



ROYAUME DU MAROC

Académie Hassan II des Sciences et Techniques

ACTES DE LA SESSION PLÉNIÈRE SOLENNELLE
Année 2016

Thème

La science dans tous ses états

Rabat, 16 - 18 février 2016



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



ROYAUME DU MAROC
Académie Hassan II des Sciences et Techniques

ACTES DE LA SESSION PLÉNIÈRE SOLENNELLE
Année 2016

Thème :
La science dans tous ses états

Rabat, 16 - 18 février 2016

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

Dépôt légal : 2017 MO 0847
ISBN : 978-9954-9598-1-7

Réalisation : **AGRI-BYS S.A.R.L.**

Achevé d'imprimer : Février 2017
Imprimerie Lawne : 11, rue Dakar, Océan, 10040-Rabat, Maroc

SOMMAIRE

Avant-propos	7
Forword	9
CÉRÉMONIE D'OUVERTURE.....	11
Election du Directeur des séances.....	13
Allocution de bienvenue et présentation du thème général de la session Omar Fassi-Fehri	15
Signature d'une convention entre le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et l'Association Recherche et Développement du Maroc	20
Origine et évolution de la famille humaine - Nous sommes tous des africains... Michel Brunet	23
SÉANCE I : SCIENCES DE LA MATIÈRE.....	33
Défis de la physique Catherine Bréchnignac.....	35
Chimie et biologie : quelles nouvelles frontières ? Marc Fontecave.....	47
Les matériaux du futur et les promesses de la nature Nadia El Kissi	69
SÉANCE II : SCIENCES ET TECHNIQUES DU VIVANT	91
De la diversité des gènes à la complexité du vivant Philippe Kourilsky	93
CRISPR/Cas9 : du système immunitaire bactérien à l'outil révolutionnaire d'ingénierie des génomes Philippe Horvath	103
La physiologie cérébrale comme embryogenèse silencieuse Alain Prochiantz.....	109
SÉANCE III : MATHÉMATIQUES ET SCIENCES DE L'UNIVERS.....	111
Les Mathématiques : des idées simples au service de tous Gilles Godefroy.....	113
Une excursion dans le monde des équations aux dérivées partielles El Maati Ouhabaz	121
La question des origines : bilan et perspectives d'une discipline en ébullition, l'Astronomie-Astrophysique Jean Michel Alimi	129

SÉANCE IV : NOUVELLES TECHNOLOGIES, ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT 131

L'énergie éolienne : l'une des énergies renouvelables les plus compétitives
Enrique Soria Lascorz 133

Mesure de l'entropie pour la science et la technologie des batteries
Rachid Yazami 157

Co-opération et co-innovation : Quel rôle pour la recherche publique?
Philippe Tanguy 175

SÉANCE V : ÉCONOMIE ET AGRICULTURE 185

L'état des sciences économiques : vers une disparition de la théorie économique?
Jean Cartelier 187

Le nouveau consensus macroéconomique : l'unification par la discipline de l'équilibre
Redouane Taouil 197

L'agriculture du futur : un condensé de défis scientifiques
Mohamed Aït Kadi 215

SÉANCE VI : L'ÉTHIQUE EN SCIENCE 231

La protection des données à caractère personnel face à la révolution numérique : le cas du maroc
Saïd Ihraï 233

SESSION INTERNE DE L'ACADÉMIE

Rapport d'Activité de l'Académie pour l'année 2015
Omar Fassi-Fehri 243

Compte rendu de la session plénière 2016 (en français) 269

Liste des participants et des orateurs invités 277

Compte rendu de la session plénière 2016 (en arabe)

Discours d'ouverture du Secrétaire Perpétuel (en arabe)

Message adressé à Sa Majesté le Roi Mohammed VI (en arabe)

Avant-propos (en arabe)

AVANT-PROPOS

«Profondément convaincu du rôle majeur que la recherche scientifique et technique joue au service du développement et de l'accès à la société du savoir et de la technologie, Nous avons procédé à l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, traduisant, par là, Notre confiance dans les compétences nationales prometteuses, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, ainsi que l'assurance que Nous avons de leur volonté sincère de contribuer activement à la construction de l'avenir de leur patrie».

Extrait du Discours de Sa Majesté le Roi Mohammed VI -que Dieu Le garde- à l'occasion de la Fête du Trône 2006.

En ce début du troisième millénaire, la science connaît une vive effervescence alimentée par l'accumulation d'un siècle de savoir universel fait de découvertes et d'inventions, et tous les indices concordent sur le fait que nous sommes à l'aube d'une nouvelle ère scientifique comparable à celle de la découverte d'un nouveau monde avec tout ce que cela comporte comme mystères et spéculations, comparable aussi à celle du début du siècle dernier témoin de la naissance de la physique quantique et de la relativité qui ont changé la vie quotidienne de l'Homme. Les révolutions issues de la physique quantique et des sciences de l'univers, associées aux théories du chaos, à l'étude de la complexité et de l'irréversibilité, ainsi que les progrès énormes de la biologie et des neurosciences, ont montré l'incapacité des approches déterministes et réductionnistes à rendre compte de la nature de notre monde. Les nanotechnologies, les nouvelles technologies de communication et l'accélération de l'acquisition des connaissances ainsi que les récentes découvertes, tel que le boson de Higgs, sont des portes entrouvertes à de nouvelles théories unificatrices et globales rendant mieux compte des différents aspects de la matière et permettant de mieux comprendre notre univers. D'ici la fin du XXI^{ème} siècle, les sujets de débats ne devraient pas manquer.

Les nanotechnologies devraient devenir une réalité, tout comme la biologie synthétique, la robotique humanoïde, la biothérapie, la thérapie génique. Le réchauffement climatique, déjà sensible aujourd'hui au moins aux pôles, aura modifié les conditions de vie dans de nombreuses régions du monde, sans parler de l'épuisement de certaines ressources naturelles. La science a, par ailleurs, de plus en plus d'influence sur la vie des gens. Les avantages que l'humanité en a récemment tirés sont sans précédent dans l'histoire de l'espèce humaine, mais dans certains cas les impacts ont été nuisibles ou leurs répercussions à long terme suscitent de nombreuses préoccupations. Jamais sans doute, n'a-t-on autant attendu de la science et de la technologie, du fait de l'interdépendance étroite des enjeux politiques, économiques, sociaux et environnementaux et la science, et en même temps, elle suscite le trouble et des interrogations fondamentales sur les limites éthiques de son intervention sur notre quotidien. Les découvertes scientifiques doivent être appliquées à l'échelle qui convient. L'incidence des interventions technologiques sur les individus, les collectivités et l'environnement doit aussi être examinée de près.

Tous ces sujets constituent une assise de débat et de discussion au cours de la onzième session plénière solennelle de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques organisée les 16, 17 et 18 février 2016 sur le thème général «la science dans tous ses états».

Les conférences et les exposés ainsi que le débat et les discussions qui s'ensuivront sont une excellente occasion pour faire le point sur le progrès «pour» la science, le progrès «par» la science et le progrès «dans» la science. Cette session est l'occasion pour débattre des grandes avancées scientifiques marquant notre époque ainsi que les défis, les attentes et l'avenir de la science contemporaine, notamment dans quelques disciplines phares telles que les sciences de la matière, les sciences et techniques du vivant, les sciences de l'univers, les technologies de l'information ainsi que les questions scientifiques liées à l'énergie, l'environnement, l'économie ou l'agriculture du futur.

Les conclusions attendues de cette session permettront de déterminer les domaines de recherche prometteurs, à fort potentiel d'innovation et de transfert de technologie, et aussi d'une manière générale préciser les meilleures approches pour une pleine intégration de la science aux larges besoins sociaux, notamment, en matière de développement humain, en vue de renforcer l'économie et la société du savoir. Cette session revêt aussi un caractère particulier car elle coïncide avec la commémoration du 10^{ème} anniversaire de l'installation de l'Académie par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu L'assiste, elle constitue l'événement central d'un ensemble de manifestations scientifiques, sur des sujets d'actualité, qui seront organisées tout au long de l'année 2016 et à travers l'ensemble des régions du Royaume.

FOREWORD

“Deeply convinced of the major role that scientific and technical research plays for the development and access to the knowledge society and technology, we completed the installation of the Hassan II Academy of Science and Technology, reflecting by so, Our confidence in promising national skills, both inside and outside the country, as well as the assurance that we have of their sincere will, to actively contribute to the future of their homeland»

Extract from the speech of His Majesty King Mohammed VI, may God guard Him, on the occasion of the 2006 Throne Day.

At the beginning of the third millennium, science was in an effervescent state driven by the accumulation of a century of universal knowledge, made of discoveries and inventions. All indices agree on the fact that we are at the dawn of a new scientific era comparable to that of the discovery of a new world with the whole mystery and speculation it can entail, comparable also to the era of the last century, witness of the birth of quantum physics and relativity that changed man’s daily life. Revolutions deriving from quantum physics and universe science, combined with chaos theories, the study of complexity and irreversibility, as well as the important progress in biology and neurosciences, have shown the inability of deterministic and reductionist approaches to account for the nature of our world. Nanotechnology, new communication technologies and the acceleration of knowledge acquisition and recent discoveries, such as the Higgs boson, are opportunities opened to new unifying and global theories that better deal with the different aspects of matter, and understand our universe. By the end of the twenty first century, there should be enough topics to discuss.

Nanotechnologies should become a reality, as synthetic biology, humanoid robotics, biological therapy, and gene therapy. Global warming, already evident today at least in the poles, will change life conditions in many regions in the world. Not to mention the exhaustion of some natural resources. Moreover, science has more and more influence on people’s lives. The benefits recently drawn from science are unprecedented in the history of human species, but in some cases the impacts were harmful, or their long-term effects caused anxiety. We have never expected that much from science and technology because of the close interdependence of political, economic, social and environmental issues of science, which, at the same time, creates confusion and raises fundamental questions about the ethical limits of its intervention in our daily lives. Scientific discoveries must be applied at an appropriate scale. The impact of technological interventions on individuals, communities and environment must also be scrutinized.

All these topics provide a foundation for debate and discussion during the tenth solemn plenary session of the Hassan II Academy of Science and Technology, planned for February, 16, 17 and 18, 2016, under the theme: «science in its multifaceted effervescent states».

The conferences, presentations and discussions that will follow, are an excellent opportunity to take stock of the progress «for» science, progress «by» Science and Progress «in» science. This session is an opportunity to discuss major scientific advances that mark our time, as well as the challenges, expectations and future of contemporary science, especially in some key disciplines such as matter sciences, life science and technology, universe science, information technology and scientific issues related to energy, environment, economy and agriculture of the future.

The conclusions of this session will identify the promising research areas with high potential for innovation and technology transfer. They will also generally specify the best approaches to the full integration of science in social needs, notably in terms of Human Development, in order to strengthen the economy and the knowledge society. This session is special because it coincides with the commemoration of the 10th anniversary of the installation of the Academy by His Majesty the King, may God assist Him. It is the central event of a set of scientific events on topics of interest that will be organized throughout 2016 across all regions of the Kingdom.

CÉRÉMONIE D'OUVERTURE

Election du Directeur des Séances

- **Pr. Tijani BOUNAHMIDI** (Directeur des Séances sortant)

Messieurs les Ministres,

Mesdames et Messieurs les membres de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques,

Honorables invités,

J'ai l'honneur et le plaisir d'ouvrir cette session plénière de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques qui porte sur le thème «la science dans tous ses états». Cette session a été conçue dans le cadre de la commémoration du 10^{ème} anniversaire de l'installation de cette Académie par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI –que Dieu L'assiste–.

Je n'aurai pas le plaisir de diriger les travaux de cette session car, comme vous le savez, les statuts de l'Académie stipulent le changement du Directeur des Séances chaque année. Donc, nous allons procéder à l'élection du Directeur des Séances qui va diriger les travaux de cette session.

Je propose et je suggère, si vous le voyez convenable, Madame Sellama NADIFI comme mon successeur à cette place.

(Applaudissements d'approbation)

Avant de céder le siège à Mme Sellama NADIFI, je lui souhaite plein de succès dans cette mission et je vous vous remercie tous pour la bonne collaboration que vous avez montrée tout au long de l'année écoulée.



- **Pr. Sellama NADIFI** (Nouveau Directeur des Séances)

Monsieur le Secrétaire Perpétuel de l'Académie,

Monsieur le Chancelier,

Mesdames et Messieurs les académiciens et chers amis,

Honorable assistance,

Je tiens tout d'abord à vous remercier pour la confiance que vous m'avez confiée pour diriger les séances cette année, je remercie et félicite Monsieur BOUNAHMIDI d'avoir assuré cette tâche pendant toute l'année 2015 et j'espère être à la hauteur en 2016.

Sans trop tarder, on va démarrer la cérémonie d'ouverture en donnant la parole à notre Secrétaire Perpétuel pour présenter le thème de la session «la science dans tous ses états».

Monsieur le Secrétaire Perpétuel, à vous la parole.



**ALLOCUTION
DU PROFESSEUR OMAR FASSI-FEHRI
À LA SÉANCE D'OUVERTURE DE
LA SESSION PLÉNIÈRE SOLENNELLE 2016**

Pr. Omar FASSI-FEHRI

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



**Excellence,
Honorables invités,
Mesdames, Messieurs,**

Il y a un peu moins de 10 ans, le 18 mai 2006, Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le protège, installait solennellement au Palais Royal d'Agadir l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Nous nous remémorons avec la plus vive émotion cet évènement, à jamais gravé dans nos mémoires, ainsi que le Discours Royal prononcé à cette occasion; nous tenons aujourd'hui cette session plénière solennelle annuelle pour commémorer cet anniversaire et aussi pour traiter le thème scientifique général retenu avec la Haute Approbation de Sa Majesté Le Roi Mohammed VI "**La Science dans tous ses états**". Qu'il me soit permis au nom de tous les académiciens de présenter à Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le garde, l'expression de notre profonde reconnaissance et de notre déférente gratitude, en priant le Tout Puissant de nous aider à être dignes de la Sollicitude et de la Confiance Royales.

**Honorables assistance,
Mesdames, Messieurs,**

Je voudrais remercier toutes les personnalités, venues du Maroc et de l'étranger, qui ont répondu à notre invitation, et qui nous honorent aujourd'hui de leur présence.

A toutes et à tous nous souhaitons la bienvenue.

Mesdames, Messieurs,

Dans le cadre de cette allocution d'ouverture, je ne m'attarderai pas sur le bilan de l'année écoulée; j'aurai l'occasion de le détailler au cours de la séance du jeudi après-midi en présentant le rapport d'activité correspondant à la période allant du 15 février 2015 au 15 février 2016.

Je ferai simplement remarquer que notre Académie au cours de l'année écoulée a maintenu le cap qu'elle s'est fixée dans le cadre des Orientations données par son Tuteur Sa Majesté Le Roi qui dans le Discours d'installation l'avait invitée à **«servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale»**, en insistant sur le **«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»**. Dans ce cadre nous avons essayé de remplir nos missions :

- promouvoir la recherche scientifique,
- contribuer à la diffusion de la culture scientifique et au développement de l'enseignement des sciences dans notre pays,
- assurer la diffusion régulière des publications de l'Académie (les Actes, le Bulletin d'information, la Lettre de l'Académie, le Journal Frontiers in Science and Engineering),
- encourager en matière scientifique l'excellence à tous les niveaux (Programme de bourses d'excellence aux lauréats du Concours Général des Sciences et Techniques),
- apporter un appui aux projets de recherche portant sur des thématiques prioritaires aux yeux du pays,
- organiser tout au long de l'année un cycle de séminaires sur des questions scientifiques d'actualité ainsi qu'un cycle de conférences données par d'éminents personnalités scientifiques de réputation internationale,
- contribuer à l'intégration de la recherche scientifique et technique dans l'environnement socio-économique national et international (industrie aéronautique, industrie automobile),
- assurer une présence de l'Académie à l'étranger sur les plans régional (Tunisie, Sénégal), continental (NASAC) et international (IAP).

Voilà très succinctement les points forts de l'action que nous avons menée durant l'année écoulée. Nous aurons l'occasion donc d'en discuter après demain et surtout d'examiner comment l'on peut l'améliorer et la corriger si nécessaire.

Mesdames, Messieurs,

La tenue de cette session plénière solennelle constitue l'évènement central d'un programme d'ensemble constitué par des manifestations scientifiques régionales organisées avec l'aide des autorités universitaires locales, ce dont nous les remercions très sincèrement et qui se dérouleront tout au long de l'année 2016 notamment à Rabat, Marrakech, Fès, Casablanca, Tanger, Dakhla, El Jadida. Une rencontre entre l'Académie Hassan II et les Académies des sciences africaines est également prévue au mois de mai 2016 à Rabat.

Mesdames, Messieurs,

Maintenant si vous le voulez bien un mot sur le thème scientifique général de cette session plénière **“La Science dans tous ses états”**.

La science est en ébullition, car elle fait chaque jour de nouvelles découvertes et de nouvelles inventions, et elle le fait aujourd'hui de plus en plus vite et en quantité de plus en plus grande, chaque jour aussi on s'aperçoit combien reste grande notre ignorance. C'est je crois Einstein qui disait *«plus je connais de choses et plus je m'aperçois combien je suis ignorant»*, avant lui James Clerk Maxwell avait dit *«sans une conscience profonde de notre ignorance il ne peut y avoir de réelle avancée en science»*.

Au XV^{ème} siècle avec l'invention de l'imprimerie par Gutenberg la quantité d'informations disponibles doublait en 50 ans; aujourd'hui avec les nouvelles technologies c'est tous les trois ans qu'elle est multipliée par deux. L'humanité a produit au cours des 30 dernières années plus d'informations qu'en 2000 ans d'histoire, et ce volume d'informations double tous les 4 ans.

La dernière grande découverte nous est arrivée la semaine dernière avec l'observation des ondes gravitationnelles par une équipe américaine (LIGO) confirmant ainsi une prédiction faite un siècle plutôt par Einstein ; et c'est avec beaucoup d'intérêt que l'on écouterait demain matin la présentation de notre collègue Mme Catherine Brechignac sur «les défis de la physique».

A la fin du XIX^{ème} siècle un illustre physicien anglais Lord Kelvin n'avait pas hésité à dire *«Il n'y a plus rien à découvrir en physique aujourd'hui. Tout ce qui reste à faire c'est d'améliorer la précision des mesures»*. Quelques années plus tard la physique connaissait deux grandes révolutions la physique quantique et la relativité, qui ont bouleversé toutes nos connaissances et les concepts qui avaient prévalu pendant des siècles sur l'espace, le temps, la masse, l'énergie, la lumière, le monde de l'infiniment petit et celui de l'infiniment grand.

Aujourd'hui encore de grandes questions restent ouvertes dans toutes les disciplines scientifiques ; au cours des deux prochaines journées, en tout cas au moins dans quelques disciplines phares, comme la paléanthropologie, dans les sciences de la matière, en physique, en chimie, dans les sciences du vivant, dans les sciences de l'ingénieur, dans les sciences économiques, dans les sciences agricoles, nous aurons l'occasion d'avoir une idée sur les attentes, progrès, défis et avenir de la science contemporaine ; nous pourrions en débattre avec les éminentes personnalités scientifiques qui ont bien voulu faire des présentations au cours de cette session et que nous remercions chaleureusement.

Mesdames, Messieurs,

Depuis plus d'un siècle, la science a connu une évolution et des bouleversements profonds dont l'ampleur n'a pas encore été perçue de tous, y compris au sein de la communauté scientifique. La science constitue plus que jamais l'enjeu majeur de nos sociétés et le facteur décisif de leur évolution. Grâce à la science nous avons beaucoup appris au cours des dernières décennies, nous en savons plus sur le comportement des particules

fondamentales, nous découvrons toujours davantage d'objets cosmiques lointains, nous connaissons mieux le génome de nombreuses espèces, dont la nôtre. Aujourd'hui, la science est en transition, se trouve à la croisée des chemins et les prémices d'une nouvelle science mondialisée sont de plus en plus évidentes. Elle est devenue multidisciplinaire intégrant les sciences sociales et les sciences naturelles.

Par le passé, les méthodes scientifiques ont valorisé l'étude des processus naturels individuels plutôt que des systèmes, l'analyse plutôt que la synthèse et la compréhension de la nature plutôt que la prévision de son comportement. Et dans de nombreux cas, la science a focalisé son attention sur des problèmes à court terme et de petite échelle, souvent selon un mode «monodisciplinaire», plutôt que sur des problèmes à plus long terme et de plus grande échelle, et selon une approche multidisciplinaire et plus holistique de la science.

En ce début du troisième millénaire, la science connaît une vive effervescence ("dans tous ses états") alimentée par l'accumulation d'un siècle de savoir universel fait de découvertes et d'inventions, et tous les indices concordent pour penser que nous sommes à l'aube d'une nouvelle ère scientifique comparable à celle de la découverte d'un nouveau monde avec tout ce que cela comporte comme mystères et spéculations, comparable aussi à celle du début du siècle dernier témoin comme nous l'avons rappelé tout à l'heure de la naissance de la physique quantique et de la relativité qui ont changé notre vie quotidienne.

D'ici la fin du XXI^{ème} siècle, les sujets de débats scientifiques ne devraient pas manquer. Les nanotechnologies devraient devenir une réalité, tout comme la biologie synthétique, la robotique humanoïde, la biothérapie, la thérapie génique; déjà des microrobots, de la taille d'une bactérie, sont capables de se propulser dans les fluides biologiques pour réaliser des actes médicaux à l'échelle cellulaire,... Le réchauffement climatique, déjà sensible aujourd'hui au moins aux pôles, aura modifié les conditions de vie de nombreuses régions de monde. Sans parler de l'épuisement de certaines ressources naturelles.

Certains considèrent même qu'une ère géologique a déjà commencé et qui est façonnée par l'homme, l'Anthropogène qui aurait débuté avec la révolution industrielle.

Face au réchauffement climatique certains vont jusqu'à penser à dompter le climat, à agir sur le climat en inventant un système d'extraction du CO₂ de l'atmosphère ou encore à réduire l'ensoleillement de la surface terrestre en injectant du soufre dans la haute atmosphère.

La rapidité des progrès réalisées par les sciences et les technologies est fascinante et remet sans cesse en question notre imagination et nos attentes, mais il est impératif qu'au fur et à mesure de ces avancées, nous continuions de nous interroger sur leurs implications éthiques; car les sciences et les technologies peuvent aussi être des sources de crainte et de risques. Les menaces qu'elles font peser sur l'environnement et la santé humaine et animale soulèvent des interrogations non seulement sur le plan scientifique et technologique, mais aussi en termes socioéconomiques et éthiques. Les découvertes scientifiques doivent être appliquées dans des directions utiles à l'Homme. Pour ces raisons nous avons jugé utile d'intégrer dans le programme de cette session un panel qui abordera et traitera la question de l'éthique en science.

Mesdames, Messieurs,

Qu'en est-il du Maroc?

Sachant que toute politique scientifique réelle et efficace doit reposer d'abord sur un système éducatif performant qui assure un enseignement des sciences de qualité, et qui forme des cadres compétents, la recherche scientifique marocaine doit certes d'abord répondre aux besoins urgents et prioritaires du pays, c-à-d améliorer les conditions de vie des citoyens, et contribuer à la modernisation du pays et à son développement sur tous les plans, ceci étant elle se doit aussi de prendre part à la recherche scientifique mondiale dite de pointe qui est en train de révolutionner notre vision du monde.

Excellences,

Mesdames, Messieurs,

A cette session participent d'éminents scientifiques venant du Maroc et de l'étranger (Etats-Unis, France, Espagne, Sénégal, Tunisie, Chili, Mexique, Brésil, Canada et Suède) qui présenteront des conférences et des communications, et qui contribueront à animer la discussion et le débat sur la thématique de la session, je les remercie très sincèrement.

Je voudrais, à la fin de cette allocution remercier tout particulièrement 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.

Mes remerciements vont également aux membres du Conseil d'Académie, de la Commission des Travaux, des Collèges scientifiques, à tous les membres de l'Académie associés, résidents et correspondants, et à son équipe administrative pour leur contribution à la préparation de cette session ; souhaitons-lui tout le succès qu'elle mérite.

Je vous remercie pour votre attention.

**Signature d'une convention entre le Ministère de l'Education
Nationale et de la Formation Professionnelle,
l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, et
l'Association Recherche et Développement du Maroc**



Ministère de l'Éducation Nationale
et de la Formation Professionnelle

Académie Hassan II des Sciences et
Techniques



MEMORANDUM D'ACCORD

Entre

Le Ministère de l'Éducation Nationale et de la Formation Professionnelle,

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques,

Et

L'Association Marocaine pour la Recherche- Développement (R&D Maroc).

