlant à sujet de divorce interne entre théorie et économétrie, P. Bridel (2005) distingue entre le progrès théorique qui tient à la clarification conceptuelle, aux innovations analytiques autant qu'au renforcement des vertus heuristiques, et le progrès empirique consécutif à l'amélioration du traitement des données et de la capacité observationnelle. Dans cette dynamique, «le conjoint théorique» a souligné-t-il- la part belle.

- exactement à cumuler?”, *Revue Française de sciences sociales*, XLIII, n°131, pp. 63-79.
- Cartelier J. (2017), “L’état de la science économique : vers une disparition de la théorie économique”, *La science dans tous ses états*, Académie Hassan II des sciences et techniques.
 - Cartwright N. (1983), *How the Laws of Physics Lie*, Oxford, The Clarendon Press.
 - Clarida E., Jordi G. et Gertler G. (1999), “The Science of Monetary Policy: A New Keynesian Perspective”, *Journal of Economic Literature*, vol. 37, n° 4, December, pp. 1661–1707.
 - Dufour J-M. (2000), “Econométrie, théorie des tests et philosophie des sciences”, *Cahier Recherche*, n°14, Université Montréal.
 - Duhem P. [1906], *La théorie physique, son objet et sa structure*, Paris, Vrin, 1981.
 - Ericsson, N. et Irons J. (1995) «The Lucas critique in practice: Theory without measurement” in *Macroeconometrics : Developments, Tensions, and Prospects*, K. D. Hoover (ed.), Boston, Kluwer Academic Press.
 - Fischer S. (1996), “Robert Lucas’s Nobel Memorial Prize”, *Scandinavian Journal of Economics*, vol. 98, issue 1, pp. 11-31.
 - Iliopoulos E. et Sopraseuth T. (2012), L’intermédiation financière dans l’analyse macroéconomique : le défi de la crise”, *Economie et statistique*, n°452-453-455, pp. 91-130.
 - Kay, J. “The map is not the territory: An essay on the state of economics” (2012), Institute for New Economic Thinking Paper.
 - Keane M. P. et Runkle D. E. (1990) “Testing the rationality of price forecasts : from panel data”, *American Economic Review*, vol. 80, pp.714-735.
 - Lovell M. C. (1986), “Tests of rational expectations hypothesis”, *American Economic Review*, vol. 76, pp. 10-124.
 - Lucas R.E. (1976), “Econometric Policy Evaluation : A Critique”, in *The Phillips Curve and Labor Markets*, K. Brunner et A.H. Meltzer (eds), North-Holland, Amsterdam.
 - Lucas, R. E. Jr. (1987a), *Models of Business Cycles*. New York Basil Blackwell.
 - Lucas, R. E. Jr. (1987b), “Adaptive behavior and economic theory”, in R. M. Hogarth et M.W. Reder (eds), *Rational choice, The contrast between Economics and Psychology*, Chicago/ London, University of Chicago Press.
 - Lucas R.E. (1980), “Methods and Problems in Business Cycle Theory”, *Journal of Money, Credit and Banking*, vol. 12, novembre, pp. 217-238.
 - Malinvaud E. (1997), “L’économétrie dans l’élaboration théorique et l’étude des politiques”, *L’actualité économique*, volume 73, n° 1-2-3, mars-juin-septembre 1997, pp. 11-25.
 - Pulido A. (2002), “Posibilidades y limitaciones de las Matemáticas en la Economía”, *Cuadernos de fondo de investigacion de Richard Stone*, n°1.
 - Rabanal P. (2004), “Monetary Policy Rules and US Business Cycle: Evidence and implications” *IMF, working Paper*, n°64.
 - Quine W. (1960), *Le mot et la chose*, Paris, Champs, Flammarion, 1977.
 - Smith N. (2013), “The death of theory”, <http://noahpinionblog.blogspot.com/2013/08/the-death-of-theory.html>.
 - Summers L. (1991), “The Scientific Illusion in Empirical Macro-economics”, *Scandinavian Journal of Economics*, vol. 93, n° 2, pp. 129-148.
 - Taouil R. (2011), “La nouvelle synthèse et la théorie des cycles réels”, *Economie appliquée*, vol. 64, n°1, janvier-mars, pp.75-102.
 - Taylor J. (1999a), “The Robustness and Efficiency of Monetary Policy Rules as Guidelines for Interest Rate Setting by the European Central Bank”, *Journal of Monetary Economics*, vol. 43, n°3, pp. 655-579.
 - Taylor J. (ed.), (1999b), *Monetary Policy Rules*, Chicago : The University of Chicago Press.
 - Townsend R.M. (1988), “Models as Economies” *The Economic Journal*, vol. 98, n° 390, Conference Papers, pp. 1-24
 - Walliser B. (2011), *Comment raisonnent les économistes? Les fonctions des modèles*, Odile Jacob, Economie, Paris.
 - Wilber C. (1979), “Empirical Verification and Theory Selection: the Keynesian- Monetarist Debate”, *Journal of Economic Issues*, vol. 13, n°4, pp. 973-982.
 - Willard L. (2006), “Does Inflation Targeting Matter, A Reassessment” *CEPS*, working paper n°120, Princeton University, February.
 - Woodford M. (2012), “What’s wrong with economic models?”, Columbia University, mimeo.
 - Woodford M. (2003), *Interest and Prices : Foundations of a theory of Monetary Policy*, Princeton University Press, Princeton.
- + Cet article a bénéficié de discussions avec Abdessalam Houmada et Mohamed Soual. Qu’ils soient ici vivement remerciés sans que leur responsabilité soit engagée.