I. Objectifs

Les objectifs du présent mémorandum d'accord entre les trois parties contractantes sont de :

- 1- Promouvoir la créativité en sciences et ingénierie au niveau des établissements de l'enseignement secondaire et la vulgarisation des concepts scientifiques et technologiques au niveau des écoles primaires, et ce à travers les diverses régions du Royaume.
- 2- Mettre en place un système d'émulation de la créativité scientifique et technologique au niveau des établissements de l'enseignement secondaire.
- 3- Mettre en commun les ressources humaines, logistiques et financières pour l'organisation d'événements périodiques couronnant les différentes activités qui s'inscrivent dans le plan d'action annuel d'opérationnalisation des objectifs arrêtés.

II. Encadrement

- Rien dans le présent accord ne modifie, ou n'est destiné à modifier, les attributions légales ou réglementaires de l'une des entités contractantes. Cet accord est uniquement destiné à faciliter la satisfaction de toutes les dispositions juridiques en vigueur et de tous les efforts de coopération pour le bien commun.
- Les parties contractantes peuvent élargir leur coopération afin de couvrir davantage d'activités. Pour ce, des avenants seront élaborés et signés de commun accord.

III. Disposition Spéciale

Le présent mémorandum d'accord doit être amendé par accords de partenariat bilatéraux, ou entre les trois de ses signataires. Sa mise en œuvre sera donc encadrée par les dits amendements.

IV. Interlocuteurs

Les interlocuteurs pour ce mémorandum d'accord sont :

Entité	Interlocuteur
Ministère de l'Éducation Nationale et de la Formation Professionnelle	M. le Directeur du Centre National des Innovations Pédagogiques et de l'Expérimentation
Académie Hassan II des Sciences et Techniques	M. le Directeur des Sciences au sein de l'Académie
Association Marocaine pour la Recherche-Développement, R&D Maroc	M. le Directeur de R&D Maroc

De nouveaux interlocuteurs peuvent être éventuellement désignés par les signataires.

V. Durée de l'accord et résiliation

L'accord entre en vigueur à la date de sa signature par les trois parties. Il demeurera en vigueur pendant une durée de 5 années à partir de la date d'entrée en vigueur, et est renouvelé par tacite reconduction.

Le présent mémorandum d'accord peut être résilié par commun accord de l'ensemble des parties contractantes ou par l'une de ces parties, avec un préavis de 90 jours transmis aux autres parties.

Le présent Mémorandum d'accord est conclu
Fait à Rabat, Le 16 février 2016 en trois exemplaires

Signature :

M. le Ministre de l'Éducation Nationale et de la Formation Professionnelle

M. le Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

M. le Président de R&D Maroc

ORIGINE ET EVOLUTION DE LA FAMILLE HUMAINE NOUS SOMMES TOUS DES AFRICAINS ...

(Conférence inaugurale)

Pr. Michel BRUNET

*Chaire de Paléontologie Humaine, Collège de France,
3, Rue d'Ulm, 75231-Paris Cedex 05
michel.brunet@college-de-france.fr*



ABSTRACT:

The idea of an ascendance for our species is quite recent (about 150 years ago) (Darwin, 1859 et 1871). But which was our ancestral group, when and where did it arise? ... If these questions are more constraints they are still always unsolved. In the 80's, early hominids are known in South and East Africa, the oldest being in East Africa led to propose an "East Side Story", the bipedal hominid original savannah hypothesis (Coppens, 1983).

From 1994 the M.P.F.T.2 digging in Djurab desert (Northern Chad) unearthed successively a new australopithecine, *Australopithecus bahrelghazali* Brunet *et al.* 1996, nicknamed Abel (dated to 3.5 Ma), the first ever found West of the Rift Valley (Brunet *et al.*, 1995) and later a new hominid, the earliest yet found (nicknamed Toumai) *Sahelanthropus tchadensis* Brunet *et al.*, 2002 from the late Miocene, dated to 7 Ma (Vignaud *et al.*, 2002; Lebatard *et al.*, 2008). These new milestones suggest that an exclusively southern or eastern African origin of the hominid clade is unlikely to be correct.

Since 1994, our evolutionary roots went deeper, from 3.6 Ma to 7 Ma today, with three new Late Miocene species: *Ardipithecus kadabba* Haile-Selassie, 2001 (5.2–5.8 Ma, Middle Awash, Ethiopia) and *Orrorin tugenensis* Senut *et al.*, 2001 (ca. 6 Ma, Lukeino, Kenya) while the oldest (7 Ma) is the Chadian one. These discoveries have a scientific impact similar to that of *A. africanus* Dart, 1925. *S. tchadensis* displays a unique combination of primitive and derived characters that clearly shows that it is not related to chimpanzees or gorillas, but clearly suggests that it is related to later hominids, and probably temporally close to the last common ancestor between chimpanzees and humans (Brunet *et al.*, 2002 & 2005; Zollikofer *et al.*, 2005).

In Chad, the Late Miocene sedimentological and paleobiological data are in agreement with a mosaic landscape (Vignaud *et al.*, 2002). Today in Central Kalahari (Botswana) the Okavango delta appears to be a good analogue with a similar mosaic of lacustrine and riparian waters, swamps, patches of forest, wooded islets, wooded savannah, grassland and desertic area (Brunet *et al.*, 2005). Among this mosaic the studies of Toumaï ecologic preferences are still in progress but more probably, as for the others known late Miocene Hominids, a wooded habitat in a mosaic landscape. Moreover these three late Miocene hominids are probably usual terrestrial and arboreal climbing bipeds. So the models that involve significant role for savannah in the hominid origin must be reconsidered.

Now, it appears that the earliest hominids inhabited wooded environments and were not restricted to Southern or Eastern Africa but were rather living in a wider geographic region, including also Sahelian Africa: at least Central Africa (Chad, Niger, Sudan) and may be also a part of Northern Africa (Algeria, Libya and Egypt) (Brunet, 2008). In fact we are all African (Brunet, 2016) ...

According to, the early hominid history is going to be reconsidered within completely new paradigms.

Keywords: Hominids, Origin, Evolution, Late Miocene-Pliocene, Africa.

Mots Clés: Hominidés, Origine, Evolution, Miocène supérieur-Pliocène, Afrique.

INTRODUCTION

La notion de l'existence de fossiles humains est très récente, de l'ordre de 150 ans. Mais qui est l'ancêtre, où et quand est-il apparu? ... restent toujours des questions d'actualité.

La Paléontologie et la Phylogénie moléculaire ont montré que nous appartenons au groupe des Anthropoïdes, les singes, sûrement originaires d'Asie (et non d'Afrique...!) (Jaeger & *al.* 1999) avant 40 Ma mais arrivés très tôt en Afrique (autour de 37-40 Ma); ils sont à l'origine de deux groupes frères les Catarrhiniens (Singes de l'ancien Monde) et les Platyrrhiniens (Singes du nouveau Monde ou Néotropicaux).

Ce deuxième groupe est probablement originaire directement d'Afrique à la suite d'une migration ancienne (peut-être *ca.* 37-40 Ma) dont la route vers l'Amérique du Sud demeure conjecturale et reste encore à définir (Iles Shetlands... Péninsule Antarctique...?); le plus ancien représentant actuellement connu, *Branisella*, est daté de moins de 30 Ma.

Au sein du premier groupe, nous les humains, appartenons à la superfamille des grands singes : les Hominoïdes, actuellement représentés en Asie par les Gibbons (*Hylobates* & *Symphalangus*) et les Orangs Outans (*Pongo*), en Afrique par les Gorilles (*Gorilla*) et les Chimpanzés (*Pan*), et sur l'ensemble de la planète Terre (depuis moins de 200 Ka) par l'espèce *H.sapiens sapiens* du genre *Homo* lui aussi apparu en Afrique il y a au moins 2.5 Ma.

LES HOMINIDES ANCIENS

Dans les années 80, les hominidés anciens sont uniquement décrits en Afrique Australe et Orientale, mais le fait que les plus anciens soient Est Africains a conduit à proposer le paléoscénario “East Side Story” : l’hypothèse de la savane originelle (Coppens, 1983) Fig.1.

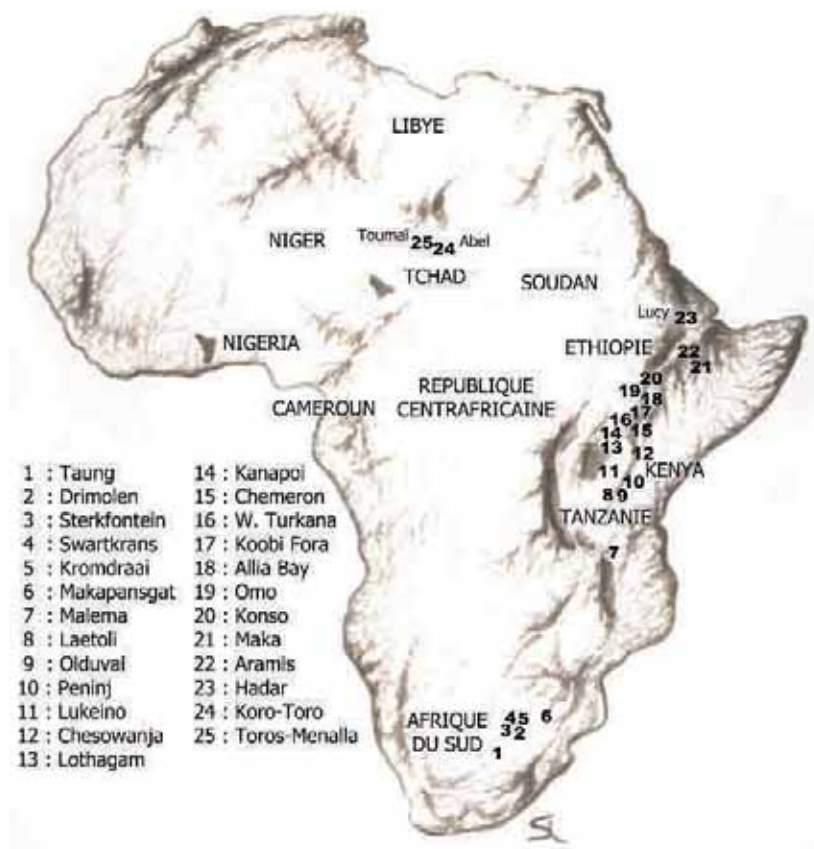


Fig.1 : Principales localités à Hominidés anciens du Continent Africain.

Depuis 1994 la M.P.F.T.2 prospecte et fouille dans le désert du Djourab (Nord Tchad) où successivement elle a mis au jour un nouvel australopithèque, *Australopithecus bahrelghazali*, surnommé Abel (3.5 Ma) Fig.2, le premier mis au jour à l’ouest de la vallée du grand Rift (Brunet et al., 1995) et plus tard un nouvel hominidé (surnommé Toumaï) Fig.3 *Sahelanthropus tchadensis* Brunet et al., 2002 du Miocène supérieur (7 Ma ; Vignaud & al., 2002; Brunet & al., 2005; Lebatard & al., 2008 et 2010). Ce plus ancien hominidé connu est une découverte majeure qui montre que l’hypothèse d’une origine australe ou orientale du clade humain doit être reconsidérée Fig.1.

Depuis 1994, nos racines ont pratiquement doublé leur longueur dans le temps, de 3.6 Ma à 7 Ma aujourd'hui, avec trois nouvelles espèces du Miocène supérieur: *Ardipithecus kadabba* Haile-Selassie, 2001 (5.2–5.8 Ma, Middle Awash, Ethiopie) et *Orrorin tugenensis* Senut *et al.*, 2001 (ca. 6 Ma, Lukeino, Kenya) tandis que le plus ancien (7 Ma) est l'hominidé tchadien. Ces découvertes ont un impact scientifique tout à fait similaire à celui de la description d'*Australopithecus africanus* Dart, 1925.

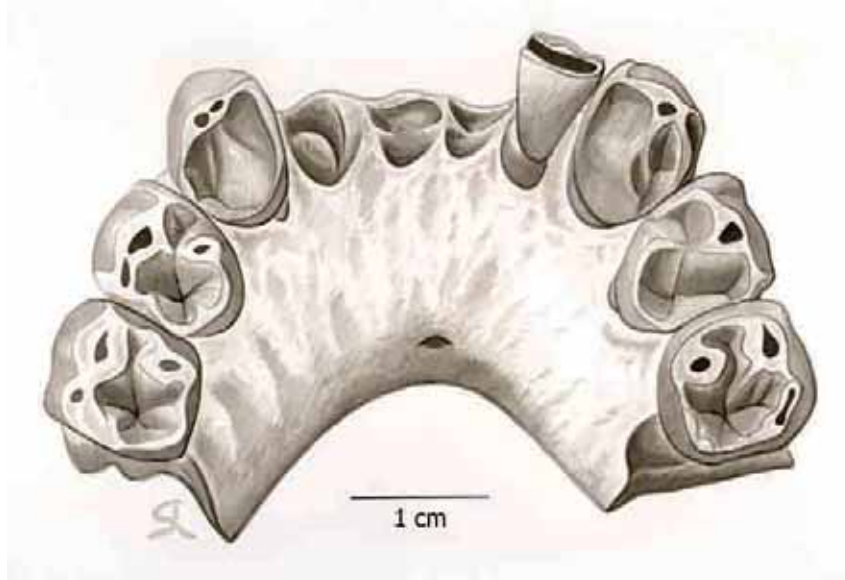


Fig.2 : *Australopithecus bahrelghazali* Brunet & *al.* 1996 (dit "Abel") : mandibule, holotype de l'espèce.

S. tchadensis possède une combinaison unique de caractères primitifs et dérivés qui montre clairement qu'il ne peut être rapproché ni des gorilles, ni des chimpanzés, mais traduit au contraire son appartenance au rameau humain et par l'âge sa proximité temporelle avec le dernier ancêtre commun aux chimpanzés et aux humains (Brunet & *al.*, 2002 & 2005; C. P. E. Zollikofer & *al.*, 2005) Fig.3-4-5-6. Dans le Miocène supérieur du Tchad, les données sédimentologiques et paléobiologiques témoignent d'une mosaïque de paysages (Vignaud & *al.*, 2002). Actuellement, au Botswana dans le Kalahari central le delta de l'Okavango nous apparaît être un bon analogue avec un paysage mosaïque similaire de rivières, de lacs, de marécages, de zones boisées, d'îlots forestiers, de savane arborée, de prairies herbeuses et de zones désertiques (Brunet & *al.*, 2005). Dans cette mosaïque les préférences écologiques de Toumaï sont encore en cours d'étude mais probablement, comme pour les autres hominidés du Miocène supérieur des espaces boisés. De plus ces trois hominidés du Miocène supérieur sont liés à des paysages mosaïques arborés et plus probablement des bipèdes grimpeurs. Aussi l'hypothèse qui invoquait le rôle déterminant de la savane dans l'origine du rameau humain fait dorénavant partie de l'histoire de notre histoire.

Avec les caractères anatomiques particuliers de sa denture (morphologie des canines à couronnes petites et à usure apicale ; épaisseur de l'émail des dents jugales intermédiaire entre celui des chimpanzés et des Australopithèques ;...) et de son crâne (bâsicrâne de type bipède) (Brunet et al. 2002, 2005, 2006 & 2008, Zollikofer et al., 2005), *Sahelanthropus tchadensis* dit «Toumaï» représente un nouveau grade évolutif (Brunet, 2008), le troisième décrit après *Australopithecus* et *Homo*.

Les deux autres hominidés du Miocène supérieur : *Ardipithecus kadabba* (Haile Selassie, 2001) et *Orrorin tugenensis* (Senut et al., 2001) appartiennent très probablement au même grade évolutif. Ceci a d'ailleurs été montré de manière magistrale par T. D. White et son équipe pour l'un d'entre eux, *Ardipithecus ramidus* (White et al., 1994) mis au jour à Aramis en Ethiopie et daté de 4.4 Ma : un hominidé par sa denture (canine petite et asymétrique, émail d'épaisseur intermédiaire,...), son crâne (foramen magnum en position antérieure) et sa locomotion de type bipède grimpeur avec un gros orteil complètement opposable, sans cambrure plantaire il devait marcher «pieds plats», ne pratiquait pas le knuckle-walking et fréquentait un environnement boisé (Lovejoy et al., 2009 a-e; Suwa et al., 2009 a-b; White et al., 1994 & 2009 a-b).

Grâce à l'ensemble de ces nouvelles découvertes il est donc maintenant parfaitement clair que le paléoscénario de la savane herbeuse originelle pour les préhumains bipèdes appartient définitivement à l'histoire de notre histoire.

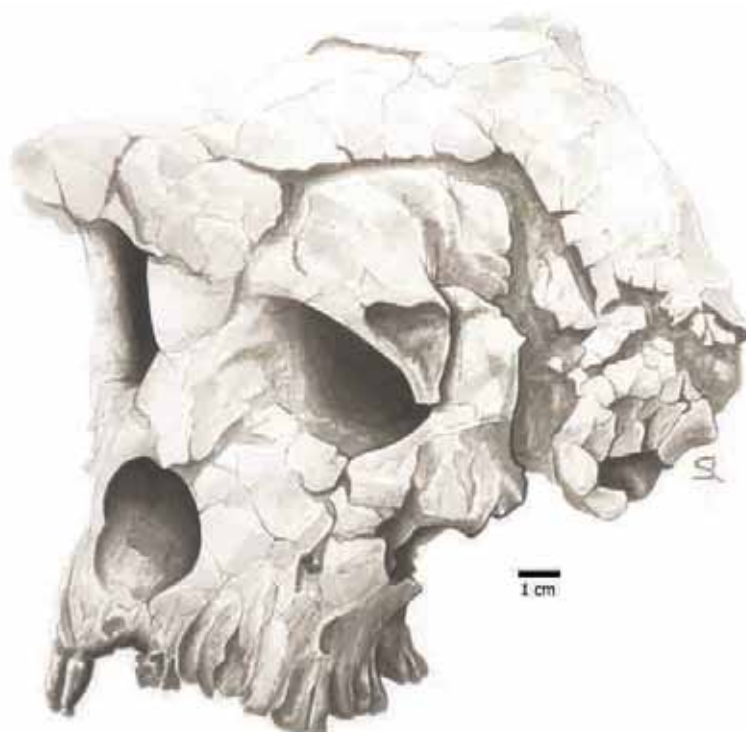


Fig.3 : *Sahelanthropus tchadensis* Brunet & al. 2002 (dit "Toumaï"): crâne, holotype de l'espèce.

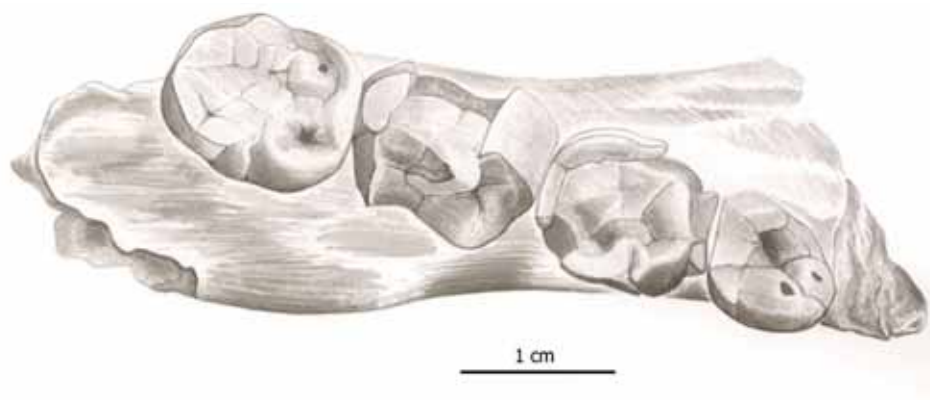


Fig.4 : *Sahelanthropus tchadensis* Brunet & al. 2002: hémi mandibule droite, paratype de l'espèce.

Avec les fossiles mis au jour depuis 1994 nous savons donc que ces premiers hominidés fréquentaient des paysages mosaïques et environnements boisés; et qu'ils n'étaient pas restreints à l'Afrique Australe et Orientale mais vivaient au contraire dans une zone géographique plus vaste incluant aussi l'Afrique Sahélienne : au moins l'Afrique centrale (Tchad) et probablement aussi l'Algérie, l'Egypte, la Libye, le Niger et le Soudan.

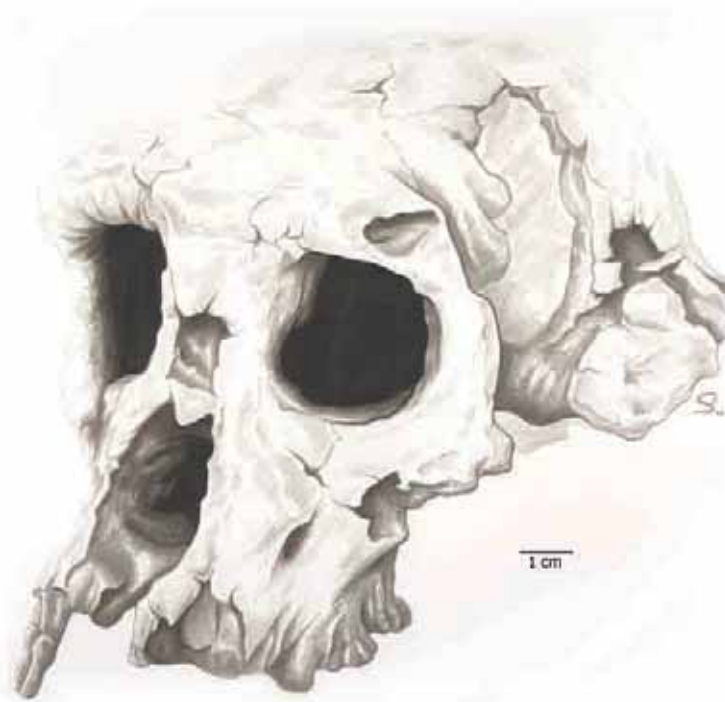


Fig.5 : Moulage stéréolithographique de la reconstruction 3D du crâne de Toumaï.

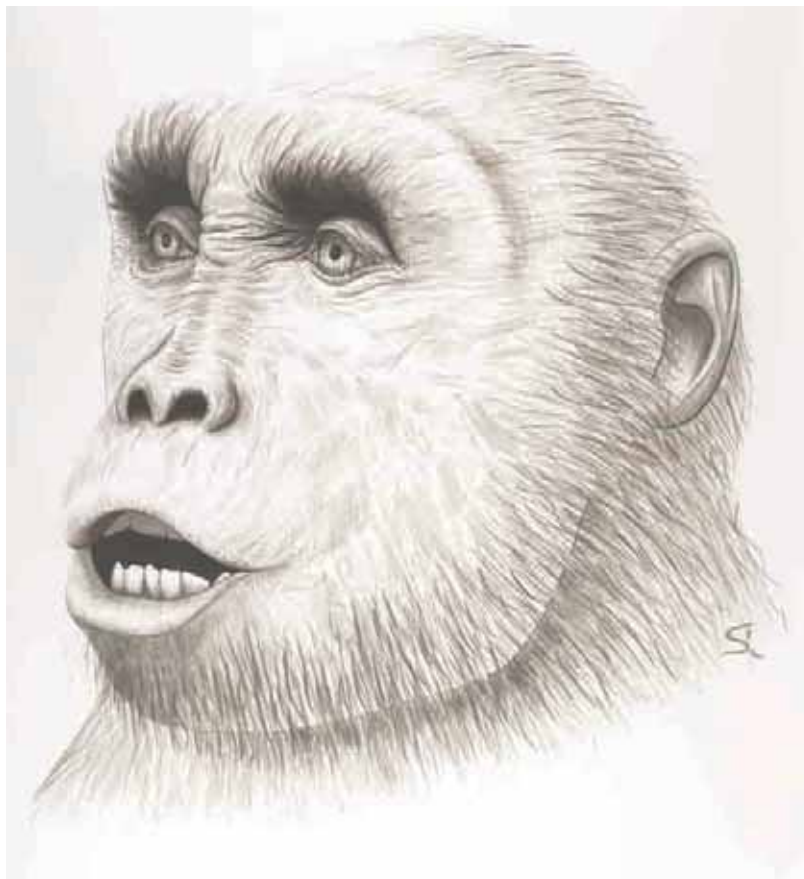


Fig.6 : Sculpture du buste de Toumaï (par Elisabeth Daynes).

UNE CONCLUSION PROVISOIRE

Les Hommes modernes, *Homo sapiens*, vont peupler l'ensemble de la Planète Terre à l'exception du continent Antarctique. Les plus anciens sont connus en Afrique autour de 200 Ka (White et *al.*, 2003) ils peupleront successivement le moyen Orient puis l'Europe (40 Ka) et l'Asie, l'Australie vers 40-60 Ka, mais n'occuperont le continent Américain que très tardivement (ca. 15-20 Ka) par la voie de l'Isthme de Béring.

Enfin entre 5 et 10 Ka ces Hommes modernes deviendront sédentaires, agriculteurs éleveurs, pour la première fois dans trois zones géographiques distinctes : Chine, Mésopotamie et Amérique du Sud.

Mais nous sommes tous des Africains (Brunet, 2016)... et ce sont des représentants de l'espèce *Homo erectus* qui ont été les premiers migrants et se sont déployés en Eurasie ...

En fonction de ces nouvelles données l'origine des hominidés anciens et leur histoire doivent être reconsidérées dans le cadre de nouveaux paradigmes.