Nouvelles des académiciens

Albert SASSON décoré des insignes du Grand Officier de l'Ordre du Wissam AL ARCH



L'ambassadeur du Maroc en France, Chakib BENMOUSSA, a remis, courant mars 2017 à Paris, une décoration décernée par S.M. le Roi Mohammed VI à M. Albert SASSON, membre fondateur de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, également membre du Conseil économique, social et environnemental. S'exprimant à cette occasion, M. BENMOUSSA a indiqué que, créé en 1955 par feu SM Mohammed V pour récompenser les personnes qui se sont particulièrement distinguées par leur mérite ou leurs services civils ou militaires, cet ordre décerné est parmi les plus prestigieux du Royaume, notant que la cérémonie est l'occasion de célébrer une personnalité marocaine ayant consacré plus de soixante ans de sa vie à défendre les valeurs de tolérance et de vivre ensemble que prône le Royaume, ainsi que sa contribution à l'édification d'un Maroc moderne, démocratique, prospère et solidaire.

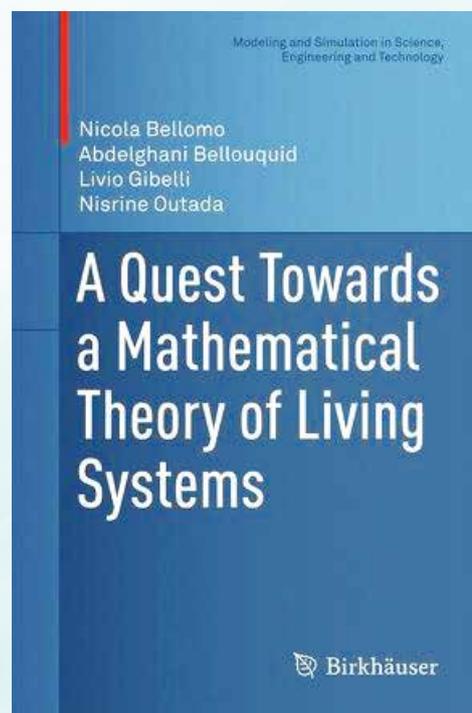


Le Pr. Albert SASSON et Son excellence l'ambassadeur du Royaume du Maroc en France lors de la cérémonie organisée à l'occasion.