Remerciements

Nous remercions : les Autorités Tchadiennes, Ministère de l'Education Nationale de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche; Université de N'Djamena/ Département de Paléontologie et Centre National d'Appui à la Recherche-CNAR; le Ministère Français de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche : UFR SFA, Université de Poitiers; Agence Nationale de la Recherche - Projet ANR 05-BLAN-0235; Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS : Institut INEE et programme ECLIPSE; Ministère des Affaires Etrangères (DCSUR, Paris et Projet FSP 2005-54 de la Coopération Franco-Tchadienne, Ambassade de France à N'Djamena); la Région Poitou-Charentes; le programme NSF : RHOI (USA); l'Armée Française (Mission d'Assistance Militaire et dispositif Epervier).

Nous remercions tous les membres de la Mission Paléoanthropologique Franco-Tchadienne; tous les Collègues et Amis qui ont participé à l'acquisition des données sur le terrain et/ou en Laboratoires; G. Florent et G. Reynaud pour la gestion administrative et financière du programme de recherche; X. Valentin pour la logistique, la préparation et le moulage des fossiles; l'iconographie est due au talent de S. Riffaut.

Références bibliographiques:

- (1) Brunet M., A. Beauvilain, Y. Coppens, E. Heintz, A.H.E. Moutaye, D. Pilbeam (1995). The first australopithecine 2 500 kilometres west of the Rift Valley (Chad). *Nature* 378: 273-274.
- (2) Brunet M., F.Guy, D.Pilbeam, H.T. Mackaye, A.Likius, D. Ahounta, A. Beauvilain, C.Blondel, H. Bocherens, J.-R. Boisserie, L.de Bonis, Y. Coppens, J. Dejax, C. Denys, Ph.Duringer, V. Eisenmann, G. Fanone, P. Fronty, D. Geraads, T. Lehmann, F. Lihoreau, A. Louchart, A. Mahamat, G. Merceron, G. Mouchelin, O. Otero, P. Campomanes, M. Ponce de Leon, J.-C. Rage, M. Sapanet, M. Schuster, J. Sudre, P. Tassy, X.Valentin, P. Vignaud, L. Viriot, A. Zazzo, C. Zollikofer (2002). A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa. *Nature* 418:145-151.
- (3) Brunet M., F. Guy, D. Pilbeam, D. E. Lieberman, A. Likius, H. T. Mackaye, M. Ponce de Leon, C. P. E. Zollikoffer, P. Vignaud (2005). New material of the Earliest Hominid from the Upper Miocene of Chad. *Nature* 434: 753-755.
- (4) Brunet M. (2006). D'Abel à Toumaï, Nomade Chercheur d'Os, Editions Odile Jacob, 15 Juin 2006.
- (5) Brunet M. (2008). Origine et Histoire des Hominidés...Nouveaux paradigmes.Leçon inaugurale du Collège de France, Fayard Editeur.
- (6) Brunet M.(2016) Nous sommes tous des Africains, Editions Odile Jacob, 219 p.
- (7) Coppens Y. (1983). Le singe, l'Afrique et l'Homme. *Jacob/Fayard Paris*.
- (8) Dart R. (1925) Australopithecus africanus, the man-ape of South Africa. *Nature* 115: 195-199.
- (9) Darwin Ch. (1859). On the origin of species by Means of Natural Selection, London John Murray, 1859. Reprinted, Everyman edition, 1928, New York: Dutton.
- (10) Darwin Ch. (1871) The Descent of Man and Selection in Relation to Sex, 1871. Reprinted, Princeton University Press, 1981.

- (11) Haile-Selassie, Y. (2001) Late Miocene hominids from the Middle Awash, Ethiopia. *Nature* 412: 178-181.
- (12) Jaeger, J.-J. & al. (1999) A new primate from the middle Eocene of Myanmar and the Asian early origin of anthropoids. *Science* 286; 5439:528-530.
- (13) Lebatard A.E., D.L. Bourles, Ph. Düringer, M. Jolivet, R. Braucher, J. Carcaillet, M. Schuster, N. Arnaud, P. Monié, F. Lihoreau, A. Likius, H.T. Mackaye, P. Vignaud, M. Brunet (2008). Cosmogenic nuclide dating of *Sahelanthropus tchadensis* and *Australopithecus bahrelghazali*: Mio-Pliocene hominids from Chad. *PNAS* 105 (9): 3226–3231.
- (14) Lebatard A.E., D.L. Bourles, R. Braucher, M. Arnold, Ph. Düringer, M. Jolivet, A. Moussa, P. Deschamps, C. Roquin, J. Carcaillet, M. Schuster, F. Lihoreau, A. Likius, H.T. Mackaye, P. Vignaud, M. Brunet (2010). Application of the authigenic $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ dating method to continental sediments: Reconstruction of the Mio-Pleistocene sedimentary sequence in the early hominid fossiliferous areas of the northern Chad Basin. *EPSL*, 297, 2010, 57-70.
- (15) Lovejoy C.O. (2009 a) Reexamining Human Origins in Light of *Ardipithecus ramidus*. *Science* 326: 74e1-74e8.
- (16) Lovejoy C.O., S. W. Simpson, T. D. White, B. Asfaw, G. Suwa (2009 b) Careful Climbing in the Miocene: The Forelimbs of *Ardipithecus ramidus* and Humans Are Primitive. *Science* 326: 70e1-70e8.
- (17) Lovejoy C.O., G. Suwa, L. Spurlock, B. Asfaw, T. D. White (2009 c) The Pelvis and Femur of *Ardipithecus ramidus*: The Emergence of Upright Walking. *Science* 326: 71e1-71e6
- (18) Lovejoy C.O., B. Latimer, G. Suwa, B. Asfaw, T. D. White (2009 d) Combining Prehension and Propulsion: The Foot of *Ardipithecus ramidus* *Science* 326: 72e1-72e8.
- (19) Lovejoy C.O., G. Suwa, S. W. Simpson, J.H. Matternes, T. D. White (2009 e) The Great Divides: *Ardipithecus ramidus* Reveals the Postcrania of Our Last Common Ancestors with African Apes. *Science* 326: 100-106.
- (20) Senut B., M. Pickford, D. Gommery, P. Mein, K. Cheboi, Y. Coppens (2001). First hominid from the Miocene (Lukeino formation, Kenya). *C R Acad Sci Paris* 332: 137-144.
- (21) Suwa G., B. Asfaw, R.T. Kono, D. Kubo, C. O. Lovejoy, T. D. White (2009 a) The *Ardipithecus ramidus* Skull and Its Implications for Hominid Origins. *Science* 326: 68e1-68e7.
- (22) Suwa G., R.T. Kono, S. W. Simpson, B. Asfaw, C. O. Lovejoy, T.D. White (2009 b) Paleobiological Implications of the *Ardipithecus ramidus* Dentition *Science* 326: 94-99.
- (23) Vignaud P., Ph. Düringer, H.T. Mackaye, A. Likius, C. Blondel, J.R. Boissérie, L. de Bonis, V. Eisenmann, D. Geraads, F. Guy, T. Lehmann, F. Lihoreau, N. Lopez-Martinez, C. Mourer-Chauvire, O. Otero, J.C. Rage, M. Schuster, L. Viriot, A. Zazzo, M. Brunet (2002). Geology and palaeontology of the Upper Miocene Toros-Menalla hominid locality, Chad, *Nature* 418: 152-155.

- (24) White T.D., G. Suwa, & B. Asfaw (1994). *Australopithecus ramidus*, a new species of hominid from Aramis, Ethiopia. *Nature* 371:306-312.
- (25) White T.D., B. Asfaw, D. DeGusta, H. Gilbert, G.D. Richards, G. Suwa, & F. Clark Howell (2003). Pleistocene *Homo sapiens* from Middle Awash, Ethiopia. *Nature* 423: 742-747.
- (26) White T.D., B. Asfaw, Y. Beyene, Y. Haile-Selassie, C. O. Lovejoy, G. Suwa, G. WoldeGabriel (2009 a). *Ardipithecus ramidus* and the Paleobiology of Early Hominids. *Science* 326: 65-86.
- (27) White T.D., S. H. Ambrose, G. Suwa, D. F. Su, D. DeGusta, R. L. Bernor, J-R Boissérie, M. Brunet, E. Delson, S. Frost, N. Garcia, I. X. Giaourtsakis, Y. Haile-Selassie, F. Clark Howell, Th. Lehmann, A. Likus, C. Pehlevan, H. Saegusa, G. Semprebon, M. Teaford, E. Vrba (2009 b). Macrovertebrate Paleontology and the Pliocene Habitat of *Ardipithecus ramidus*. *Science* 326: 87-93.
- (28) Zollikofer C.P.E., Ponce de León M.S., Lieberman D.E., Guy F., Pilbeam D., Likus A., Mackaye H.T., Vignaud P. & Brunet M. (2005). Virtual Cranial Reconstruction of *Sahelanthropus tchadensis*. *Nature* 434: 755-759.

NB: Tous les dessins sont dus au talent de Sabine Riffaut, dessinatrice à l'IPHEP, UMR CNRS 7262 de l'Université de Poitiers, France.

Séance I :
SCIENCES DE LA MATIÈRE

LES DÉFIS DE LA PHYSIQUE

Pr. Catherine BRÉCHIGNAC

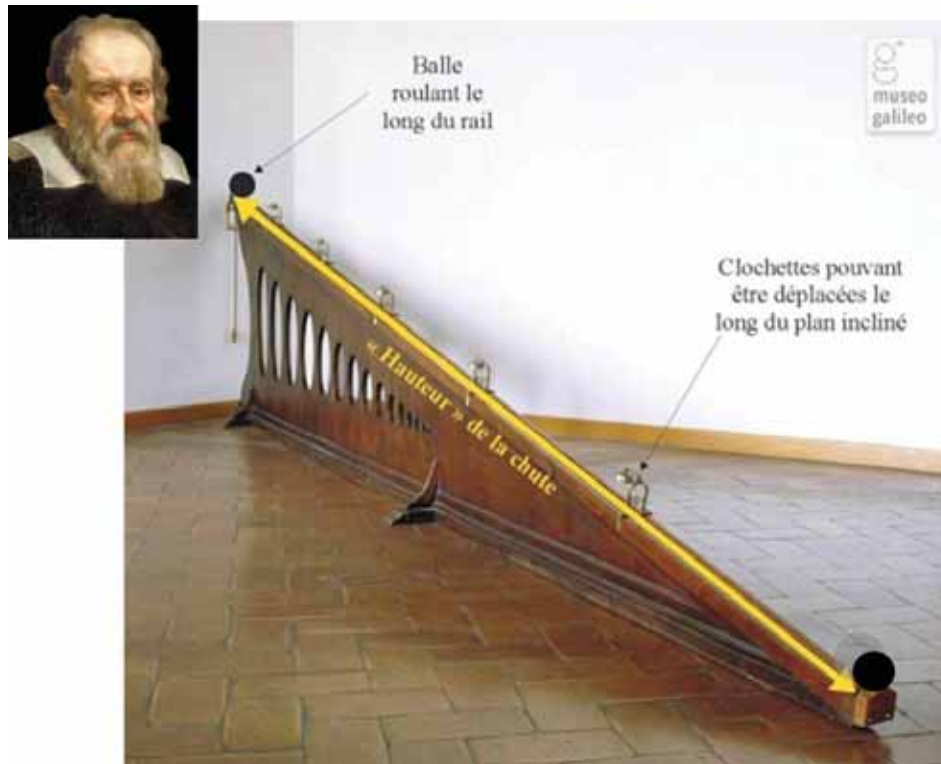
Secrétaire Perpétuel, Académie des Sciences, France

*Membre Associé de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*



Tout d'abord, bon anniversaire à votre Académie qui a dix ans et qui célèbre, à **cette édition**, ses dix ans de son installation. Vous avez choisi le thème «la sciences dans tous ces états». C'est ainsi que Monsieur le Secrétaire perpétuel m'a demandé de parler de la physique. Alors parler de la physique au bout d'une demi-heure me paraît très difficile, donc j'ai choisi de le faire d'une manière très synthétique des défis de la physique d'aujourd'hui.

Tout d'abord, qu'est ce que la physique? Le mot 'physique' vient d'un dérivé du mot grec « $\Phi\upsilon\varsigma$ » qui, au sens du grec ancien, veut dire nature, l'adjectif « $\Phi\upsilon\varsigma\iota\kappa\omicron\varsigma$ » signifie qui concerne la nature. Et puis, au XII^{ème} siècle, on voit arriver le mot 'fisque' en écriture latine qui a deux sens : *médecin* et puis aussi *connaissance des choses de la nature*. Alors le mot médecin restera 'physician' en anglais, et nous, nous gardons 'fisque' pour la nature. Ensuite, au XVII^{ème} siècle, le mot physique désigne les *connaissances concernant les causes naturelles*. On peut donc déjà voir arriver *les causes*. En 1932, le mot 'physique' aura la définition que nous utilisons aujourd'hui et que l'on retrouve d'ailleurs dans le dictionnaire de l'Académie française : «*la physique est la science qui observe et groupe les phénomènes du monde matériel, en vue de dégager les lois qui les régissent*». Et ceci était déjà contenu dans la célèbre phrase de Galilée : «*les lois de la nature s'écrivent en langage mathématique*». Alors, Galilée a effectivement été le premier scientifique, si je peux dire, de la science contemporaine puisqu'il a été le premier à comparer des théories et des expériences : la première **a été la chute** des masses sur un plan incliné et il a montré que **la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps du parcours**. En fait, c'était la première comparaison des théories et des expériences.



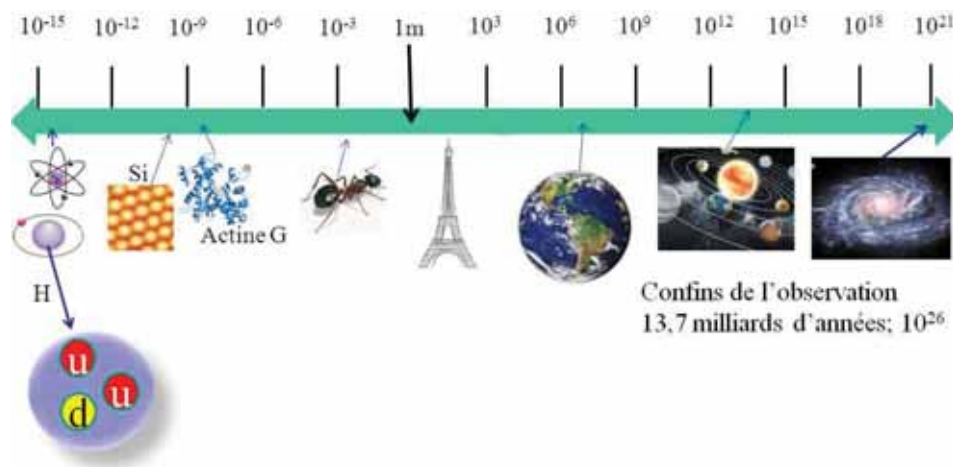
Expérience de Galilée : la chute des masses sur des plans inclinés

Ensuite, on a eu Isaac Newton, né lorsque Galilée meurt, qui a repris les idées de Galilée mais il a surtout compris que la chute des objets sur la terre et les mouvements des corps célestes **étaient** gouvernés par la même loi, qui est celle de l'attraction universelle: **la force est égale au produit des masses divisée par la carré de la distance**. Et ceci restera toujours vrai dans certaines approximations, mais au fond elle changera au début du 20^{ème} siècle.

Alors, **«les forces sont inversement proportionnelles au carré de la distance D»** ont eu un très grand succès puisque Coulomb a montré qu'en électricité, on avait aussi les forces qui sont inversement proportionnelles au carré de la distance séparant deux corps chargés. Aussi, on a Ampère qui a montré que c'était pareil pour le magnétisme. Mais aussi, entre Coulomb et Ampère, on a eu Young qui a mis en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Et c'est Maxwell qui a réuni les trois en écrivant la théorie des ondes électromagnétiques, qui a inventé le concept du champ, et qui donc a donné une certaine solidité **aux ondes électromagnétiques** en disant que finalement, tout est **dû au mouvement des électrons**. Donc cela est resté du solide jusqu'au début du 20^{ème} siècle où on est parti avec ces bases là.

Alors, le 20^{ème} siècle, c'est le siècle des deux infinis. En effet, si vous partez d'un mètre dans le système universel de l'unité de longueur, vous descendez en longueur, vous trouvez : la fourmi qui fait trois millimètres, l'actine, qui est une protéine, qui fait dans les dix nanomètres, l'atome de silicium, qui est représenté ici et qu'on voit en microscopie

STM, qui fait quelques dixièmes de nanomètres. Et ceux-ci, on peut les voir soit à l'œil nu, soit au microscope. Ensuite, si on veut descendre plus bas, il faut utiliser des effets comme les collisions permettant de voir que la taille d'un noyau d'atome est de l'ordre de mètre, c'est-à-dire un fermi. Le plus petit de ces atomes, c'est l'atome d'hydrogène dont le proton, qui est le seul nucléon placé au centre, est formé de trois quarks : deux up et un down. Ce qui nous permet d'ailleurs de descendre jusqu'à 10^{-15} et 10^{-18} mètre.

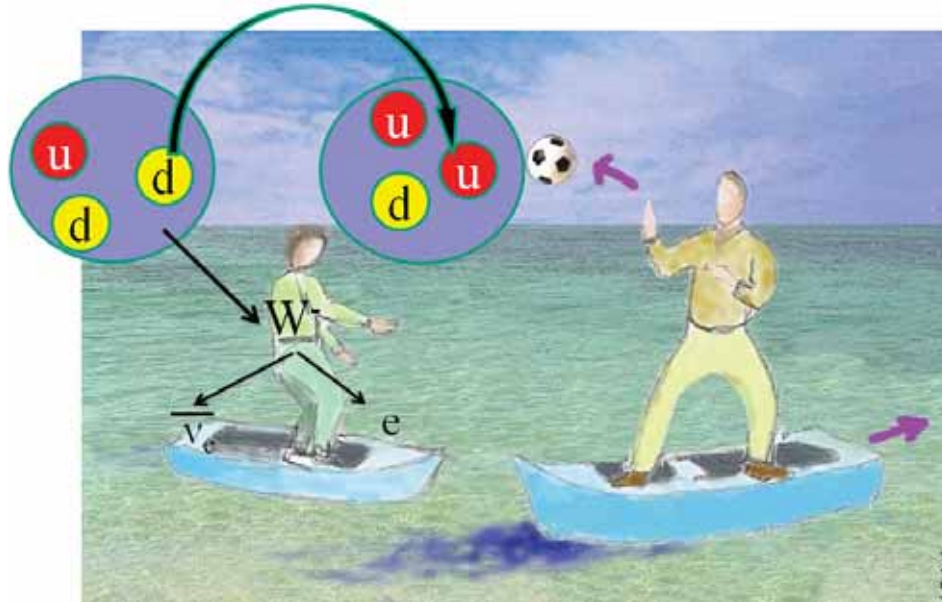


Le système universel de l'unité de longueur

De l'autre côté, on a la tour Eiffel qui est pour moi une unité de longueur puisque je suis française, ensuite la terre qui fait 6000 km, et puis le système solaire qui a six heure-lumière de grandeur de plus, et puis la galaxie dans laquelle nous vivons et qui fait 10^{21} mètres. Et quand on va aux confins de l'observation, et qu'on regarde depuis 13,7 milliards d'années-lumière dans l'univers, on voit donc que ça va jusqu'à 10^{26} mètres.

Donc là, on a quarante ordres de grandeurs entre les petits et les grands, qui sont régis par quatre forces ou interactions. Alors, au noyau, on a les forces d'interaction forte et électromagnétique. Les forces d'interaction forte sont faites par échange de gluons, c'est-à-dire quand vous avez deux quarks qui se rapprochent l'un de l'autre, s'ils se touchent, la force est alors nulle mais quand vous les écartez, la force croît, ce qui maintient donc la cohésion des noyaux, des protons et des neutrons. Pour comprendre la stabilité des protons et des neutrons, on a mis en évidence une force d'interaction faible qui, en fait, est une force un petit peu différente, et qui agit par transmutation. En effet, la transmutation est comme si vous aviez deux hommes, chacun dans un bateau, qui s'envoient un ballon : le ballon, c'est le boson intermédiaire. Et ensuite, au fur et à mesure que les bateaux s'éloignent, et au bout d'un moment, le boson tombe à l'eau et les particules sont séparées. C'est ainsi qu'on a mis en évidence la **radioactivité bêta** qui montre la transmutation d'un neutron en proton par l'intermédiaire d'un boson en émettant un électron et un neutrino. Donc, on a ainsi les forces du noyau qui sont des forces d'une très courte portée, de l'ordre d'un fermi. De l'autre côté, on a des forces qui sont à très longue portée, à portée infinie, à savoir les forces électromagnétiques qu'on retrouve dans les noyaux et

dans tous ce qui nous entoure, parce que toute la chimie et la physique macroscopique sont dues aux forces électromagnétiques, puis la force de la gravitation.

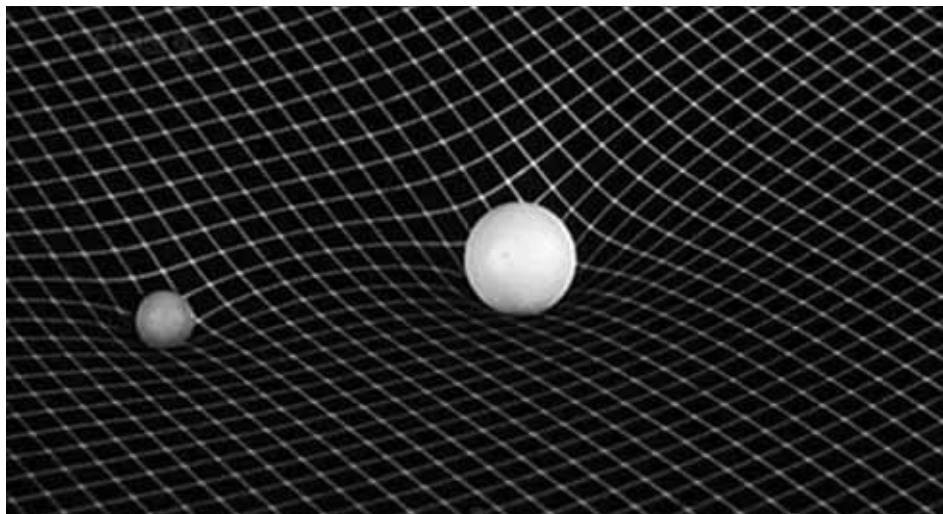


Interaction faible agit sur les quarks par transmutation

Quand on est 1 pour la force d'interaction forte, la force d'interaction faible, c'est 10^{-5} , la force électromagnétique c'est 10^{-2} , mais la gravitation, c'est 10^{-39} . Comme vous voyez, vous avez aussi quarante ordres de grandeur entre les forces, le même entre les ordres de grandeurs que vous avez dans les longueurs.

Alors ces lois de la physique sont supposées être invariantes par changement de référentiel inertiel. Et c'est ça qui a été toute la révolution à laquelle on a envie d'arriver. Maxwell a démontré qu'il existait une vitesse limite. Or, et selon Poincaré, s'il existe une vitesse limite, nous ne savons pas à quelle vitesse nous sommes emportées. Si les lois de la physique sont valables dans tous les référentiels et qu'il y a une vitesse limite, alors cela pose un problème! Einstein a donc proposé de prendre la vitesse constante et de regarder ce que ça donne. Alors, regardons la différence dans la relativité restreinte : on suppose que les référentiels suivent un mouvement rectiligne uniforme et le calcul est relativement simple. Mais le monde reste euclidien.

C'est alors que plus tard, Einstein a postulé que toutes les lois de la physique sont invariantes dans tous les référentiels quels que soient leurs mouvements, ce qui fait que dans ce cadre là, on est obligé d'avoir un espace courbe avec l'espace et le temps qui sont liés. La figure suivante, prise de *Clear Science*, représente bien ce qui se passe avec la terre qui se déplace en géodésique autour du soleil. Et c'est ainsi que l'on arrive à comprendre les interactions qui nous entourent. Alors, évidemment ces interactions, ou forces, sont en mouvement, et si on continue plus loin dans la relativité générale, elles induisent des ondes gravitationnelles.

**Déformation de l'espace temps et gravité**

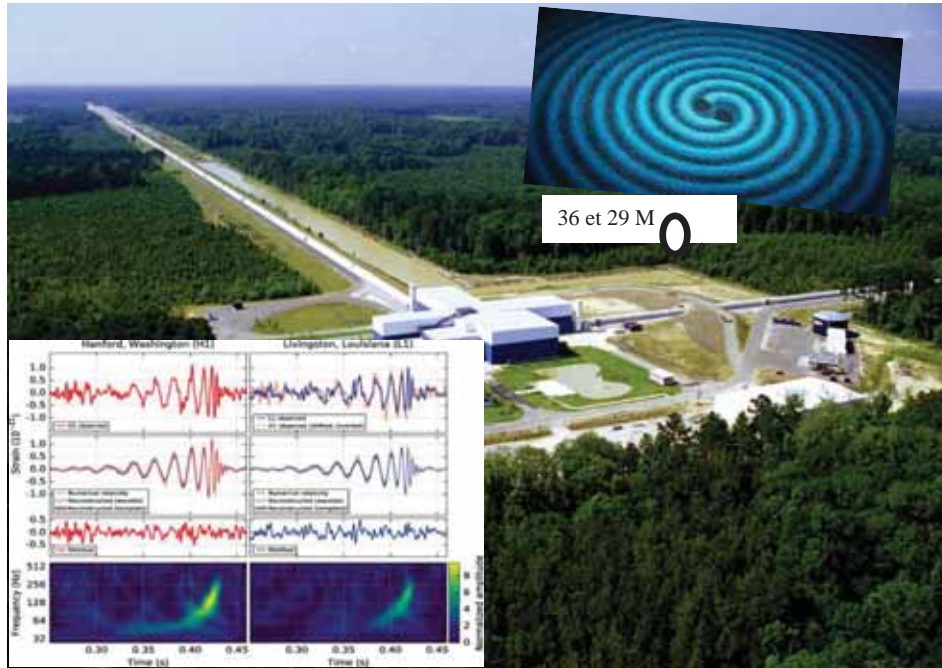
(Crédits : Clear Science)

Les ondes gravitationnelles sont induites par toute matière en mouvement. Alors évidemment, si vous vous levez pour embrasser le voisin, si vous l'aimez, vous allez induire des ondes gravitationnelles mais qui sont extraordinairement petites parce que cette onde fait 10^{-37} fois une force électromagnétique. Donc personne ne la verra jamais et vous pouvez être tranquilles. Mais si vous voulez voir ces ondes gravitationnelles, il faut des événements extrêmement importants. Alors, depuis une cinquantaine d'années, les physiciens se sont mis à chercher comment ils pourraient voir ces ondes gravitationnelles venant de masses gigantesques qui rentrent en collisions dans l'univers, et ils ont créé pour cet objectif trois observatoires.

Il y a l'observatoire VIRGO, qui est un projet franco-italien, situé près de pise, et puis aussi deux observatoires du projet LIGO aux Etats Unis : le premier sur la côte Est et le deuxième sur la côte Ouest. Ainsi, ces observatoires permettent de mesurer une onde gravitationnelle qui arrive et qui déforme l'espace temps. Alors pour arriver à voir un signal, il faut mesurer avec précision deux bras de 4 km de long avec une précision de 10^{-21} cm, ce qui a pris énormément de temps et beaucoup de technologie. Finalement, il y a quelques mois, en septembre 2015, est arrivée sur ces détecteurs une onde gravitationnelle qui nous venait de 1,2 milliards d'années. Cette onde a été détectée par les antennes des observatoires LIGO, alors que malheureusement elle n'a pas été détectée par le détecteur VIRGO, vu qu'il a été en réfection. Cette onde gravitationnelle détectée est arrivée comme étant due à la collision de deux trous noirs. Alors, si vous regardez le signal dans la publication, vous voyez le signal avec évidemment du bruit. En ordonnée, vous voyez la déformation de l'espace entre les deux bras et elle mesure 10^{-21} .

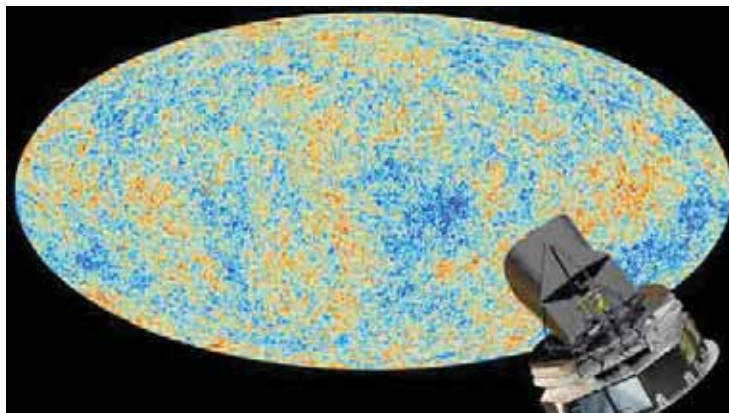
Ainsi, l'onde arrive entre les deux antennes de l'interféromètre avec la vitesse de la lumière, et la différence de longueur entre les deux parcours permet l'apparition du signal correspondant à cette onde gravitationnelle. En bas, vous avez le calcul qui montre que cette onde vient de la fusion de deux trous noirs ayant l'un 29 et l'autre 36 masses

solaires, plus ou moins quelques masses solaires. Ensuite, en bas, vous avez la fréquence, et vous voyez que ce paquet d'ondes arrive avec une fréquence qui fait de l'ordre de 300 Hz, ce qui correspond à des longueurs d'onde de l'ordre de 8 km.



Observatoire VIRGO près de Pise

Voilà, cela était un succès absolument extraordinaire parce que ça nous ouvre une nouvelle fenêtre pour comprendre la matière. En effet, jusqu'ici, on avait vu que l'observation par satellite Planck nous montre 5% de la matière, mais avec les ondes gravitationnelles, on va pouvoir observer plus dans l'univers.



Observation par satellite Planck

Mais qu'est ce que la matière? Alors, si vous retournez tout à fait de l'autre côté de la droite que je vous ai montrée tout à l'heure, vous allez au plus petit grain de la matière qui existe qui est l'atome d'hydrogène. Je rappelle que l'atome d'hydrogène est fait d'un proton formé de trois quarks (2 up et 1 down) et un électron qui tourne autour avec une fréquence de 150 attosecondes, et on espère voir le mouvement des électrons sur une orbite qui est fois la taille du proton, c'est-à-dire que c'est quand même beaucoup de vide. Et on voit aussi que le rapport des masses est de 1876. En fait, quand on regarde la masse du proton, on se dit que c'est très facile car puisqu'on a trois quarks, et donc chaque quark attire de la masse. Et bien pas du tout ! Chaque quark tient quelques pourcents de la masse du proton, c'est-à-dire que la masse du proton est essentiellement due aux interactions. Autrement dit, on a un univers vide avec de la matière vide, et qui est composé de quatre particules **élémentaires** stables; il y en a douze mais il y en a quatre qui sont stable **à savoir : l'électron, les deux quarks et le neutrino. Et c'est ça** qui forme tout l'ensemble de l'univers. Bon, voilà ce qu'on a à la fin du 20^{ème} siècle.

Maintenant, le 20^{ème} siècle a été aussi un siècle des révolutions quantiques. En effet, à partir de l'analyse des lois du rayonnement du corps noir, Planck propose que les photons sont émis ou absorbés par paquets : les quantas. Alors si je reviens à ce qui se passe pour les photons, on regarde qu'en 1801, il y a eu Young qui a mis en évidence les interférences lumineuses. Donc pendant 100 ans, on a pensé que le photon n'était qu'une onde. En 1900, Planck montre par l'effet photoélectrique que le photon est aussi une particule. Bon, on s'est dit que ça, c'est pour les photons. Ensuite, Thomson prouve en 1897 expérimentalement l'existence des électrons, et De Broglie en 1923 dit que l'électron en mouvement est aussi associé à une onde. Mais ce sont Davisson et Germer qui ont mis en évidence les ondes associées aux électrons, et maintenant tout le monde utilise ça. Ainsi, on distingue deux utilisations de cette dualité, à savoir: le microscope électronique avec l'électron et le microscope protonique avec le proton.

Dualité onde corpuscule



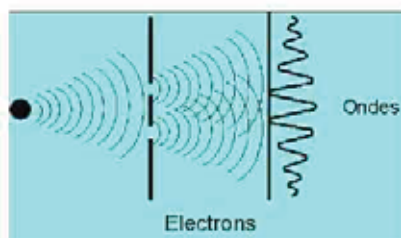
•1801, Thomas Young met en évidence des interférences lumineuses en faisant passer un faisceau lumineux entre deux fentes

•1900 Max Planck propose les quanta vérifié par l'effet photoélectrique

•1897, Joseph John Thomson prouve expérimentalement l'existence des électrons

•1923 Louis de Broglie postule qu'un électron en mouvement est associé à une onde ($\lambda = h/mv$)

•1925 Clinton Davisson met en évidence les ondes associées aux électrons. Les électrons émis par une source, sont accélérés puis envoyés sur un cristal dont l'alignement atomique joue le rôle des fentes dans l'expérience de Young.

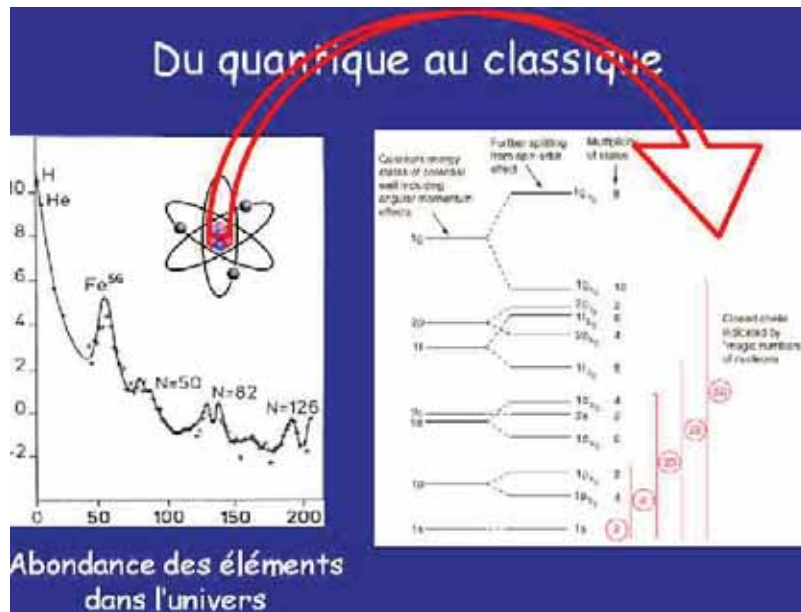


Après avoir compris qu'on avait une vérité onde-corpuscule, on s'est intéressé aux particules quantiques. Toute la physique quantique est une physique absolument contre-intuitive, c'est-à-dire qu'en fait, on ne peut connaître à la fois avec précision la position et la vitesse d'une particule quantique. En effet, on doit admettre qu'une particule quantique va se comporter tantôt comme un objet ponctuel, tantôt comme une onde, en fonction du dispositif expérimental choisi. Et ça c'est très étonnant parce que la particule ne sait pas quel moyen on utilise pour l'observer? Et ensuite, la chose la plus embêtante, enfin je dirai la plus étonnante, c'est le principe de la non-localisation. Ce principe a fait réfléchir beaucoup de savants comme Einstein, Podolsky et Rosen, qui ont fait des expériences de pensée pour essayer de comprendre pourquoi deux particules qui sont intriquées, ce qui signifie qu'elles ont des propriétés corrélées, gardent cette corrélation et ce, quelle que soit la distance entre les particules.

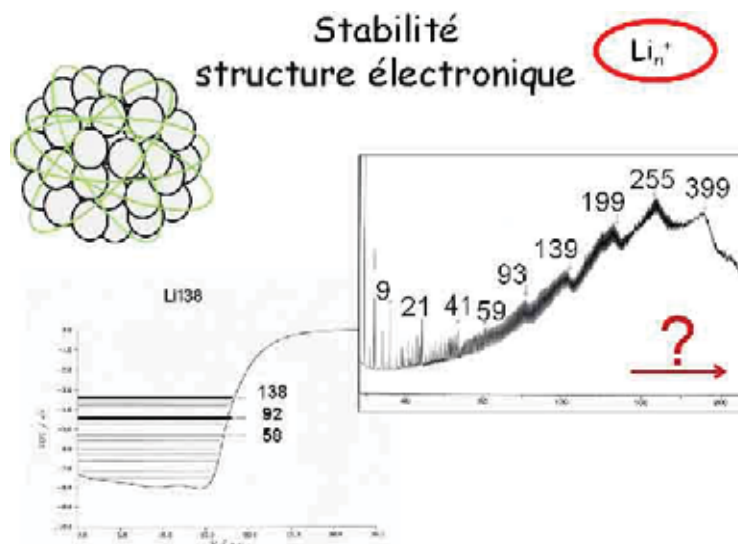
Si vous prenez par exemple deux particules, que vous les intriquez, que vous les séparez, alors si vous excitez une particule, instantanément l'autre va aussi être «infectée»? Cela veut dire que l'information peut circuler extrêmement vite, sans vitesse d'ailleurs, d'un endroit à un autre, c'est ce qui s'appelle l'intrication, c'est-à-dire que les deux particules, en fait, ne forment qu'un objet quantique. Et ça, c'est tout ce qui va arriver dans l'ordinateur quantique, c'est-à-dire que maintenant on va être capable de pouvoir ouvrir des informations sans vitesse, je veux dire instantanément, d'un endroit à un autre. Ce qui va faire des vitesses de calcul extrêmement grandes pour les ordinateurs quantiques.

Alors, on peut se poser la question, quelle est la distance maximale? Et jusqu'ici, on a deux records, un record pour les photons qui est d'environ 144 km et un record pour les électrons qui est de 2 km, et qui est fait par un ami à Stanford. Alors, l'autre propriété, qui est d'admettre qu'une particule va se comporter tantôt comme un objet «ponctuel», tantôt comme une onde, a été mise en évidence, et on a montré que ce n'était pas «ou» mais «et», c'est-à-dire qu'une particule était à la fois une particule et une onde. Et ceci a été montré justement grâce à l'intrication par deux expériences : une faite à Princeton et l'autre à Nice. Ces expériences montrent que lorsque vous séparez deux photons intriqués, et qu'en les mesurant simultanément par deux méthodes différentes, vous montrez ainsi qu'ils sont à la fois onde et particule. Bon, ce sont de nouvelles possibilités des révolutions quantiques qui ouvrent des perspectives énormes.

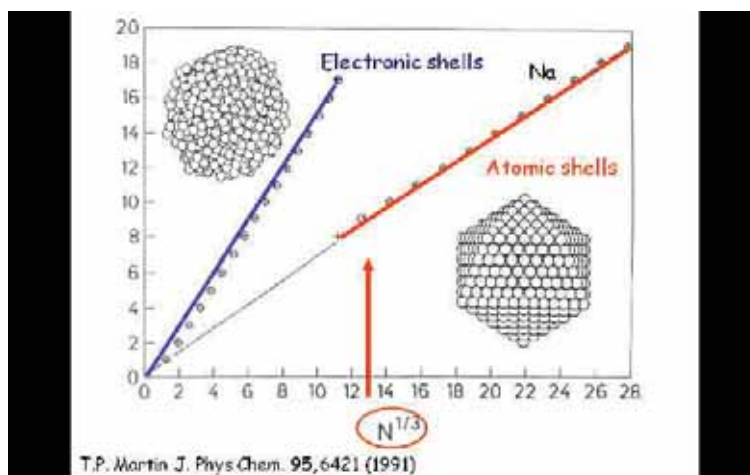
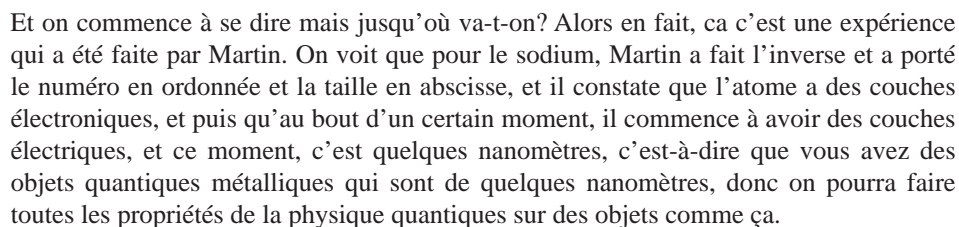
Alors, maintenant la dernière partie concerne «la norme». Quand est-ce que, et jusqu'à quelle taille, une particule peut être quantique? Mais aussi, après, comment elle devient classique? C'est-à-dire que le nombre de composants est tel que finalement, on n'arrive plus à installer de la cohérence? Alors pour ça, il faut avoir un moyen de regarder rapidement si une particule est quantique ou pas? Et à tel point que, quand vous l'utilisez, c'est faire ce qui est fait dans les noyaux. C'est-à-dire quand vous regardez l'importance des éléments dans l'univers, vous voyez que sur une décroissance, vous avez des pics qui sont dus à un modèle en couche des fermions des noyaux. Et vous voyez, par exemple le Fe56, ces deux couches fermées de 30 neutrons et de 26 protons, ce qui fait que le fer est particulièrement stable.



Donc on a utilisé cette idée de stabilité pour regarder des agrégats métalliques avec des électrons qui sont libres à l'intérieur du métal. Les électrons étant des fermions devraient avoir des couches un peu plus similaires à celles qui sont dans les noyaux. Donc la chose qu'on a en fait, c'est de former des agrégats du lithium, de les ioniser, de les chauffer, laisser s'évaporer et ensuite regarder le spectre de masse et l'intensité dans le spectre de masse. Alors, quand on fait ça, voilà ce qu'on obtient pour le lithium (figure), c'est-à-dire qu'on observe des couches, et on se demande jusqu'au où on va pouvoir observer ses agrégats quantiques? Alors si on fait le calcul pour le lithium par exemple, on trouve effectivement que les couches des agrégats 58, 92, 138, et c'est exactement ce qu'on voit sur le spectre de masse à un électron près, évidemment puisqu'on a pris des ions.



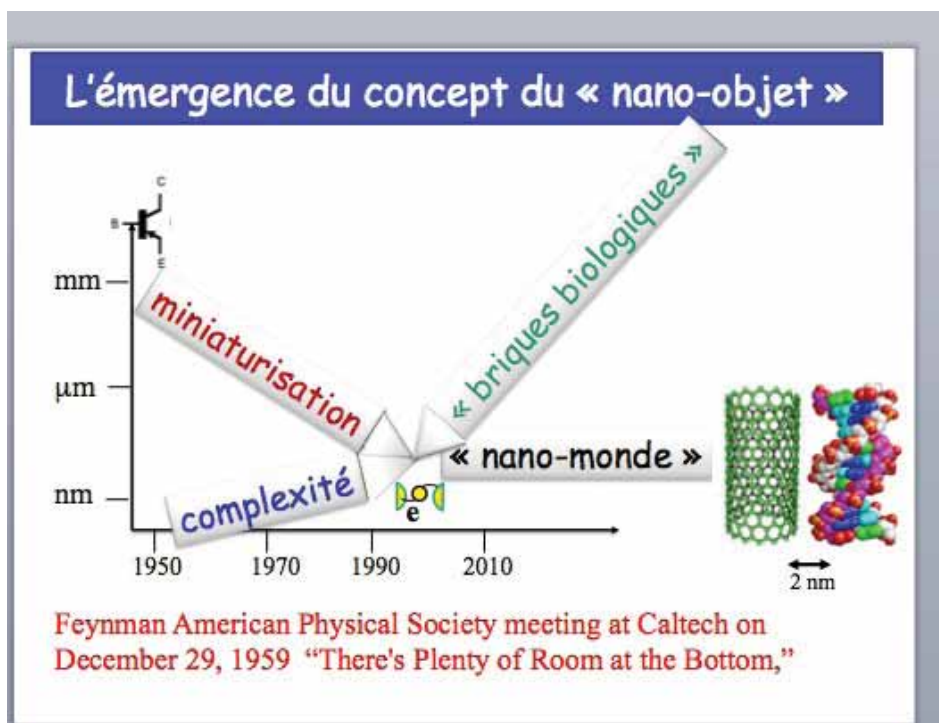
Electronic shells in lithium clusters



Alors, ça nous a permis de comprendre que c'était une urgence le concept du nano-objet, c'est-à-dire que si vous portez en ordonnée la taille de l'objet et l'année à laquelle on a commencé à chercher les choses de plus en plus petites, vous voyez la miniaturisation qui est arrivée.

En effet, en 1947, on a trouvé le transistor qui est presque une porte : donc, on avait un courant qui passait de l'émetteur au collecteur; et tout allait bien et on pouvait ouvrir et fermer la porte. On a après diminué la taille du transistor jusqu'à arriver à des tailles pour lesquelles ça ne marchait plus car il y avait ce qu'on appelait le blocage de Coulomb.

Alors à ce moment là, on a compris que lorsque le transistor devenait quantique, et qu'il fallait faire passer les électrons un à un, alors c'est là toute l'ouverture de l'électronique quantique. Et ça c'est pour des tailles qui font quelques nanomètres, exactement ce que l'on voit quand on regarde la complexité dont j'ai parlée précédemment pour faire croître la taille de l'agrégat et vous arrivez aussi à passer du quantique au classique pour quelques nanomètres. Mais ce point, ou cette région de quelques nanomètres, correspond exactement à la taille des briques biologiques, c'est-à-dire que si vous comparez un nanotube de carbone à une molécule d'ADN, vous voyez que ce sont des tailles tout à fait comparable, et c'est aujourd'hui ce qu'on appelle, plus au moins, joliment le nano-monde. Et je pense qu'on va pouvoir entendre par la suite des exposés sur ce sujet.



Alors si je reviens à ma conclusion, je peux dire qu'il y a, à mon avis, **trois grands défis dans la physique** :

- la physique des infinis, et qui nécessite des technologies toujours plus performantes, parce que sans technologie on n'aura jamais trouvé ce qu'on a trouvé, et jamais comprendre ce qu'on a compris;
- on a la physique quantique, qui après être restée longtemps dans le domaine scientifique et considérée par beaucoup comme une curiosité, est devenue depuis une vingtaine d'années une extraordinaire source de rupture technologique. Le microprocesseur, le laser, le GPS, le stockage numérique de l'information, enfin tout ce que vous avez comme vos **téléphones portables, n'existerait** pas sans la compréhension des objets quantiques. Et maintenant, on va arriver à l'ordinateur quantique;
- et puis le troisième défi, c'est entre classique et quantique : les nanos, et qui sont à l'interface avec la chimie et les sciences du vivant. Donc la science, si je peux dire, continue de progresser extraordinairement vite, la physique et toute la science en général, et toute la difficulté aujourd'hui, c'est que l'écart entre ceux qui comprennent et qui savent et ceux qui ne savent pas ne fait que croître. Et au bout d'un moment, on n'arrivera plus à communiquer entre nous. Et ça, c'est une source de violence.

Je vous remercie

CHIMIE ET BIOLOGIE : QUELLES NOUVELLES FRONTIÈRES ?

Pr. Marc FONTECAVE

Professeur au Collège de France

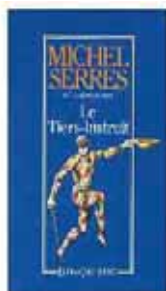
*Laboratoire de Chimie des Processus Biologiques,
UMR 8229 Collège de France - CNRS -
Université Pierre et Marie Curie*



Chimie et Biologie: quelles nouvelles frontières ?

Marc Fontecave

Laboratoire de Chimie des Processus Biologiques, UMR 8229 CDF/
CNRS/UPMC
Collège de France, 11 Place Marcelin Berthelot, 75231 Paris Cedex 05
marc.fontecave@college-de-france.fr; Phone: (0033)144271360



*« Le corps qui traverse apprend certes un second monde,
celui vers lequel il se dirige, où l'on parle une autre langue,
mais il s'initie surtout à un troisième, par où il transite »*

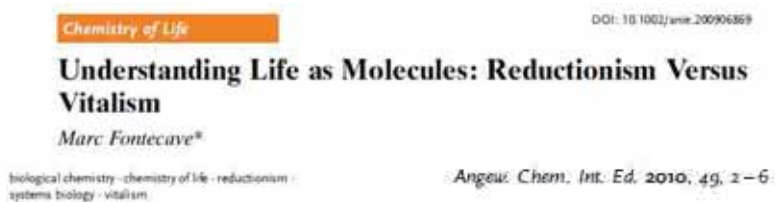
Les défis globaux de la société:
La **chimie** au cœur des solutions scientifiques

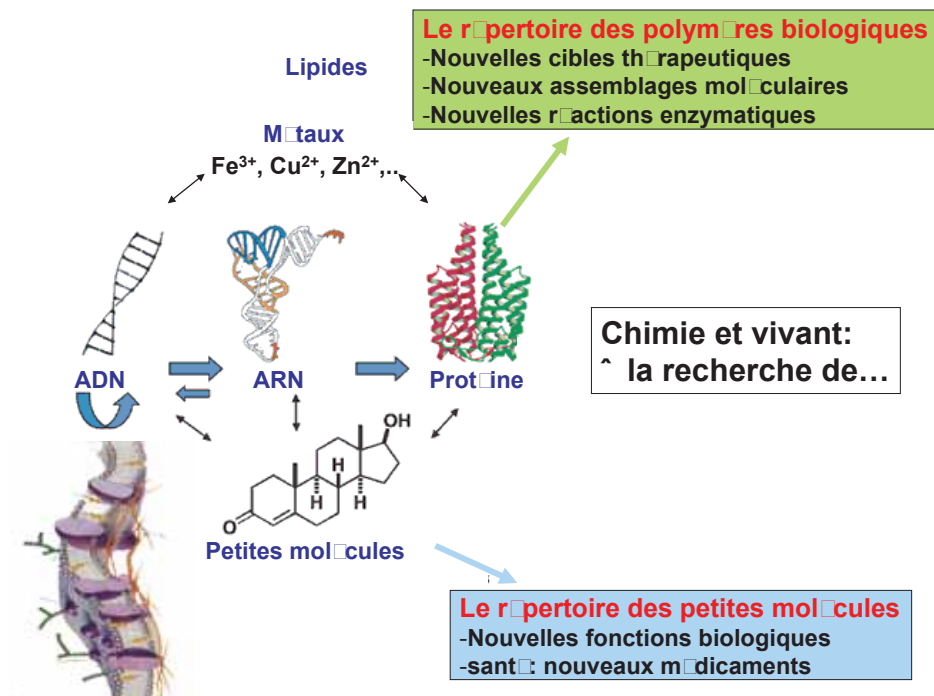
- Alimentation (qualité et productivité)
- Energie (renouvelable)
- Matériaux (renouvelables, bon marché)
- Ressources en éléments (recyclage, récupération)
- Santé (médicaments, diagnostic, vecteurs..)
- Toxicologie
- Environnement (biotechnologies)
- Information (nouvelles technologies)
- Terrorisme (chimique, biologique)
- ...