**Parution d'un ouvrage collectif en modélisation
mathématique avec la contribution
de feu Abdelghani BELLOUQUID**



«A Quest Towards a Mathematical Theory of Living Systems» est un ouvrage écrit par les meilleurs chercheurs en modélisation mathématique au cours des 20 dernières années parmi lesquels feu Abdelghani BELLOUQUID, qui fut membre du Collège des Sciences de la Modélisation et de l'Information depuis 2003.



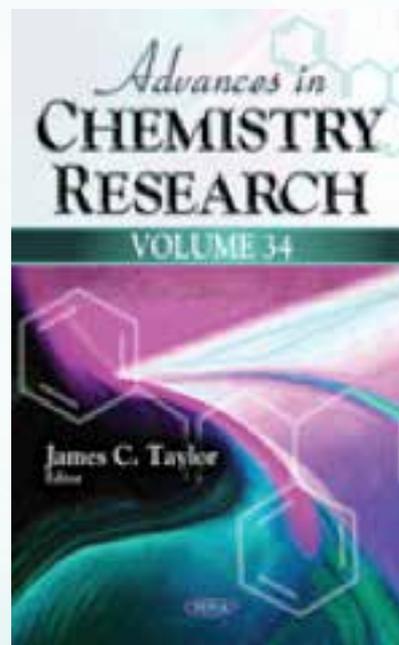
**Contributions du Pr. El Mokhtar ESSASSI
aux ouvrages "Advances in Chemistry Research"
et "Molecular Technologies for Detection
of Chemical and Biological Agents"**



Advances in Chemistry Research. Volume 34

Editor: James C. Taylor ; ISBN: 978-1-53610-482-0

The authors' of this latest volume discuss recent advances in chemistry research. Chapter One studies theoretical optimization of the catalytic reaction of alcohols with dimethylcarbonate. Chapter Two provides a review of linalool, a key contributor to the aroma nuances in hoppy beers, cocoa liquors, wines and fermented tea beverages. Chapter Three provides a discussion of neurological studies on linalool and other fragrant compounds. Chapter Four focuses on the phytochemistry and biological activities of iridoids. Chapter Five presents the fragmentation pathways of different anthraquinone-based colorants utilised for structural determination of unknown red colorants obtained from various sources and analysed using HPLC-UV-VIS ESI MS/MS system. Chapter Six researches the process of synthesis, catalysis and mimetic properties obtained with the use of phthalocyanine, porphyrin and cyclodextrin complexes in the development of electrochemical sensors. Chapter Seven investigates first order chemical kinetics mechanisms and obtains general conclusions about the qualitative behavior of the concentrations curves. Chapter Eight discusses the effect of co-anions on perchlorate degradation using zero-valent titanium (ZVT) anode. Chapter Nine studies the use of poly(ethylene glycol)-supported ruthenium(II) polypyridyl complex as a novel and recyclable visible light photocatalyst for organic synthesis. Chapter Ten discusses the synthesis of radically deoxygenated sugars. (Imprint: Nova)



Chapter 10

" Synthesis of Radically Deoxygenated Sugars ", Y. Kandri Rodi, K. Misbahi, S. Sabir and E. M. Essassi,

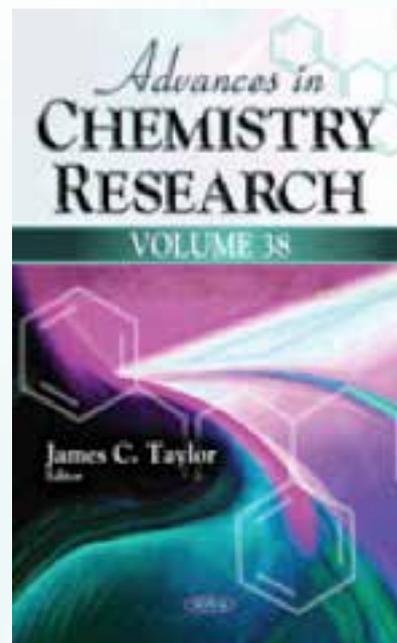
Abstract

Deoxy sugars are commonly found in many biologically active natural products. They are the main constituents of glycosidic chain of various antibiotics and cardiac glycosides. The generally adapted strategy for the synthesis of these compounds consists of using the protection-deprotection methodology starting from various substrates such as glycals, epoxides and tosylate derivatives, or from unprotected sugars. The most of these syntheses requires preparation at first of the corresponding thionocarbonates, these reactions in combination with radical reduction lead to deoxy sugars, providing useful intermediates for the synthesis of natural products from easily carbohydrates.