- Les fondamentaux de la chimie (synthèse et réactivité)
- Les réalités de l'industrie chimique
- Les interfaces de la chimie et des autres disciplines
- La chimie « verte »

Chimie et Biologie:
Une frontière...(in)perméable ?

- Être double...multiple: la contrainte culturelle
- L'organisation des disciplines dans les Universités/Ecoles/Organismes
- La formation dans les Universités/Ecoles/Organismes
- La contrainte économique: l'emploi et l'exigence d'applications (spécialistes vs généralistes)
- Quantité et urgence: la mode systémique et intégrative; la révolution moléculaire de la biologie n'est pas terminée!



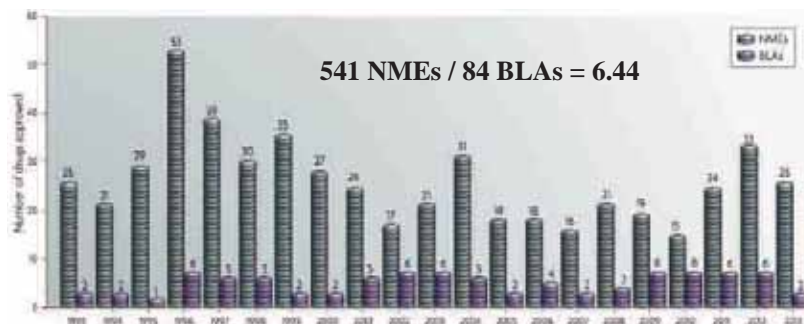


Chimie et médicaments

- 1950-2014: **chimie** (antibiotiques, anticancéreux, antiinflammatoires,...)

→ Malgré les révolutions de la biologie... **toujours de la chimie.**

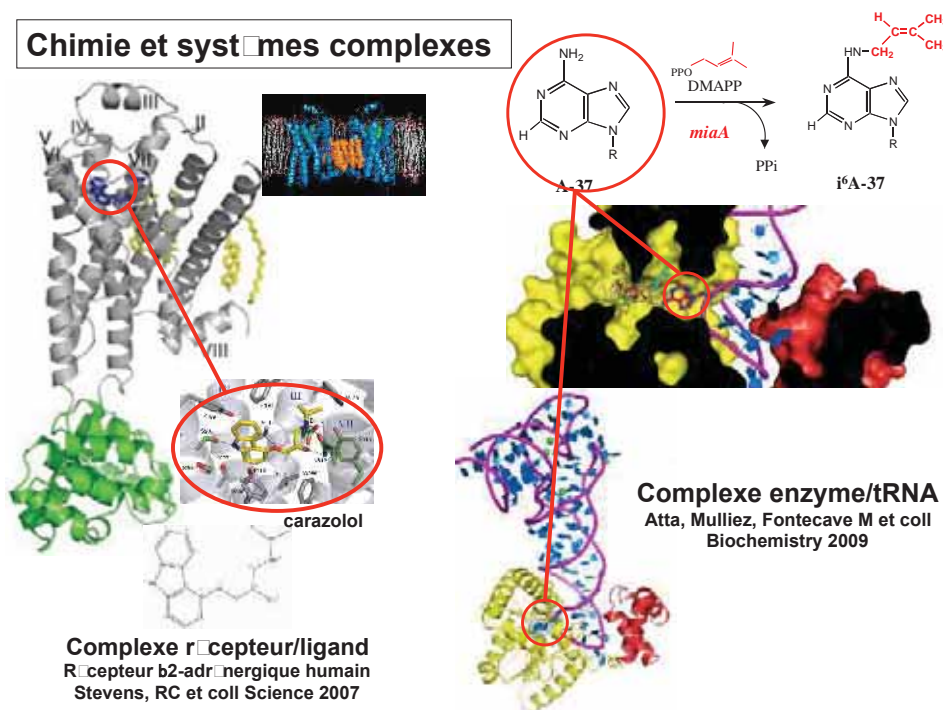
□ Bayer committed half a billion dollars into human genome research and they got nothing for it. Nothing at all □ Derek Lowe, Bayer.



Comparaison du nombre des petites molécules (NMEs) et des biopharmaceutiques (BLAs) agréés par la FDA entre 1993 et 2013

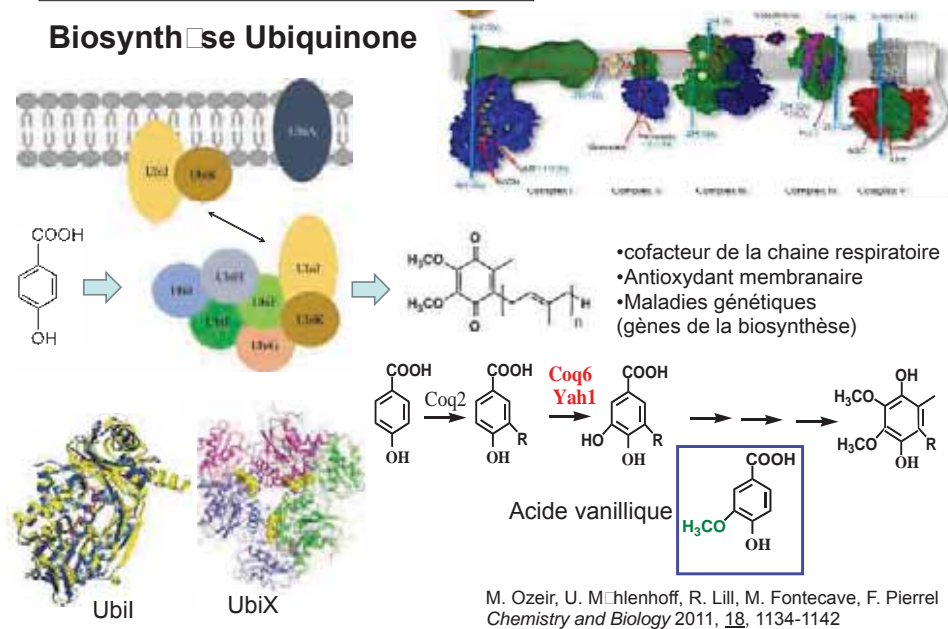
Nature Rev. Drug Disc., 13, 86 (2014).

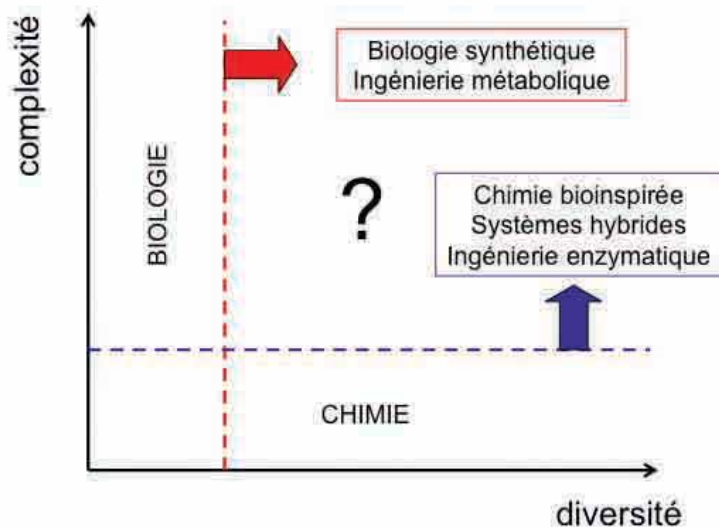
Chimie et systèmes complexes



Chimie et systèmes complexes

Biosynthèse Ubiquinone





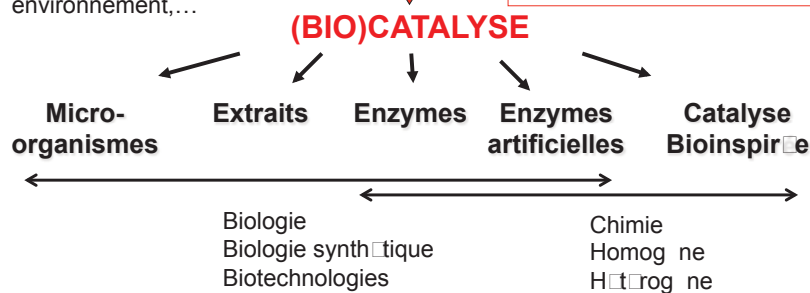
D'après JM Lehn

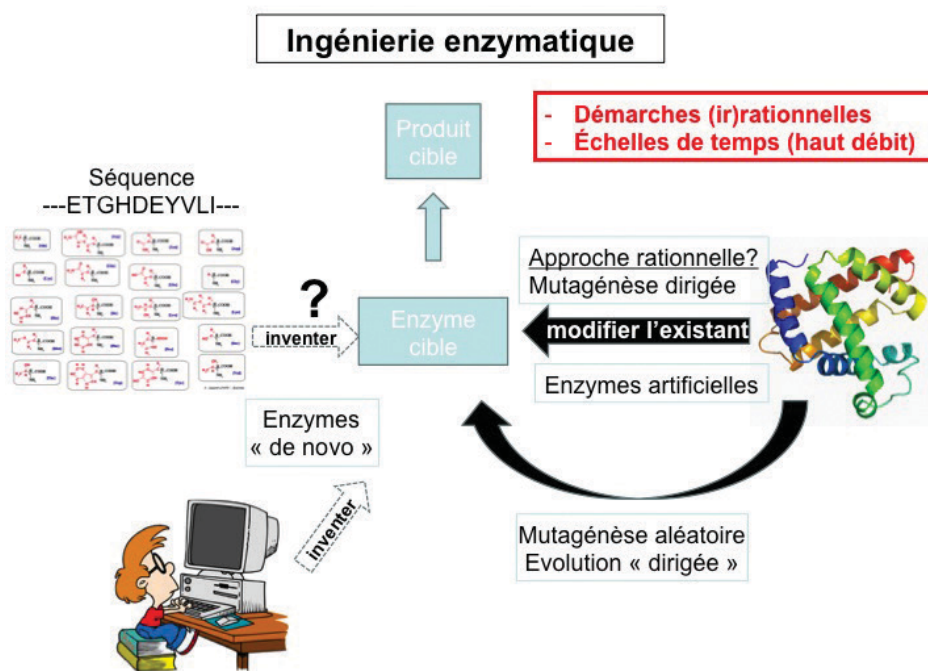
La chimie verte : Nouvelles synthèses chimiques Catalyse

- Solvants, produits, réactifs non toxiques
- Substrats renouvelables (CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 , biomasse, ...)
- Limitation des déchets
- Limitation de la dépense énergétique
- Réactions sélectives

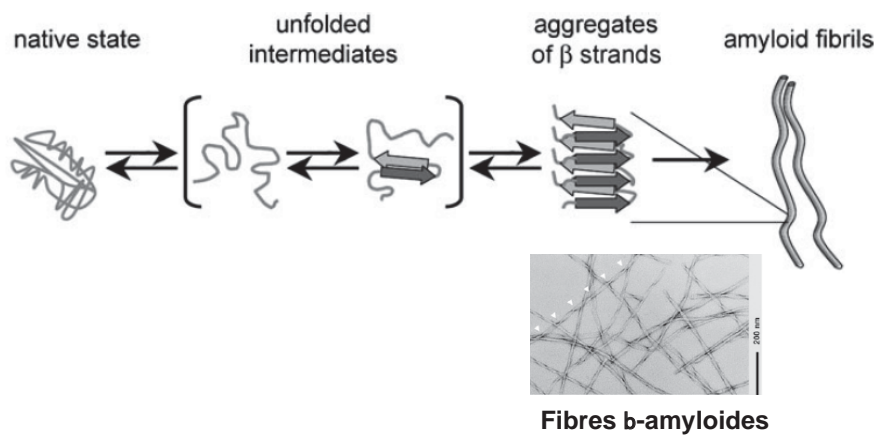
Applications:
chimie fine, santé, énergie,
environnement,...

A. 80 % des produits chimiques (industrie) sont synthétisés par des procédés catalytiques.
B. Procédés biotechnologiques (10% en 2010; 30% en 2040).



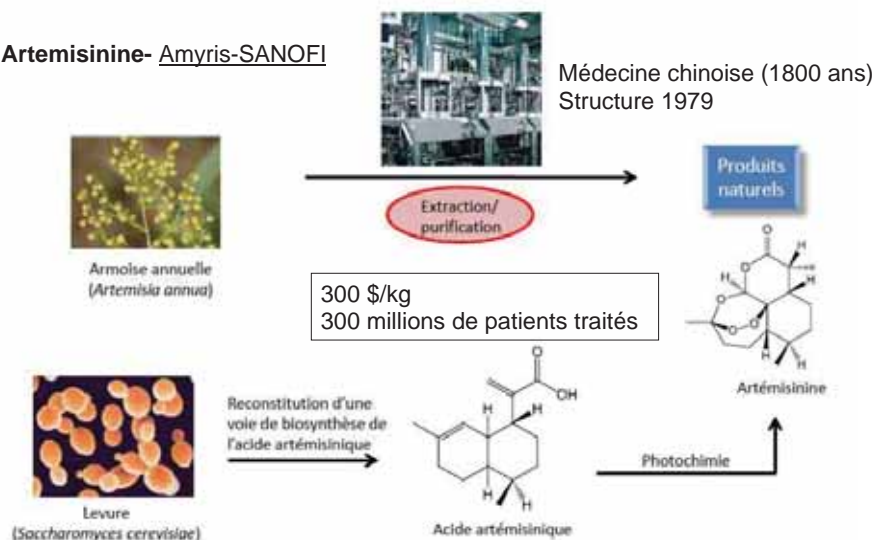


Ingénierie enzymatique: Nano-fils protéiques



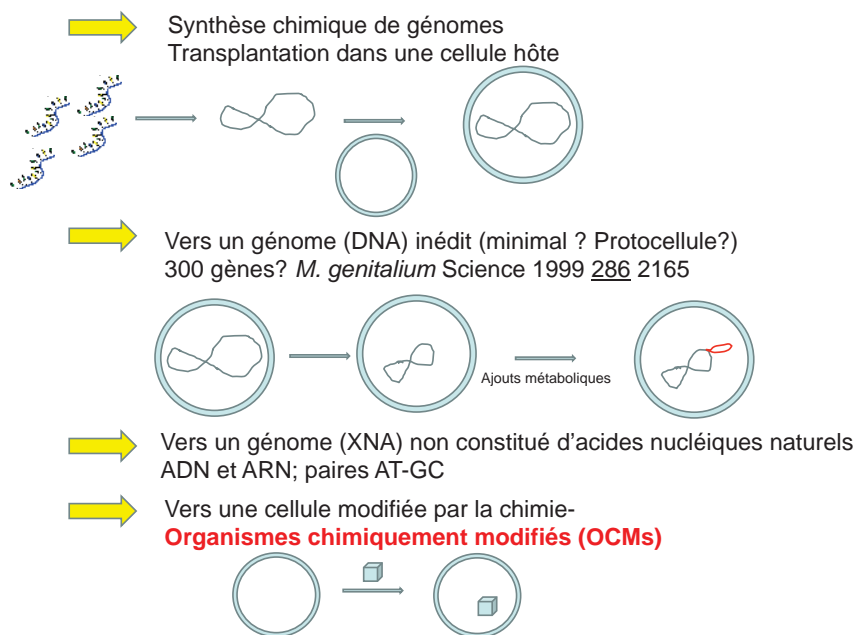
Chimie et biotechnologies: biologie synthétique

Artemisinine- Amyris-SANOFI



Nature Reviews-microbiology 2014 12 355

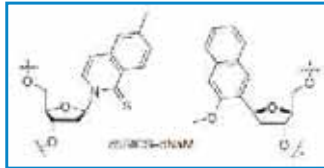
Biologie synthétique: « nouvelles » cellules?



Un organisme vivant semisynthétique

Organisme capable de répliquer un plasmide comportant une paire de base non naturelle

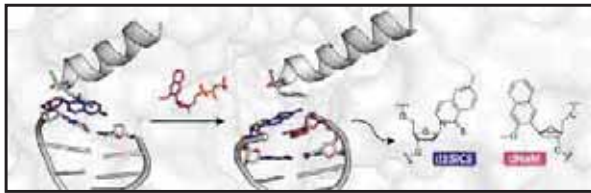
Nature 2014 509 385



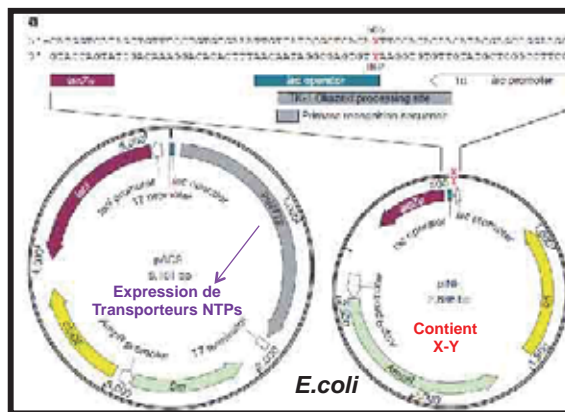
interactions hydrophobes



Floyd Romesberg
Scripps Research Institute
(1999-2015...)



Un organisme vivant semisynthétique



milieu de croissance: dNTP, dXTP, DYTP

Le premier organisme capable de répliquer l'ADN avec 6 bases

Nature 2014 509 385

PCR
Fidélité > 99.4 % !
Taux d'erreur 10^{-3}
(remplacement X-Y par A-T
indépendant de réparations)

Organismes chimiquement modifiés

1. Vers des plantes nanobioniques

ARTICLES

PUBLISHED ONLINE 16 MARCH 2014 | DOI: 10.1038/NMAT3080

nature
materials

Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing

Nature Materials 2014 **13** 400

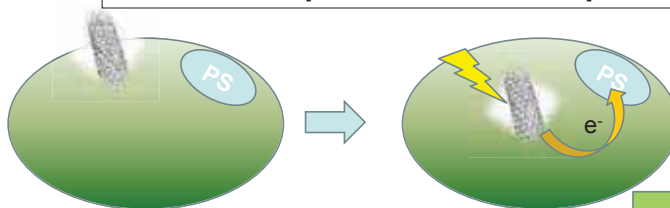
Améliorer la photosynthèse

dans les chloroplastes et dans les feuilles

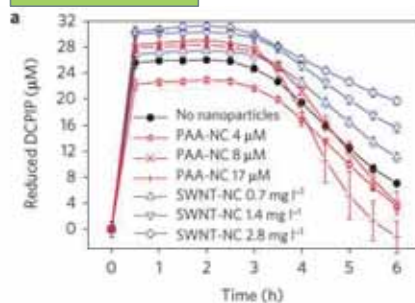
- élargir le spectre d'absorption de lumière (NTC semi-conducteurs- IR proche)
- Protéger contre le stress oxydant (nanoparticules de CeO_2)

Organismes chimiquement modifiés

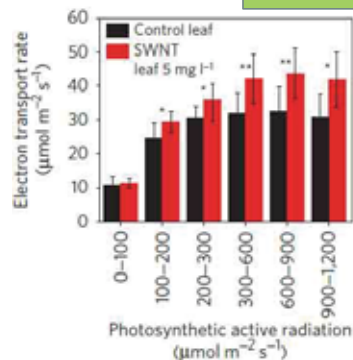
1. Vers des plantes nanobioniques



Chloroplastes isolés



Plantes



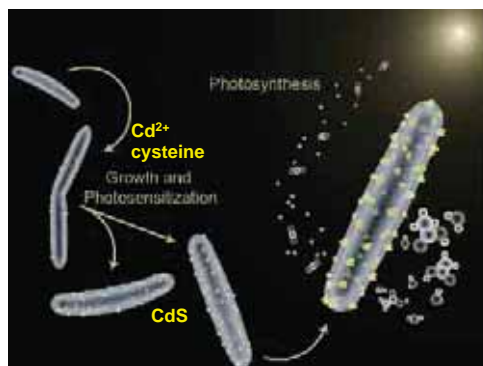
Organismes chimiquement modifiés

2. Créer un organisme photosynthétique

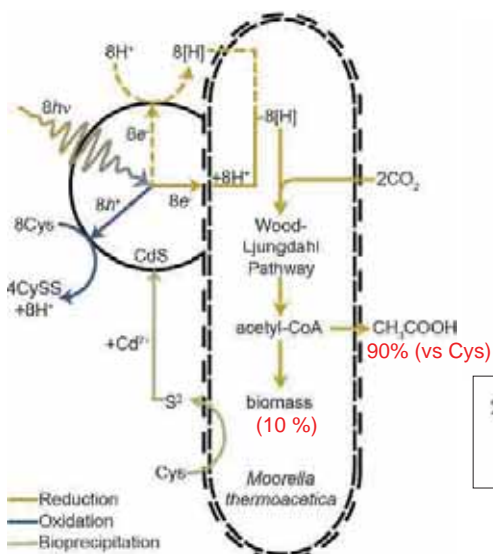
Système hybride:

Moorella thermoacetica (bactérie non-photosynthétique CO₂-réductrice)

Nanoparticules < 10 nm (biosynthétisées) de CdS (semiconducteur BG = 2.5 eV)



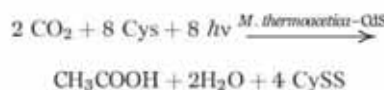
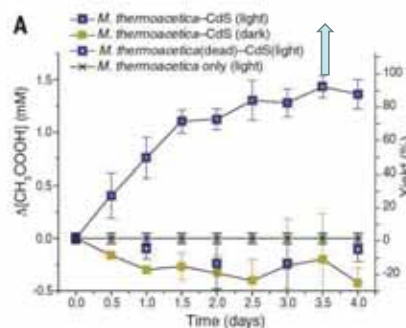
Science 2016 351 74



Science 2016 351 74

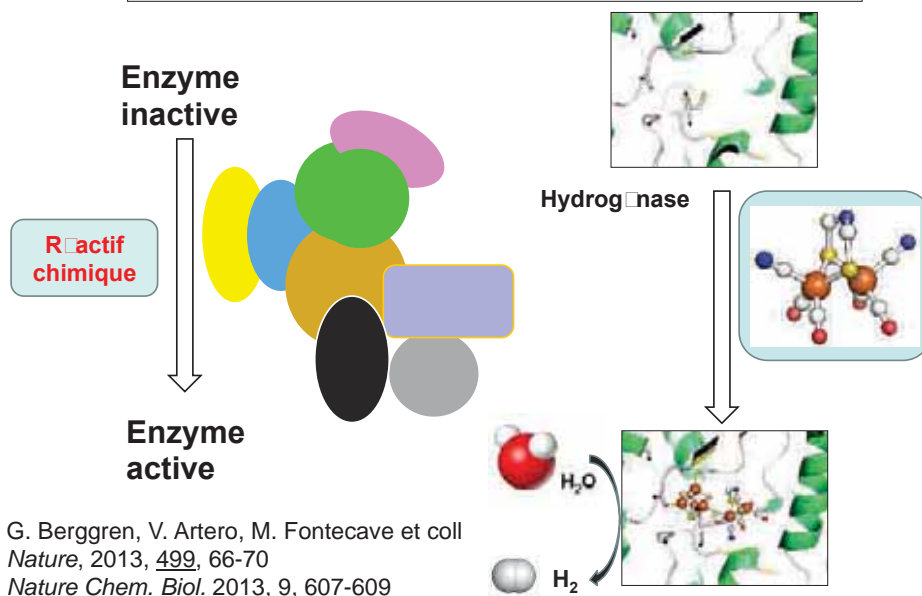
Limitations:

- Cystéine
- Dommages photochimiques

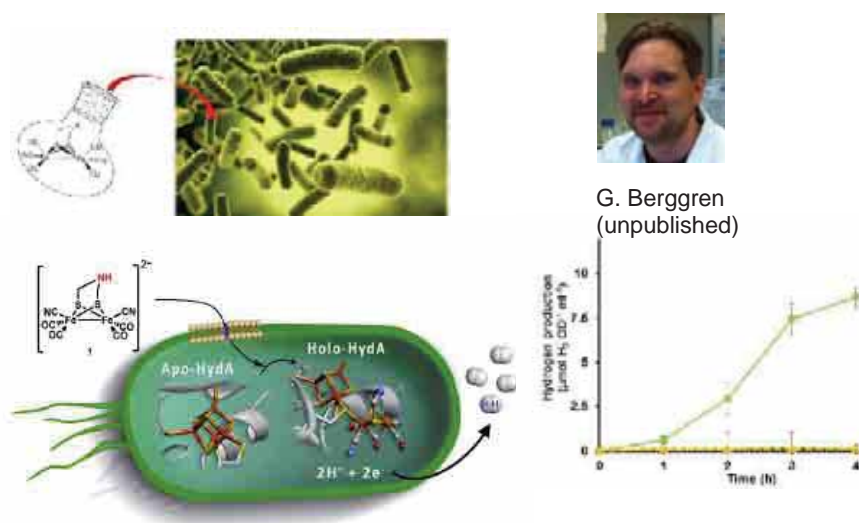


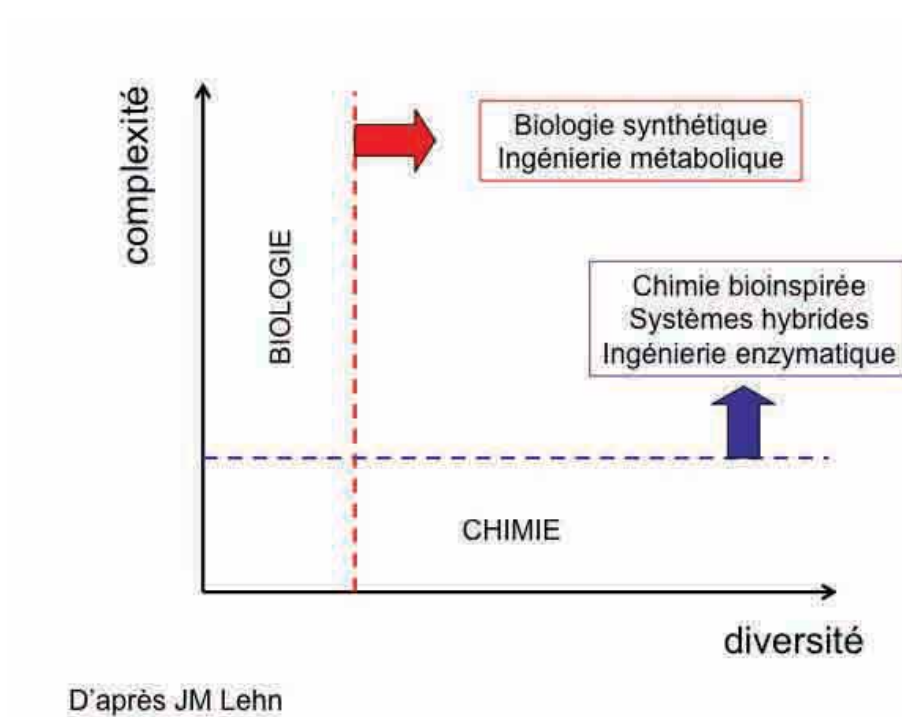
Irradiation solaire
 Rendement CH₃COOH 90 %
 Rendement quantique 2.5%
 (plantes 0.2%; algues 2%)

Organismes chimiquement modifiés 3. Vers des bactéries productrices d'hydrogène

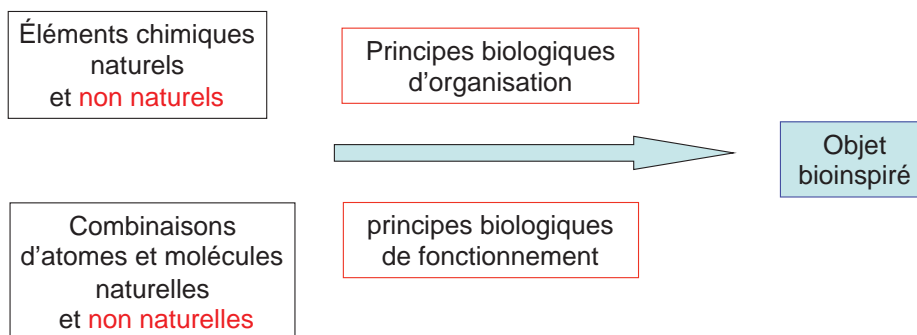


Organismes chimiquement modifiés 3. Vers des bactéries productrices d'hydrogène

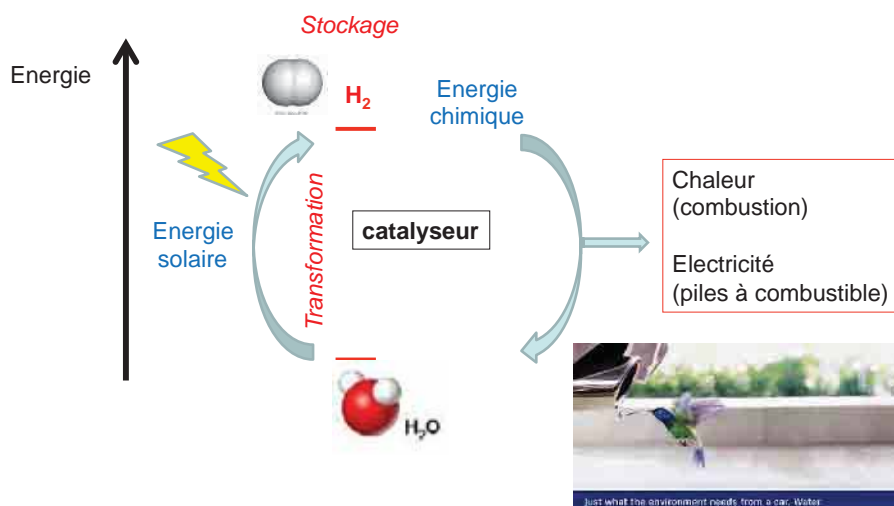




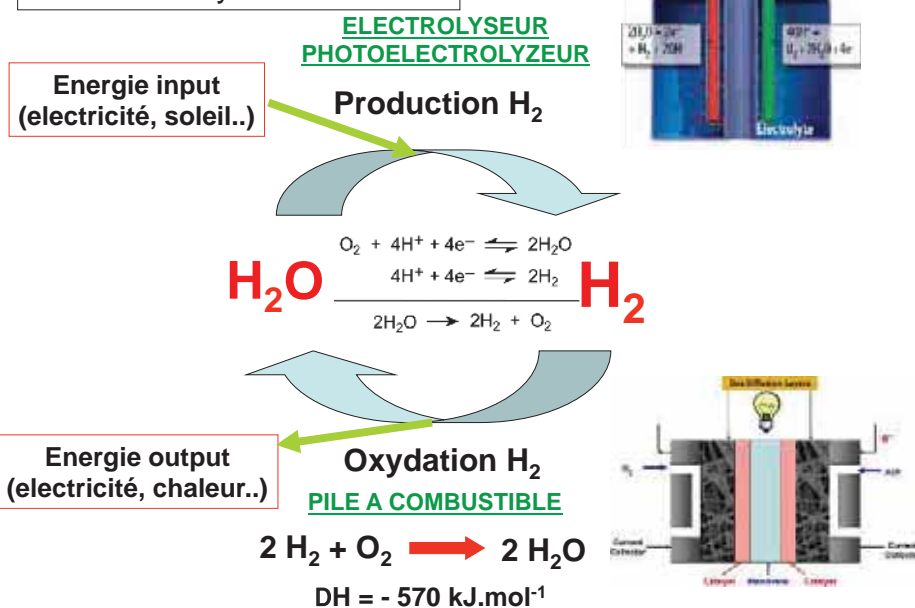
La chimie bioinspirée
« Dépasser les limites du vivant »?



Une façon de stocker l'énergie solaire
Convertir l'eau en hydrogène



Une économie de l'hydrogène
Catalyseurs ?

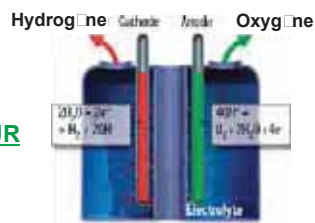


Une économie de l'hydrogène
Catalyseurs ?

ELECTROLYSEUR PHOTOELECTROLYSEUR

Energie input
(electricité, soleil..)

Production H₂



H₂O Pt H₂

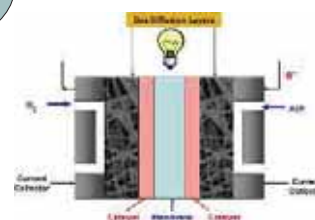
Energie output
(electricité, chaleur..)

Oxydation H₂

PILE A COMBUSTIBLE

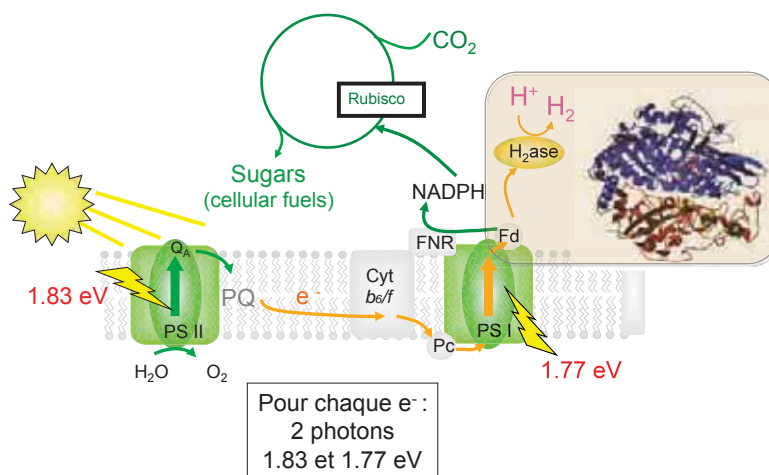
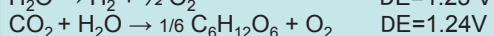
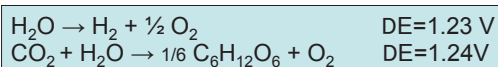


$$\Delta H = - 570 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

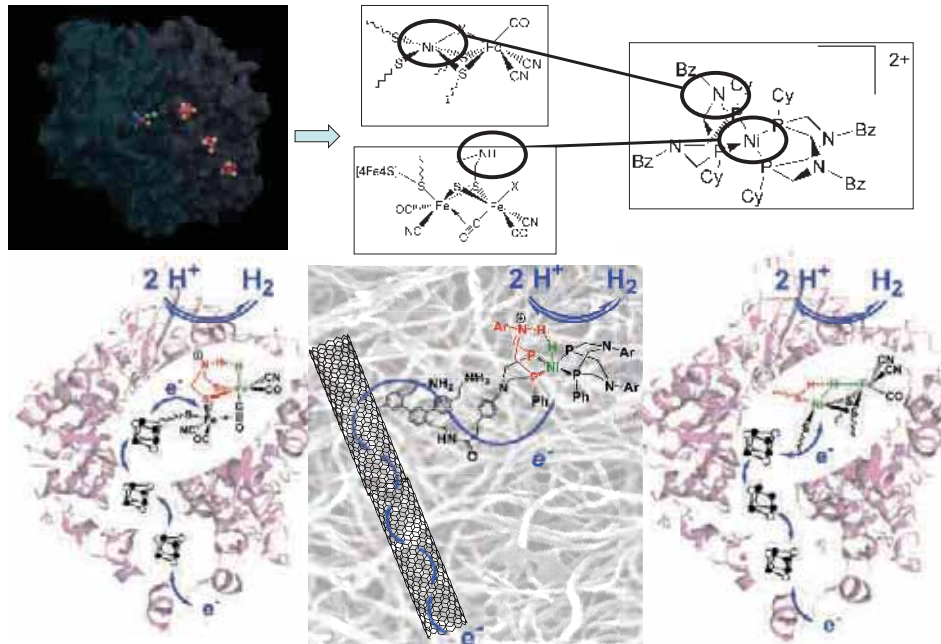


Photosynthèse naturelle

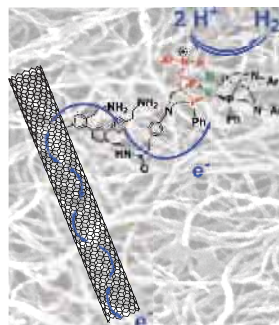
Stockage d'énergie:
Décomposition de l'eau



Des enzymes aux nanocatalyseurs bioinspirés



Des enzymes aux nanocatalyseurs bioinspirés



Un complexe bioinspiré
de Ni
greffé sur des NTCs
disposés sur l'électrode

From Hydrogenases to Noble Metal-Free Catalytic Nanomaterials for H₂ Production and Uptake

Alan Le Goff,¹ Vincent Artero,^{2*} Bruno Jousset,¹ Phong Dinh Tran,² Nicolas Guillet,³
Romain Métayé,¹ Aziz Fihri,² Serge Palacin,^{2,*} Marc Fontecave^{2,4}

4 DECEMBER 2009 VOL 326 SCIENCE

European patent application EP-08 290 988.8

+++

Un catalyseur pour l'oxydation et la production d'H₂
>100.000 cycles !!

Grande stabilité du matériau

Compatible avec la technologie PEM

surtension = 20 mV !!

Résistant à CO

Coût: 20 euros/kg (Pt: 20000 euros/kg)

Faibles densités de courant
(1/10 vs Pt)



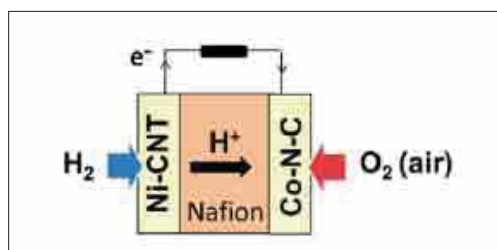


Cite this: Chem Sci, 2015, 6, 2050

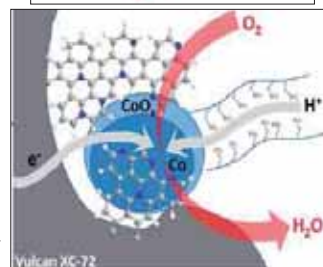
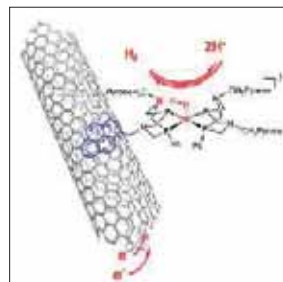
A noble metal-free proton-exchange membrane fuel cell based on bio-inspired molecular catalysts†

P. D. Tran,^{a,b} A. Morozan,^{a,b} S. Archambault,^{a,c} J. Heidkamp,^{a,d} P. Chenevier,^e H. Dau,^d M. Fontecave,^{a,f} A. Martinent,^{*c} B. Jousselme^{*b} and V. Artero^{*a}

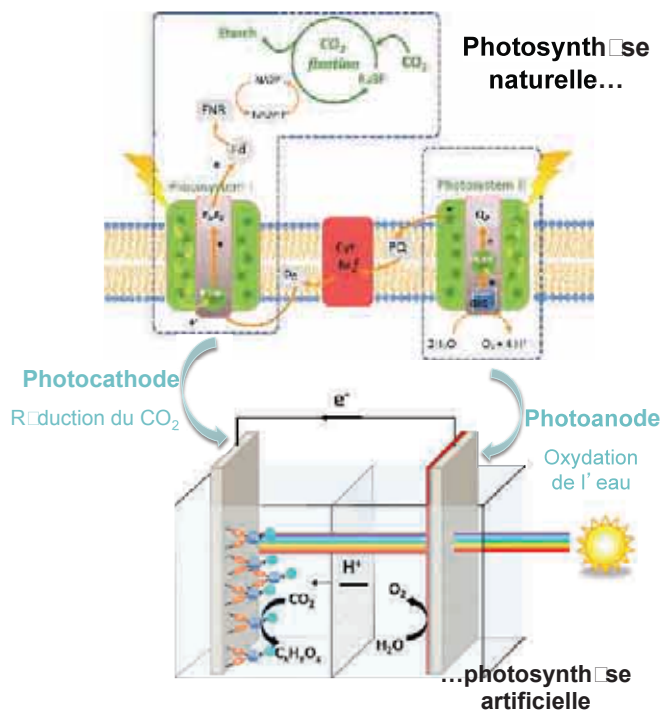
La première pile à combustible (PEM) sans métaux nobles !!



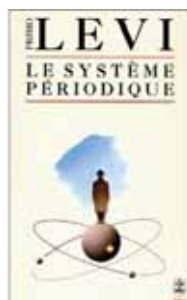
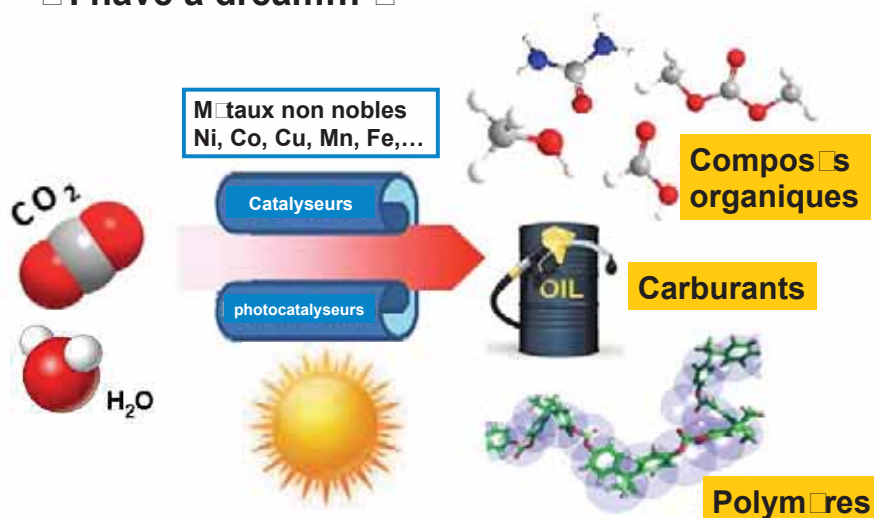
N-heterocyclic polymer
Co^{2+/3+}; metallic Co



Photosynthèse naturelle...



□ I have a dream... □



CO_2 , c'est la vie (aussi)!

Le carbone est **l'élément clé de la substance vivante** mais son entrée dans le monde vivant n'est pas aisée, elle doit suivre un itinéraire obligé... L'atome, accompagné de ses deux satellites qui le maintiennent à l'état de gaz doit frôler une feuille, y pénétrer et y être fixé par un rayon de soleil, ...puis combiné avec de l'hydrogène pour être finalement inséré dans une chaîne, **la chaîne de la vie**. Quand nous aurons appris à en faire autant, nous aurons résolu le problème de la faim dans le monde.

L'anhydride carbonique, qui constitue **la matière première de la vie**, la provision permanente dans quoi puise tout ce qui croît, et l'ultime destin de toute chair, n'est pas un des composants principaux de l'air, mais un ridicule déchet, une impureté... C'est de cette impureté toujours renouvelée que nous venons, nous les animaux et nous les plantes et nous l'espèce humaine.

Chimie du vivant:
quelques perspectives « incontournables »

- L'origine chimique de la vie
- Chimie et cerveau

« Nous sommes un redoutable mélange d'acides nucléiques et de souvenirs, de désirs et de protéines.

Le siècle qui se termine s'est beaucoup occupé d'acides nucléiques et de protéines.

Le suivant va se concentrer sur les souvenirs et les désirs.

Saura-t-il résoudre de telles questions ? »

F. Jacob

La souris, la mouche et l'homme



Stanley Miller
(1930-2007)



Chimie et Biologie: quelles nouvelles frontières ?

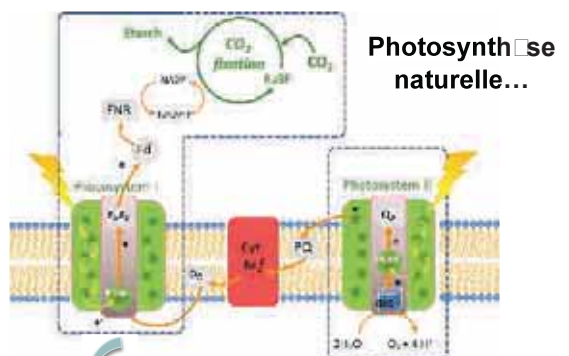
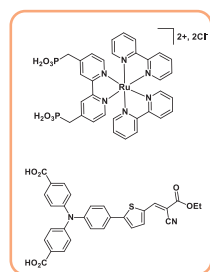
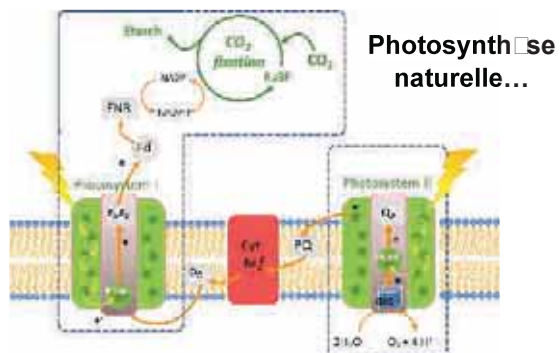
Marc Fontecave

Laboratoire de Chimie des Processus Biologiques, UMR 8229 CDF/
CNRS/UPMC

Collège de France, 11 Place Marcelin Berthelot, 75231 Paris Cedex 05
marc.fontecave@college-de-france.fr; Phone: (0033)144271360



*« Le corps qui traverse apprend certes un second monde,
celui vers lequel il se dirige, où l'on parle une autre langue,
mais il s'initie surtout à un troisième, par où il transite »*

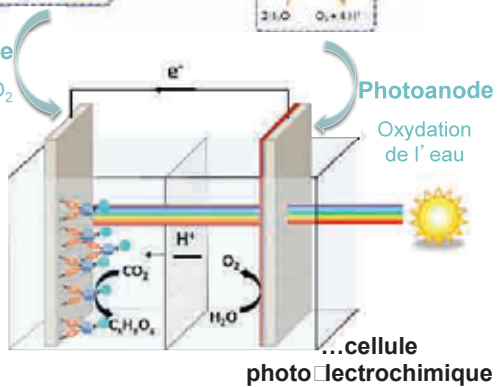


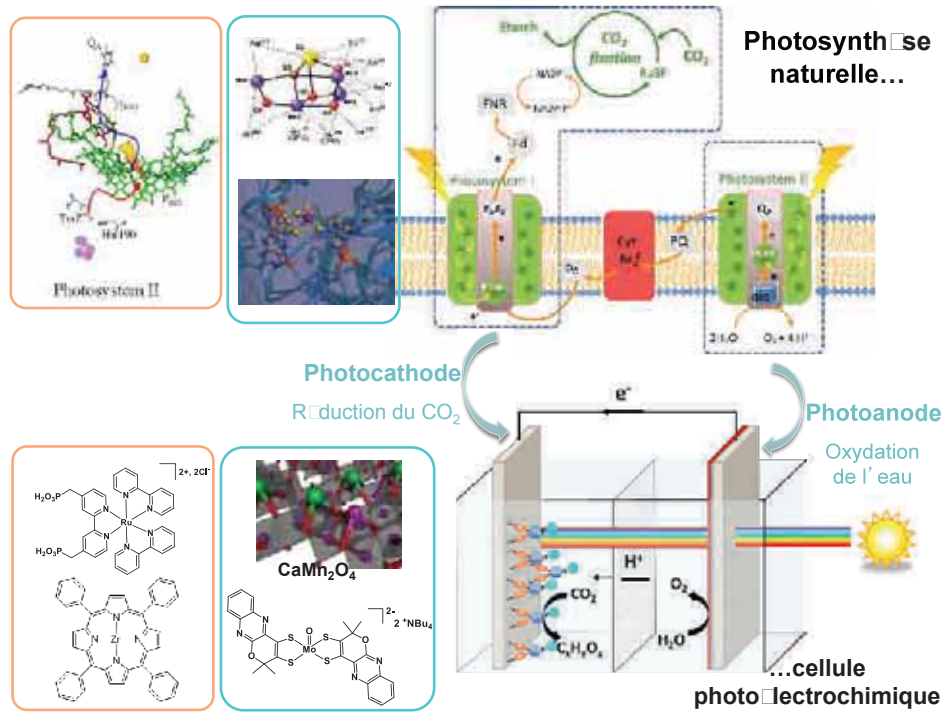
Photocathode

Réduction du CO_2

Photoanode

Oxydation de l'eau





LES MATÉRIAUX DU FUTUR ET LES PROMESSES DE LA NATURE

Pr. Nadia EL KISSI

Chercheur CNRS (INP de Grenoble)

*Membre correspondant de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*



Monsieur le secrétaire perpétuel,

Monsieur le chancelier

Madame la directrice des séances, je vous remercie de m'avoir donné l'opportunité d'être ici aujourd'hui et de vous emmener, chers collègues, Mesdames et Messieurs, pour une promenade dans le monde des matériaux, promenade courte et terriblement non exhaustive, qui nous amène à cette époque inouïe qui voit la mise en oeuvre de matériaux dont les propriétés, il y a à peine quelques décennies, auraient semblé défier les lois de la physique, et l'un des vecteurs de ces développements, nous le verrons, est la bio-inspiration.