Advances in Chemistry Research. Volume 38

Editor: James C. Taylor, ISBN: 978-1-53612-130-8

Chapter One is focused onto particular groups of hazardous materials (pesticides and dyes) and systematization of degradation methods according to specified pollutant. The authors investigated the materials with the best performance taking into account catalytic activity, stability and ease of preparation toward the electrochemical behavior of the dyes and pesticides as well as their degradation choosing the proper electrochemical method and conditions. Chapter Two covers a bio-supported, inexpensive and easily available cellulose sulfuric acid that has been used as a catalyst to promote sequential two-step one-pot reactions to synthesize more than twenty derivatives of nitrocoumarins (n-nitro-2H-1-benzopyran-2-one). Chapter Three summarizes the recent developments in synthetic methodologies for the construction of 1,4-benzothiazine derivatives. Mechanistic investigations, reactivities, applications, product manipulations and biological potential are also discussed. In Chapter Four, the authors present the different approaches for studying cellular adhesion and subsequent migration using a toolbox of linear and star-shaped PEG-based materials. Chapter Five compiles and presents the summaries of visible light mediated synthesis and functionalization of pyrrole and its derivatives. Several review articles and book chapters present the conventional procedures for synthesis of pyrrole and its derivatives, but the visible light mediated synthesis of these components have not yet been archived. Clathrate hydrates (CHs) are inclusion compounds in which tetrahedrally-bonded H₂O molecules form a generally disordered but solid-state host-lattice composed of a periodic array of cages. Chapter Six addresses the catalytic formation kinetics of CHs with H-bonding non-classical guests as studied by infrared spectroscopy. Chapter Seven summarizes data as well as ab-initio- band-structure calculations in order to provide guidelines for further development in the field of Clathrate type I crystals. To conclude the book, Chapter Eight covers the current research status on the potential toxicological effects of Aloe vera. (Imprint: Nova)



Chapter Five compiles and presents the summaries of visible light mediated synthesis and functionalization of pyrrole and its derivatives. Several review articles and book chapters present the conventional procedures for synthesis of pyrrole and its derivatives, but the visible light mediated synthesis of these components have not yet been archived. Clathrate hydrates (CHs) are inclusion compounds in which tetrahedrally-bonded H₂O molecules form a generally disordered but solid-state host-lattice composed of a periodic array of cages. Chapter Six addresses the catalytic formation kinetics of CHs with H-bonding non-classical guests as studied by infrared spectroscopy. Chapter Seven summarizes data as well as ab-initio- band-structure calculations in order to provide guidelines for further development in the field of Clathrate type I crystals. To conclude the book, Chapter Eight covers the current research status on the potential toxicological effects of Aloe vera. (Imprint: Nova)

Chapter 3. "A Review on Synthesis, Reactivity, and Diverse Biological Properties of 1,4-Benzothiazine Derivatives ", Nada Kheira Sebbar, Zerzouf Abdelfettah, Mohamed Ellouz and El Mokhtar Essassi

Abstract

The presence of 1,4-benzothiazine as an essential structural motif in variety of biologically active substances has stimulated the development of new strategies and technologies for their synthesis.

1,4-Benzothiazine derivatives constitute a privileged class of compounds with their diverse spectrum of therapeutic potential.

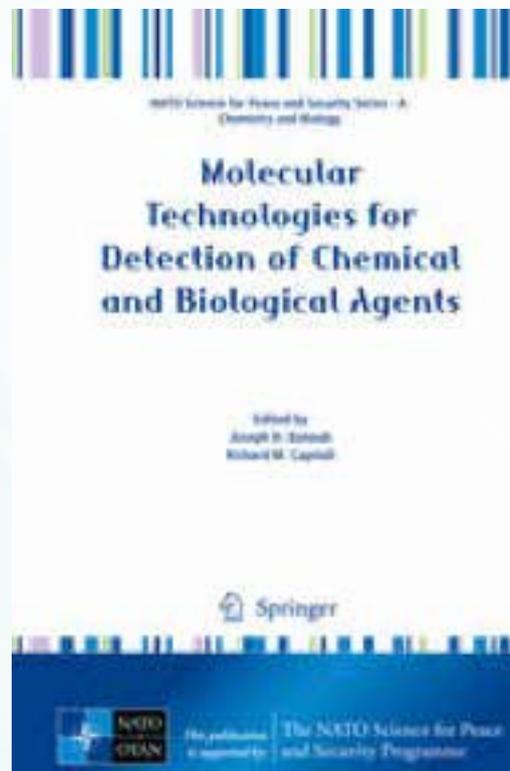
The current chapter summarizes the recent developments in synthetic methodologies for the construction of 1,4-benzothiazine derivatives. Mechanistic investigations, reactivity, applications, product manipulations and biological potential have also been discussed.

Molecular Technologies for Detection of Chemical and Biological Agents

Editors: Banoub, Joseph H., Caprioli, Richard M (Eds.)

This book describes the latest molecular insights needed to understand the chemical and biological (CB) agents and their associated biotechnologies. Its primary focus is to present and discuss molecular technologies such as mass spectrometry, chemical and biological sensors, chromatographic and electrophoretic separation, and comparisons of spectroscopic, immunological and molecular analyses of chemicals used for the detection of chemical and biological agents and to prevent terrorism. This NATO-ASI book also contributes to the critical assessment of existing knowledge on new and important detection technologies. It helps to identify directions for future research and to promote closer working relationships between scientists from different professional fields.

Synthesis and ESI-MS/MS Fragmentation Study of Two New Isomeric Oxazolidin-2-One Derivatives ; Ahoya Anothane Caleb, Youssef Ramli, Hicham Benabdelkamel, Rachid Bouhfid, Nouredine Es-Safi, El Mokhtar Essassi, Joseph Banoub, Springer Science-Business Media. BV., 2017 ; J.H. Banoub, R.M. Caprioli (eds), Molecular Technologies for Detection of Chemical and Biological Agents, NATO Science for Peace and Security, Series A : Chemistry and Biology, DOI : 10-1007/978-94-024-1113-3_15 ; pages : 253-268



Abstract

Two new isomeric heterocyclic systems containing oxazolidin-2-one and quinoxaline moieties have been synthesized through reaction of (E)-3-styrylquinoxalin-2-one with bis-dichloroethylamine hydrochloride in presence of potassium carbonate. The structures of the formed products were established by NMR and mass spectroscopy. The fragmentation patterns of the two novel synthesized 2-oxo-oxazolidinyl quinoxaline (1, 2), were investigated using electrospray ionization mass spectrometry (ESI-MS) and tandem mass spectrometry (MS/MS) techniques. A simple methodology, based on the use of ESI (positive ion mode) and by increasing the declustering potential in the atmospheric pressure/vacuum interface, collision induced dissociation (CID), was used to enhance the formation of the fragment ions. In general, the novel synthetic oxazolidin-2-one derivatives afforded, in the gas phase, protonated molecules leading to the confirmation of the molecular masses and chemical structures of the studied compounds. The breakdown routes of the protonated molecules were rationalized by conducting low-energy collision CID-MS/MS analyses (product ion scans) using. The structural similarity between the two studied oxazolidin-2-ones explains the similarity observed in their CID-MS/MS spectra and their fragmentation pathways.