Les matériaux à travers les âges

Ce diagramme représente l'importance relative de différentes classes de matériaux à différentes époques de la civilisation humaine.

On voit déjà qu'à l'époque de l'homme préhistorique les céramiques étaient des matériaux d'avenir. Les composites comme le bois étaient très utilisés. On utilisait par contre très peu de métaux.

Le développement d'une thermochimie rudimentaire, la découverte du feu, a permis l'extraction des premiers métaux. D'abord le cuivre et le bronze et ensuite le fer qui a établi la domination des métaux dans l'ingénierie dès le 17^{ème} siècle. Ensuite, durant le 19^{ème} siècle et la première moitié du 20^{ème} siècle, on assiste à l'avènement de l'acier

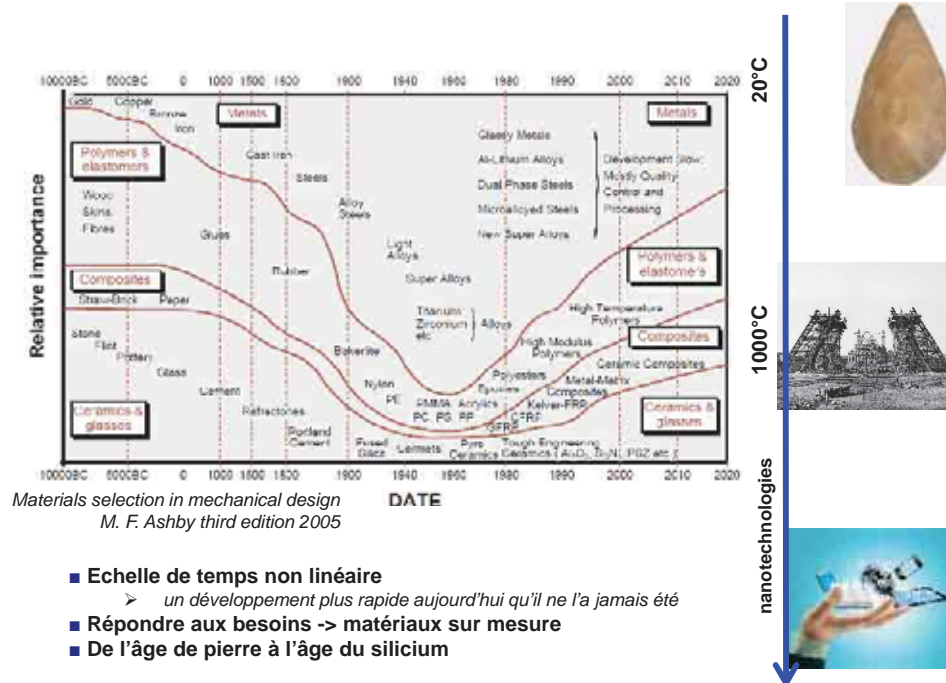
et de ses alliages. Deuxième moitié du 20^{ème} siècle : la part des métaux et alliages se stabilise et dans le même temps on voit se développer l'ère des plastiques, les polymères et élastomères, intimement liés au développement de la chimie du pétrole. Et aujourd'hui, on assiste à la croissance de la production de céramiques hautes performances, qui nous font basculer dans l'ère du silicium.

Deux remarques à ce stade :

- Aujourd'hui, nous ne sommes pas à l'ère d'un matériau, mais d'une immense gamme de matériaux. Il n'y a jamais eu une époque où leur évolution a été plus rapide et la gamme de leurs propriétés plus variées qu'aujourd'hui, et ça, le concepteur ne peut pas l'ignorer.
- On est passé d'une époque où l'homme faisait avec ce qu'il trouvait, à une époque où l'homme a utilisé au mieux les matériaux disponibles, pour en arriver aujourd'hui à une époque où on est, la logique est de concevoir le meilleur matériau possible.

On est passé de l'âge de pierre à l'âge du silicium.

Mais, déjà, le silicium montre ses limites et notamment en termes de miniaturisation : la fameuse limite des 20 nm en dessous de laquelle il devient compliqué de graver des transistors toujours plus nombreux sur des plaques de silicium massif.

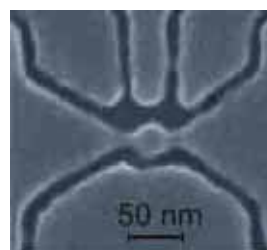


Le graphène, nouvel eldorado pour l'électronique

Une alternative possible au silicium en termes de matériaux, dans le domaine de l'électronique organique, est l'utilisation du graphène, le dernier né des membres de la famille des cristaux de carbone apparentés au graphite, après les fullérennes dans les années 80 et les nano-tubes de carbone dans les années 90. Le graphène est un cristal 2D: une feuille de graphite de l'épaisseur d'un atome.

La miniaturisation est à la portée de cette molécule : un morceau de graphène nanométrique peut constituer un transistor à un seul électron. On voit sur ce diagramme comment deux électrodes, une source et un drain, sont reliées par une île faite d'un semi-conducteur de 100 nm de diamètre. L'île qui apparaît ici avec un grossissement d'environ 40000 est trop petite pour accueillir plus d'un électron. Ces transistors sont fabriqués à une échelle moléculaire et occupent donc beaucoup moins de place que leurs confrères en silicium.

Dernièrement des rubans de graphène de moins de 40 nanomètres de large ont été élaborés et permettent d'imaginer une électronique haute fréquence performante et réalisable sur le plan industriel. Alors pourquoi l'électronique haute fréquence? Eh bien avec le graphène il est difficile de «fermer le robinet», car il ne possède pas de gap, cette bande interdite des semi-conducteurs où les électrons ne peuvent circuler et qui permettent la fonction marche arrêt. Il apparaît donc que, malgré les limites de la miniaturisation, le silicium a encore de beaux jours devant lui.



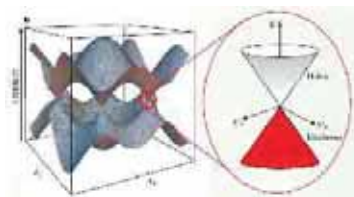
- Le transistor le plus petit au monde
 - ✓ largeur : 10 atomes,
 - ✓ épaisseur : 1 atome.

Geim et al. Science 2008



Nanoruban de graphène (fil électrique nanométrique)
 et les rubans pour graver directement des circuits électroniques.

GeorgiaTech – Inst. Néel – Univ. Leibniz



Ni métal, ni semi-conducteur

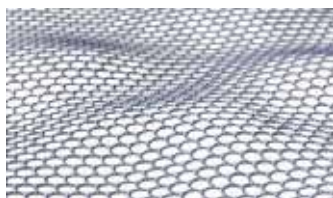
Les records du graphène

Mais les records du graphène ne s'arrêtent pas à ses propriétés électroniques uniques.

Le fait même d'avoir isolé une feuille de carbone-graphite de l'épaisseur d'un atome est un paradoxe puisque les principes de la thermodynamique sont censés empêcher l'existence d'un cristal 2D à l'état libre. Une explication possible est attribuée à l'ondulation 3D de la molécule qui stabiliserait le cristal.

Ensuite, les électrons se déplacent dans le graphène à une vitesse qui est proche de celle de la lumière (300 fois plus faible). Par ailleurs ils se déplacent comme s'ils étaient sans masse, et ressemblent donc aux neutrinos, à la différence près qu'ils portent une charge électrique.

Ces propriétés en font les meilleurs conducteurs d'électricité à température ambiante, mais il apparaît de ce fait qu'ils relèvent de la mécanique quantique relativiste dont l'interprétation est souvent contre intuitive avec des phénomènes qui semblent paradoxaux: les électrons du graphène peuvent franchir spontanément une barrière d'énergie avec une probabilité de 100% et ces propriétés étonnantes ouvrent un champ d'exploration encore tout-à-fait insoupçonnée pour la mécanique fondamentale.



Cristal 2D de carbone quasi sans défaut
Graphène isolé en 2004 Geim, Novoselov
Nobel 2010



■ Paradoxe d'existence

- Peierls et Landau, 1930
- Mermin et Wagner 1968
- Ondulations 3D?

■ Quantique ET relativiste

- Vitesse proche de la lumière
- Quasi-particules de masse « nulle »
- Comportement électrique « exotique »

■ Un champ d'exploration pour la physique fondamentale

- Electrodynamique quantique
 - ✓ Phénomènes de la physique quantique relativiste
 - ✓ Principe de Heisenberg
 - ✓ Paradoxe de Klein

Aujourd'hui : l'embarras du choix

Mais revenons aux matériaux tels que nous en disposons aujourd'hui.

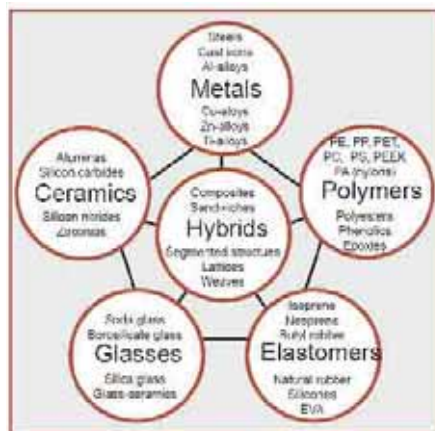
Vous avez les métaux, les polymères et les élastomères, les verres et les céramiques et bien évidemment parmi ces matériaux, les matériaux naturels et puis les composites qui sont essentiellement réalisés à partir de combinaisons plus ou moins définitives de matériaux issus de ces différentes familles. On dispose donc de plus de 100000 matériaux et environ 3000 procédés de fabrication et de mise en oeuvre.

On a une situation très compétitive entre les différentes classes de matériaux : regarder le bâtiment, on peut construire en verre, en acier, en béton...

On a enfin des exigences accrues dans les cahiers des charges : exigences fonctionnelles et technologiques bien sûr, mais également de nouvelles exigences sociétales (sécurité, santé, environnement...) et économiques (industrialisation, commercialisation...) qui vont constituer une force de développement particulièrement motrice.

Il va donc falloir mettre en place des stratégies pour développer des matériaux capables de répondre à toutes ces demandes et, aujourd'hui il est difficile de passer outre trois injonctions :

- La première c'est le passage obligé par la microstructure afin de comprendre la relation entre structure à l'échelle nanométrique et propriétés à l'échelle macroscopique. Le développement des techniques multi-échelles d'observation de la matière, notamment l'utilisation des techniques de diffusion des rayonnements à différentes longueurs d'onde, ont révolutionnés ces aspects dans les dernières décennies.
- Le deuxième point c'est l'importance de la modélisation comme outil de fabrication de matériau et donc comme outil d'innovation.
- La troisième idée forte c'est qu'on a vu apparaître progressivement la valeur d'une approche comparatiste aussi bien dans le choix que dans le développement des matériaux : comparer les matériaux entre eux pour trouver le mieux adapté.



*Materials selection in mechanical design
M. F. Ashby third edition 2005*

■ Un menu pléthorique

- 100 000 matériaux et 3000 procédés
- compétition entre les différentes classes de matériaux

■ De nouvelles exigences

- multifonctionnalité accrue
 - ✓ conducteur et isolant
 - ✓ solide et tenace ...
- Impératif socio économique
 - ✓ sécurité, santé, environnement...
 - ✓ industrialisation

■ Une stratégie

- passage obligé par la microstructure
- modélisation comme outil d'innovation
- approche comparatiste pour le choix et le développement

Choix : les indices de performance

Quels sont les moyens dont on dispose comment procéder pour choisir ?

On va pouvoir utiliser des bases de données, qui vont faire apparaître les matériaux sur ce genre de carte, c'est la méthode des indices de performance mise au point par Ashby.

Sur ces cartes on va pouvoir identifier tous les matériaux qui ont la même performance, en utilisant des guides :

- en vert c'est pour une pièce qui est en traction, qui est rigide et qui est légère, tous les matériaux qui sont sur la même ligne vont avoir la même performance vis-à-vis de cette requête,
- pour une pièce qui n'est pas en traction mais qui est en flexion c'est cette ligne-là en bleu qui va être la ligne équi-performance.

Et on peut faire la même chose en utilisant ces types de cartes pour des conceptions avec des requêtes qui portent sur les propriétés thermiques, voire des conceptions à coûts maîtrisés, à masse minimale etc.

Bien sûr une telle représentation reste simpliste par rapport à un vrai problème industriel ou sociétal. Maintenant si on se dit que nous avons les moyens de traiter ça avec un très grand nombre de requêtes, de pondérer ces différentes requêtes, de faire des choix multicritères, on sent qu'on commence à avoir des guides d'aide au choix.

On va commencer par utiliser des filtres qui vont nous permettre de retenir un certain nombre de matériaux et de procédés parmi tous ceux disponibles.

On va ensuite les classer en fonction de leurs performances et de leurs coûts vis-à-vis du cahier des charges en utilisant la méthode des indices de performance par exemple, mais également des logiciels de sélection. On va réaliser un éco-audit sur le système.

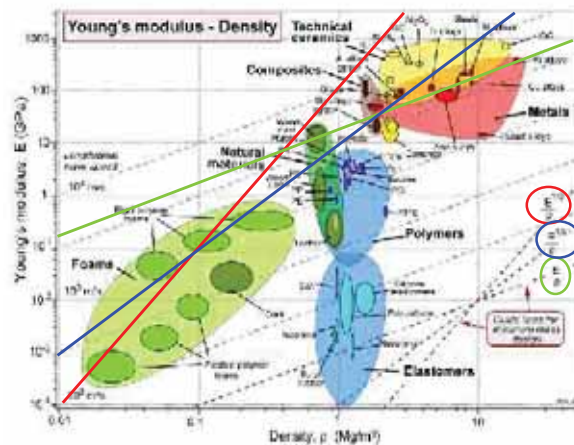
Et puis évidemment il y a tout un aspect qui consiste à faire des développements sur mesure: capture de l'expertise, études de cas... à travers des interactions avec des spécialistes de l'informatique, de l'intelligence artificielle : il y a tout un monde à découvrir pour les spécialistes des matériaux.

Mais il y a bien évidemment des limites.

La méthode des indices de performance est limitée au choix d'un matériau massif et ne prend donc pas en compte l'association de matériaux.

Or répondre à l'exigence de multifonctionnalité passe souvent par le développement de matériaux composites et ça c'est une voie qui a été particulièrement motrice dans le développement de nouveaux matériaux du fait notamment que cette exigence de multifonctionnalité conduit souvent à associer des comportements a priori antinomiques, mais qui peuvent être levés de différentes manières.

On va le voir sur trois exemples.



Micro-architected materials: past, present and future,
ASHBY, 2010

- **Sélection des matériaux & des procédés**
 - propriétés, formes...
- **Evaluation des performances & Estimation des coûts**
 - logiciels de sélection
 - éco-audit ...
- **Guides d'aide au choix**
 - expertise
 - études de cas...
 - Interactions informatique, intelligence artificielle...

- ✓ **Quid des composites ?**
- ✓ **Multifonctionnalité ?**

Multifonctionnalité : lever les paradoxes

1^{er} exemple, le fil électrique. Il doit conduire l'électricité et pour ça on prend un métal. Il doit être isolant pour éviter l'électrocution. Et c'est là que la topologie intervient : il faut mettre le métal dedans et l'isolant dehors et pas le contraire. On a par ailleurs besoin de flexibilité, ce qui n'est pas trivial avec un matériau métallique. Et c'est là qu'intervient la géométrie du câble pour permettre la flexibilité du métal.

Prenons un deuxième exemple. On cherche à réaliser une pièce de grande taille dans un matériau intrinsèquement fragile, mais qui possède une certaine ténacité. Une manière de le faire c'est de pré-fragmenter cette pièce, de telle manière qu'à une géométrie de fragment donnée, les pavés se bloquent les uns les autres quand par exemple on va mettre la pièce en flexion. L'avantage c'est qu'un choc sur une telle structure n'aura d'effet que sur le bloc qu'il va impacter et qui sera le seul à se fissurer. Donc en pré-fragmentant le matériau on a fabriqué un objet avec un matériau constitutif fragile mais qui a une certaine tolérance au dommage. Par la géométrie, on a **adapté le matériau à la fonction**.

Dernier exemple, on cherche à développer un matériau absorbant le bruit pour les moteurs. Le bruit c'est une onde de pression dans du gaz, l'air. Il faut que le gaz pénètre et puisse être diffusé, il faut donc que le matériau soit poreux à porosité ouverte. Ses propriétés mécaniques sont alors limitées et il faudrait un matériau poreux à porosité fermée. On cherche donc à réaliser un matériau à double porosité : ouverte et fermée. Le choix qui est fait est d'utiliser un empilement aléatoire de sphères creuses brasées.

La géométrie des canaux entre les sphères contrôle le cisaillement de l'air, et donc l'absorption acoustique. La nature du matériau, l'épaisseur des coques et des cols de brasage, contrôleront quant à elles les propriétés mécaniques de l'empilement.

On peut ensuite calculer l'absorption acoustique d'un spectre de bruit donné par des modèles pertinents et déterminer de cette façon, pour un spectre donné, l'assemblage le plus pertinent en termes de taille, d'épaisseur, de concentration volumique des sphères, ...

On voit ainsi se développer un matériau littéralement «sur mesure».

Bien, ces exemples simples mettent en exergue un certain nombre d'éléments dans le développement des matériaux :

- 1- on a intégré les notions de topologie et on a acté le retour de la géométrie
- 2- on a pris en compte la notion d'échelle pour en arriver à «construire» le matériau le mieux adapté

■ Câble électrique : conducteur et isolant



- ✓ Géométrie et Topologie
- ✓ Structure et gradient de propriétés
- ✓ Architecture

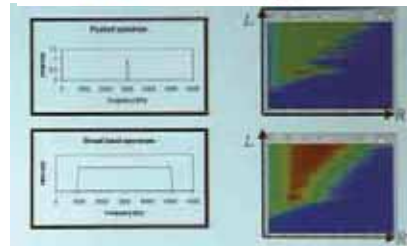
■ Adapter le matériau à la fonction



■ Acoustique ou mécanique : ne plus choisir



Maillage d'un empilement de sphères creuses pour simulation des propriétés mécaniques et acoustiques



Optimisation acoustique

Promesses et défis des matériaux architecturés

On en vient donc à parler de matériaux architecturés c'est-à-dire :

- des matériaux pour lesquels la répartition de matière se fait à une échelle comparable à l'échelle du composant
- qui permet de remplir des requêtes qui seraient contradictoires pour un matériau unique
- les associations de matière, de géométrie ainsi que la topologie sont autant de leviers d'optimisation

Pour ces matériaux, on s'éloigne de plus en plus de la notion structurel/fonctionnel. On demande de plus en plus au matériau d'avoir une première fonction qui peut être de structure mais également de pouvoir être doté de capteurs qui permettront de faire des diagnostics, être conducteur électrique voire protonique.

De plus en plus, on demande au matériau d'être multifonctionnel et se posent alors de nombreuses questions :

D'abord, les matériaux architecturés restent un domaine ouvert :

- se pose la question de l'optimisation des formes avec toutes les méthodes algorithmiques qui permettent d'avoir des outils d'optimisation;
- la question de la co-sélection des matériaux : il va falloir utiliser des algorithmes qui permettent de marier plusieurs bases de données;
- enfin, lorsque j'associe des matériaux différents, je vais avoir toute une ingénierie des interfaces à développer.

Ensuite, nous sommes là devant un champ conceptuel à défricher : quelle approche de milieu continu pour un matériau architecturé, la distribution de matière se fait à des échelles qui ne peuvent pas être oubliées vis-à-vis de la structure...

Le problème d'une architecture quand j'ai une seule échelle à reproduire est assez simple. Mais si l'architecture est multiéchelle, comme c'est couramment le cas dans la nature, alors j'ai besoin d'une nouvelle stratégie pour réaliser ces matériaux architecturés multifonctionnels.

La bio-inspiration apparaît aujourd'hui comme le graal dans ce domaine-là !

■ Matériaux architecturés

- Répartition de matière à une échelle comparable à l'échelle du composant
- Remplir des requêtes qui seraient contradictoires pour un matériau unique
- Distribution de matière, géométrie et topologie sont autant de leviers d'optimisation

■ Au-delà de la structure et au-delà de la fonction

- Multifonctionnalité

■ Un domaine ouvert

- Optimisation des formes
- Co-sélection des matériaux
- Ingénierie des interfaces

■ Un champ conceptuel

- Quel milieu continu ?
- Approches multi-échelles
- **Matériaux architecturés multifonctionnels bio-inspirés**



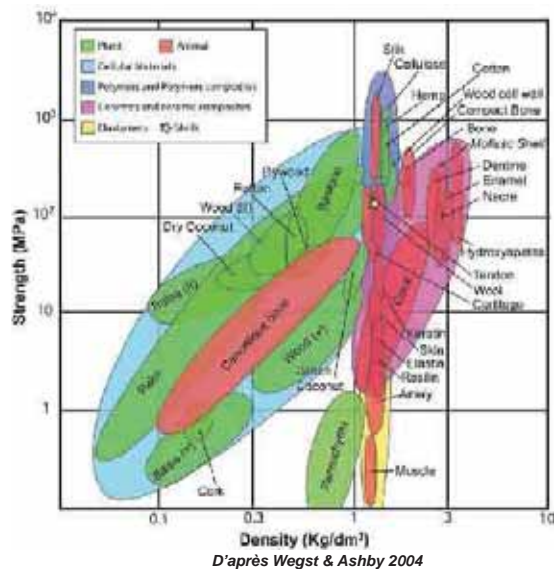
Les matériaux naturels : une balade à l'échelle de plusieurs millions d'années

Si je fais le parallèle entre les matériaux naturels et ceux de l'ingénieur, d'abord la nature développe des matériaux depuis 3 millions d'années.

Wegst et Ashby propose une classification des matériaux naturels suivant quatre familles: les céramiques et leurs composites, les polymères et leurs composites, les élastomères et enfin les matériaux cellulaires.

Sur cette représentation on peut relever notamment que:

- La matière vivante se développe essentiellement le long de cet axe vertical qui a une densité de 1 et on ne va pas au-delà d'une densité de l'ordre de 3. Ce n'est pas un hasard bien sûr puisqu'on est autour de la densité l'eau, molécule nécessaire au développement de la vie.
- malgré cela, les modules d'Young, et il en va de même pour les modules d'élasticité, couvrent une gamme de 4 décades, soient des propriétés mécaniques équivalentes à celle des matériaux synthétiques
- Et enfin, dernier point : il n'y a quasi pas de métaux, qui requièrent pour la plupart des procédés à haute température, ce dont la nature ne dispose pas !



■ 4 grands groupes identifiés :

- Céramiques et leurs composites
 - ✓ Composante minérale
 - ✓ Nacre, dents, os...
- Polymères et leurs composites
 - ✓ Ligaments, tendons...
 - ✓ Soie...
- Elastomères
 - ✓ Grandes déformations
 - ✓ Peau, muscles...
- Matériaux cellulaires
 - ✓ Légers
 - ✓ Os trabéculaires, bois...

■ Densité guère supérieure à 3

■ Prop. méca. 4 ordres de grandeur

■ Il n'y a pas de métaux

Nature vs. Ingénierie : des analogies et des spécificités

Ca nous amène à envisager les parallèles ou les différences entre matériaux naturels et matériaux synthétiques.

D'abord la nature ne dispose que d'un nombre limité d'éléments alors que l'ingénieur utilise la quasi-totalité de la table de Mendeleïeff avec une variété d'atomes absolument colossale.

Ensuite, la plupart des êtres vivants fonctionnent dans une gamme de température qui est modérée, entre 25 et 40 degrés Celsius environ. Si on regarde l'ingénieur, les procédés à toute température sont possibles. C'est même une voie de développement de nouveaux matériaux : avoir de plus en plus d'énergie pour les produire.