Participation du Pr. Ali BOUKHARI au Forum GID-Parmenides VII



Tenu du 21 au 23 mars 2017 au Centro Congressi di Genova, Gênes, Italie, sur le thème «**Quels savoirs pour concilier l'évolution des infrastructures portuaires avec le développement durable en Méditerranée?**», le Forum GID-Parmenides VIII a vu la participation du Pr A. Boukhari, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Les Forums du réseau GID-EMAN sont une occasion de formation et diffusion du savoir sur des thématiques dédiées essentiellement au développement durable dans les pays du pourtour méditerranéen. Ils ont pour objectifs, entre autres, de :

- développer des activités réalistes et concertées, à intérêt commun, en faveur du développement durable du réseau, sans financement de projet de recherche.
- favoriser la coopération entre les membres.
- organiser des "workshops" sur des thématiques en faveur du développement durable.

Plus de quatre vingt spécialistes ont participé au forum, représentant les Académies des Sciences de l'Albanie, l'Algérie, la Croatie, l'Espagne, l'Egypte, la France, la Grèce, l'Italie, Israël, Malt, Le Maroc, Monténégro, le Portugal, Le Sénégal, la Tunisie et la Turquie.

Lors de l'Assemblée générale, les activités du réseau ont été exposées et particulièrement celles des années à venir. De nombreuses propositions ont été exposées pour les trois prochaines années, en rappelant que d'autres thématiques peuvent être proposées par les membres du réseau :

- Culture en Méditerranée.
- Qualité de l'eau, problème d'érosion.
- Eau et pollution.
- Archéologie, paléontologie et monuments.
- Langues en Méditerranée.
- Développement de l'agriculture en Afrique.

Le Forum a débuté officiellement le 21 mars. Après une séance introductive et ouverture des travaux, cinq sessions ont été programmées sur différentes thématiques.

Les orateurs ont développé dans leurs interventions les aspects scientifiques relatifs à

- 1) la vie des ports dans le domaine de construction, la vie biologique, la cartographie;
- 2) la résorption des pollutions;
- 3) l'urbanisation des côtes et la protection des animaux marins;
- 4) la pollution des eaux marines;
- 5) le dragage des sédiments et leurs dégâts environnementaux;
- 6) La protection des côtes des invasions d'animaux marins que peuvent charrier le bateaux dans leur sillage des contrées lointaines hors de la Méditerranée;
- 7) La sécurité des ports,...

Plusieurs qualificatifs ont été développés pour définir les ports de demain en parlant de ports écologiques, du futur, connectés, durables, intelligents,.... La table ronde du Forum, a examiné ces aspects pour le suivi des marchandises et des bateaux. L'expérience marocaine dans ce domaine a été exposée par le représentant de Société PortNet, SA, qui a montré les différents dispositifs de gestion de suivi des marchandises, en import et export, au profit des PME. La procédure est basée sur les flux physiques, les flux d'information et les flux de paiement des marchandises. L'entreprise est au centre du système de gestion. D'autres expériences ont été exposées..

L'implication de la société civile dans l'acquisition des savoirs et de l'évolution des ports a été l'occasion pour développer et partager, autour des ports de la Méditerranée, la connaissance scientifique sur la mer, en tant réel, tels le climat, les courants marins, la température de l'eau, le pH,...

Les principaux points forts des travaux du Forum sont :

- La construction des ports doit prendre en considération le respect de l'écosystème.
- L'engagement des études préalables approfondies sur les impacts touchant les différents aspects de la vie d'un port.
- La gouvernance, l'économie et la société sont des éléments importants pour un développement durable.
- L'utilisation des énergies renouvelables dans les infrastructures portuaires.
- Le développement d'une R&D au profit des ports : informatisation, matériaux, adaptation aux environnements, transformation des anciens ports, développement des études pratiques, développement durable,...
- La gestion de la logistique.
- L'impact sociétal des ports : Sciences participatives en écoutant la société, tourisme, influence des réseaux sociaux sur les décideurs,...