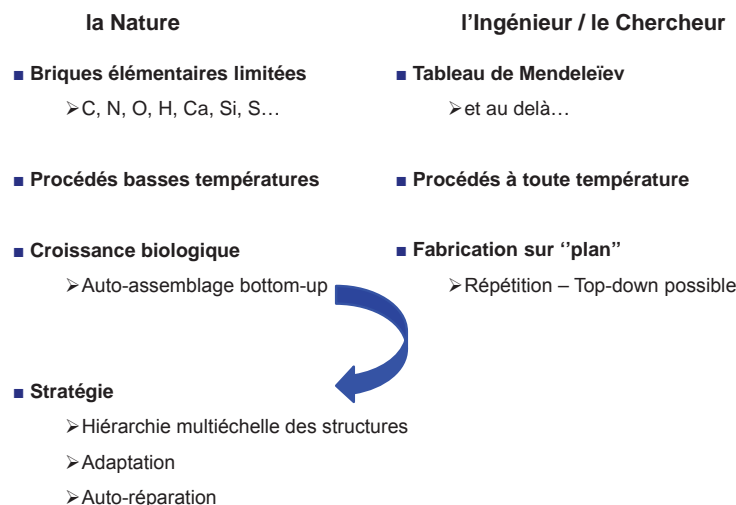
Enfin, du côté de l'ingénieur, on va construire un objet à partir de matériaux en suivant des plans de conception. Dans le matériau biologique, on va construire l'objet par croissance, par auto-assemblage contrôlé biologiquement. Et ce sont ces processus qui portent en eux la stratégie spécifique de la nature pour produire :

- des structures extrêmement hiérarchisées, multifonctionnelles;
- qui ont en outre la possibilité de s'adapter aux évolutions lentes des conditions au cours de la croissance : on a une redistribution de la matière à l'endroit où on en a besoin, donc une croissance adaptative;
- et qui ont une capacité d'auto-réparation : c'est quasi-universel dans la nature, la plupart des structures peuvent s'auto-réparer après un traumatisme !

Du côté de l'ingénierie on va avoir des microstructures et une forme finale, mais entre ces deux échelles on ne va pas avoir l'infinie variété de la hiérarchie des structures qu'on observe dans la nature. On va faire le design de la pièce et la sélection du matériau mais une fois qu'on a construit l'objet, il n'y a pas d'évolution possible ; il y a peu de chance qu'un pont s'adapte à la crue d'une rivière !

Aujourd'hui, en ingénierie, la manière dont on gère les évolutions c'est d'utiliser des coefficients de sécurité qui permettent de prendre en compte les risques de façon optimale. Cette stratégie à un coût, notamment environnemental, et on est donc obligé d'évoluer vis-à-vis de ces coefficients de sécurité, ce qui nous amène à regarder de près la manière dont la nature fonctionne.

Balayons donc ces trois spécificités et regardons si nous pouvons nous en inspirer pour développer des matériaux architecturés multifonctionnels.

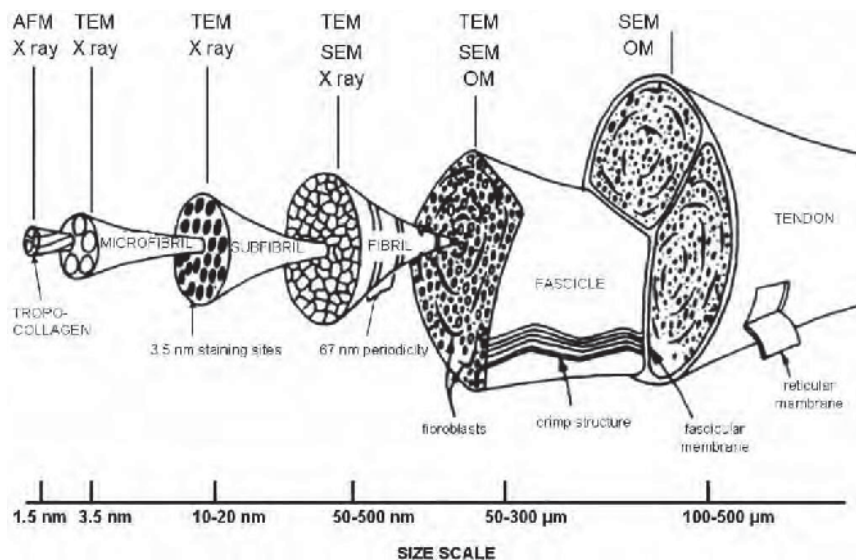


Structures hiérarchiques

Un exemple très représentatif : le tendon de dinde

C'est fascinant : on voit un câble de câble de câble de câble etc... où le plus petit câble est à l'échelle du nanomètre et on remonte jusqu'à l'échelle du mm.

La raison pour laquelle cette structure hiérarchique est très efficace, c'est notamment que lorsqu'on casse un morceau de la structure, il faut encore que la fissure qui a été créée à une échelle donnée, soit critique pour l'échelle du dessus, puis pour l'échelle du dessus puis pour l'échelle du dessus, etc... pour parvenir à la ruine du système.



Hierarchical structure of tendon starting with collagen molecules and techniques used to identify it
Baer et al., Phys Today, 1992

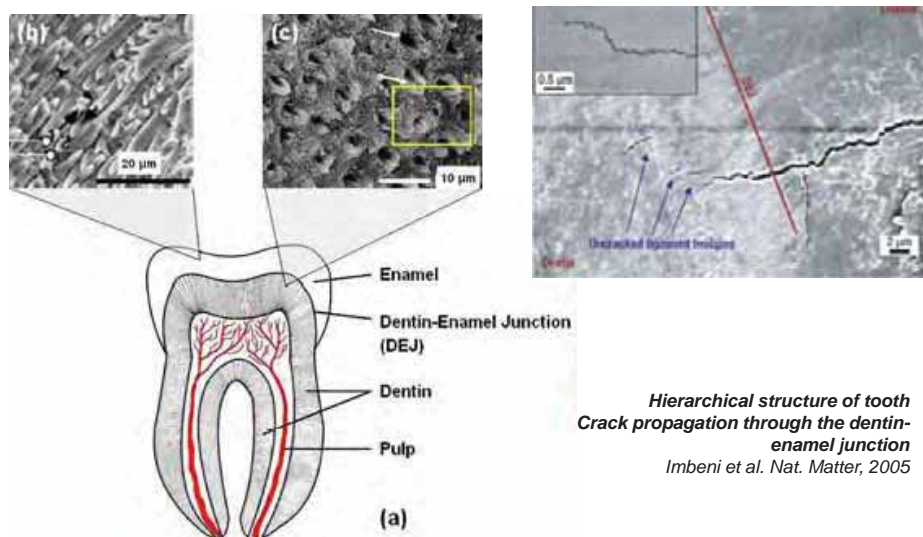
Structures hiérarchiques : gradient de propriétés

Un deuxième exemple de structure hiérarchique multifonctionnelle nous est fourni par la dent qui est un composite organique/inorganique.

Et c'est comme ça que la nature parvient à faire des **matériaux tenaces et résistants à l'usure** :

Dans la dent, la couche d'émail est résistante à l'usure, et en dessous, la couche de dentine est beaucoup plus molle. L'émail est un matériau fragile dans lequel la fissure se propage facilement. Par contre dans la dentine, la fissure est bloquée et a du mal à se propager. La dent, composite qui résulte de l'association de ces deux matériaux, est ainsi en mesure de résister beaucoup plus longtemps à un choc et donc d'être préservée sur une durée de vie à l'échelle humaine.

On peut s'en inspirer pour faire la même chose en tant qu'ingénieur. On peut envisager par exemple un acier dentaire, par un traitement thermique type décarburation, permettant d'obtenir un acier qui est dur à l'intérieur et mou à l'extérieur et qui sera donc plus tolérant aux dommages.



Structures hiérarchiques : diminution d'échelle

Deuxième stratégie de la nature pour faire des matériaux durs et tenaces c'est la diminution d'échelle : les phases fragiles sont de taille réduite de façon à ce que la chance d'avoir un défaut dans cette phase fragile soit très faible.

Pour ceux qui ont déjà essayé d'ouvrir une huître, ils savent que ça ne se passe pas comme dans un matériau synthétique fragile, où une amorce de fissure suffit à sa propagation, permettant ainsi de casser le matériau autrement dit d'ouvrir l'huître.

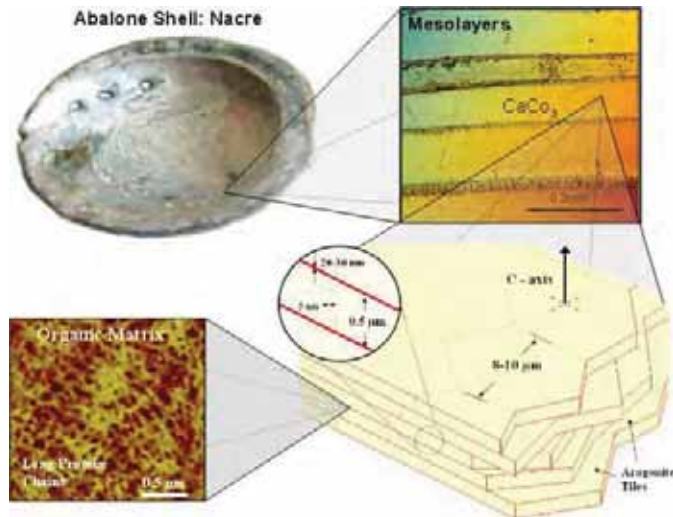
La raison à cela est l'alternance de structures pré-fragmentées dans la nacre des coquillages. Une espèce de pavages comme représentés ici, à l'échelle nano en épaisseur et à l'échelle de la dizaine de microns dans cette zone-là. Et entre ces pavages, on observe des couches de protéines qui sont molles et qui dissipent énormément d'énergie, aboutissant ainsi à ralentir, voire à empêcher la propagation de la fissure.

L'une des approches les plus innovantes aujourd'hui pour synthétiser ces structures microlaminaires consiste à faire croître des cristaux de glace, des dendrites, de manière contrôlée pour obtenir la structure voulue à partir de la congélation de suspensions colloïdales, type suspensions d'alumine.

Cela conduit à un auto-assemblage de l'alumine sous forme d'un empilement de briques et on obtient une structure proche de celle d'une nacre naturelle. Cette nacre artificielle

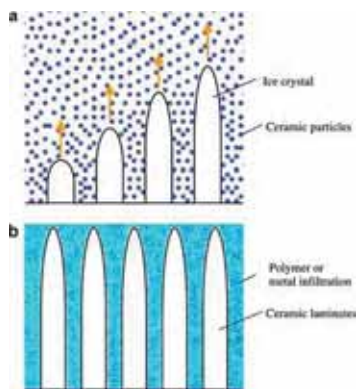
est dix fois plus tenace qu'une céramique classique composée d'alumine et conserve ses propriétés à des températures d'au moins 600°C.

Le procédé n'est pas exclusif à l'alumine et son industrialisation ne devrait pas présenter de difficultés majeures.



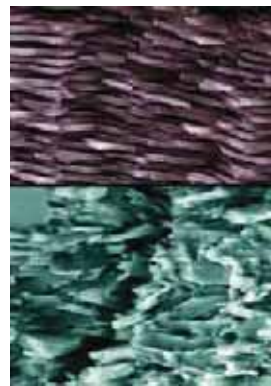
Hierarchy of abalone structure

M.A. Meyers et al., *Progress in materials Science*, 2008



**F. Bouville et al.,
Nature Materials. 2014**

- ✓ Congélation de suspensions colloïdales d'alumine
- ✓ Potentiel d'industrialisation



© Sylvain Deville, Florian Bouville, LSFC

- ✓ Structure de la nacre (en haut) et de la nacre synthétique (en bas), à la même échelle.
- ✓ Sur le cliché du bas, le parcours tortueux effectué par la fissure est bien observable.

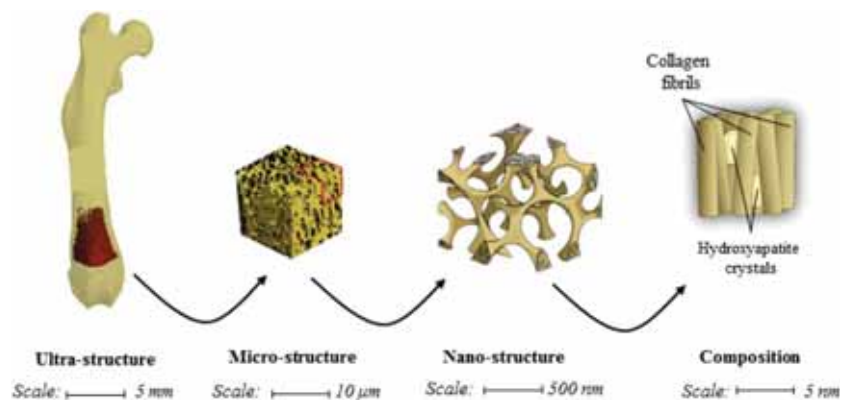
Structures hiérarchiques : optimisation des performances

Un autre exemple : l'os.

On a toujours cette structure hiérarchique de l'échelle macro à l'échelle nano.

A cette échelle l'os est clairement un composite, constituée d'une phase minérale, l'hydroxyapatite, et d'un polymère, le collagène, dans une proportion de l'ordre de 60/40.

Si je regarde ce composite dans le détail :



Biomechanics and Mechanobiology of Trabecular Bone: A Review
R. Oftadeh et al., J Biomech Eng 2015)

Structures hiérarchiques : optimisation des performances

Je vois que j'ai une alternance de matière minérale fragile et de collagène.

Réalisons une traction ou un cisaillement sur ce composite :

Sur ce diagramme on voit l'énergie absorbée pour une rupture. On a le collagène ici qui est essentiellement mou, qui absorbe beaucoup d'énergie et on a la matière minérale, qui est l'hydroxyapatite qui est essentiellement dure mais absorbe peu d'énergie

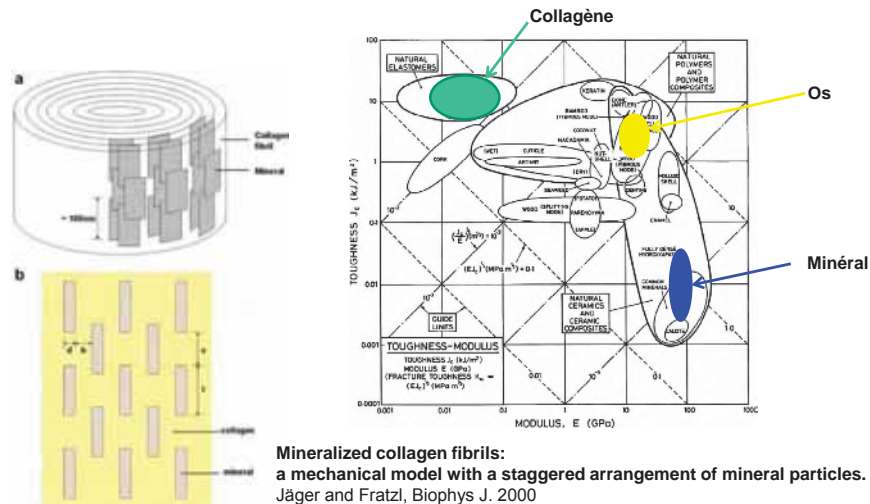
Si vous regardez l'os, l'os il est ici, il n'est pas quelque part entre les deux ou on l'attendrait *a priori* : il est bien meilleur que ça !

Cette structure spécifique, constituée d'une alternance de matière minérale fragile pré-fragmentée et de matière organique qui se déforme facilement, lorsqu'elle est soumise à une déformation en traction, impacte la partie organique au détriment de la partie minérale.

Les propriétés mécaniques de cet ensemble, on peut les calculer et on montre que la rigidité du composite est égale à la rigidité de la seule partie qui se déforme vraiment, c'est-à-dire la rigidité du polymère, qui est faible, mais qui est corrigée d'un rapport géométrique, qui est le carré du rapport de forme des plaquettes minérales. Pour l'os, ce

paramètre, ce rapport de forme est de l'ordre de 100, c'est-à-dire que la rigidité de l'os vaut à peu près 10000 fois la rigidité du polymère qu'il contient !

Voilà l'astuce : en réduisant l'échelle et en agissant sur le facteur de forme «la nature» va pouvoir amplifier l'effet composite, et obtenir avec l'os, un matériau dont les performances sont optimisées et bien meilleures que ce qu'on pourrait attendre en associant simplement les deux matériaux, le collagène et l'hydroxyapatite.



- ✓ Rigidité du composite : $E \propto \alpha (l/d)^2$
- ✓ G : module de la matrice
- ✓ Pour l'os : $l/d \approx 100$

Matériaux auto-cicatrisants

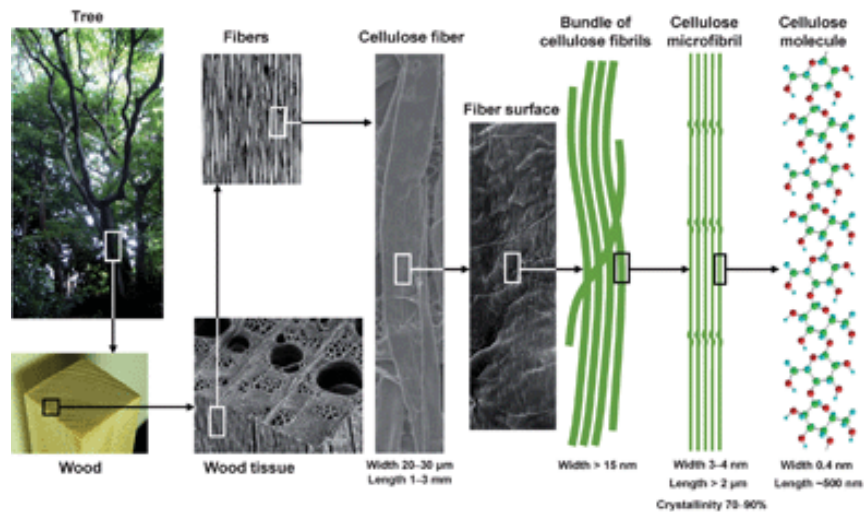
Je ne parlerai pas de croissance adaptative et de redistribution de matière faute de temps.

Par contre, on commence à savoir assez bien faire des matériaux auto-cicatrisants.

Il y a une dizaine d'année on a développé des matériaux polymères contenant des capsules d'agent repolymérisant. En cas de rupture, la fissure va rompre les capsules qui larguent l'agent repolymérisant permettant ainsi de refermer la fissure. Le problème de cette méthode est le volume fini de la capsule : une seule opération réparatrice en un seul endroit est possible.

Les chercheurs ont donc développé des matériaux auto-cicatrisants vasculaires, inspirés des réseaux de vaisseaux des organismes vivants. C'est un peu le même principe, sauf que grâce à la connectivité du réseau, plusieurs réparations sont possibles en un même site.

Aujourd'hui on sait aussi développer des polymères à auto-cicatrisation intrinsèque, dont la capacité d'auto-cicatrisation est carrément inscrite dans le réseau chimique du matériau. Les réparations s'effectuent grâce à des mécanismes moléculaires, tels que la création de liaisons hydrogène, ou la mobilité et l'enchevêtrement des chaînes du polymère. Chacun de ces mécanismes est réversible, ce qui autorise des réparations multiples.



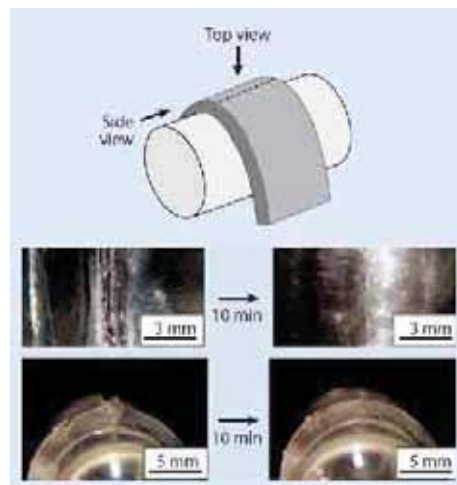
TEMPO-oxidized cellulose nanofibers

Akira Isogai et al., *Nanoscale*, 2011

Deux types de réparation intrinsèque qui sont déjà une réalité au moins à l'échelle des laboratoires :

■ Réparation intrinsèque

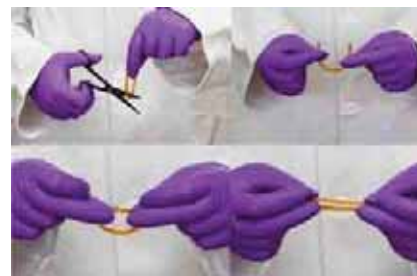
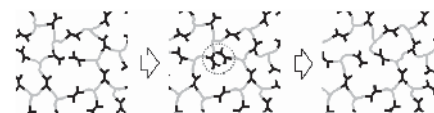
- Mobilité moléculaire



Self-Healing Polymers and Composites Yamaguchi et al. 2007

■ Réparation intrinsèque

- Élastomère supramoléculaire
- Liaisons hydrogène intermoléculaires

Leibler et al., *ESPCI*, 2008

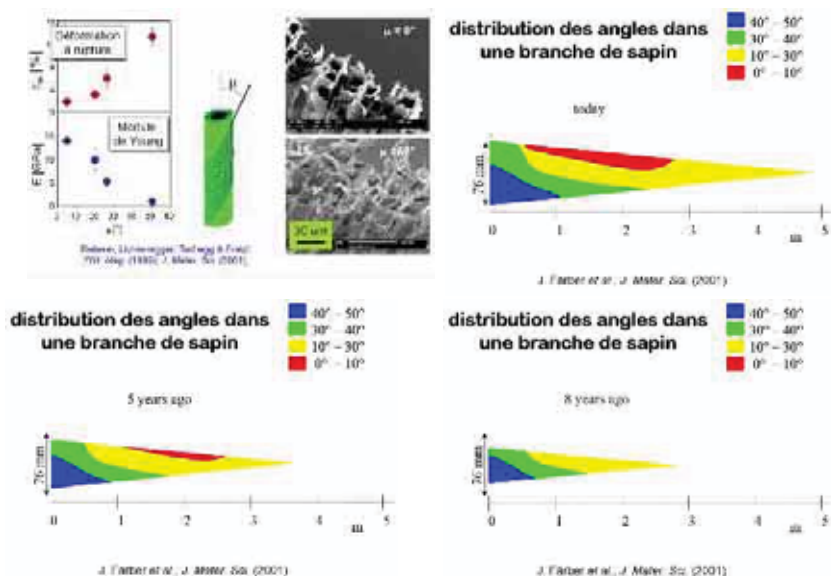
réactions d'échanges & réarrangement topologique

Ici on a un test qui consiste à couper avec un rasoir la surface d'un gel de polyuréthane et à visualiser la fermeture de la fissure. Il faut environ 10 min à température ambiante, pour que par contact des deux bords, la diffusion moléculaire permette le réenchevêtrement des chaînes de polymères au niveau de la coupure, et autorise la cicatrisation.

Un autre exemple est obtenu ici avec un caoutchouc "supramoléculaire"

- à température ambiante, le matériau créé se comporte comme un caoutchouc : alors que c'est habituellement l'apanage de longues chaînes macromoléculaires,
- grâce à ce design à partir de petites molécules, l'équipe de Leibler a constaté que ce matériau possède la possibilité de se réparer spontanément. Après coupure, les surfaces se recollent si on les remet en contact, sans qu'il soit nécessaire de chauffer ou d'appliquer une forte pression. Une fois réparé, l'échantillon est de nouveau capable de tolérer des déformations de 100 à 400% avant de se rompre de nouveau. Le processus peut être répété plusieurs fois et la réparation peut s'effectuer plusieurs heures après l'endommagement.

On introduit ici le concept d'une nouvelle chimie : la chimie supramoléculaire. Les associations intermoléculaires rompues se reforment spontanément, les liaisons moléculaires sont «réversibles», c'est à dire non permanentes, et c'est bien cette «réversibilité» des liens moléculaires qui est à l'origine de l'étonnant pouvoir d'auto-cicatrisation du caoutchouc.



Métamatériaux : les experts en escamotage

Avant de conclure, je voudrais faire une dernière comparaison entre l'homme et la nature:

La nature ne fait pas tout : elle n'a pas inventé la roue, parce qu'elle n'en avait pas besoin, alors que l'homme l'a fait, parcequ'il en avait justement l'utilité.

Je voudrais donc finir sur de nouveaux matériaux prometteurs : les métamatériaux

C'est une découverte de la fin des années 90 quoique la physique régissant son fonctionnement a été élaborée dans les années 1960 par Victor Veselago, qui a montré que des matériaux à indices de réfraction négative étaient envisageables, si la permittivité électrique relative et la perméabilité magnétique relative du matériau sont toutes deux négatives.

Or, les matériaux à perméabilité négative n'existent pas dans la nature !

La conséquence première d'une telle propriété est un angle de réfraction négatif, comme illustré ici et une des applications les plus spectaculaires est la «super lentille».

Une lentille ordinaire focalise un faisceau lumineux incident en un seul point et permet de reproduire l'image d'une source de lumière sur un écran.

Une lentille faite à partir d'un métamatériau pourrait prendre une forme plane, comme ici. Parce que l'indice de réfraction est négatif, les rayons dévient vers l'intérieur.



Self-Healing Polymers and Composites, B.J. Blaiszik et al., 2010 Composite: Fibres de verres (15µm) revêtues de capsules cicatrisantes.

■ Auto-réparation par rupture ou dissolution

- a - une seule opération réparatrice en un endroit donné
 - ✓ volume fini !
- b - connectivité du réseau
 - ✓ plusieurs réparations possibles en un même site
 - ✓ zones larges
 - ✓ capillarité du réseau !

■ Auto-réparation intrinsèque

- Mécanismes moléculaires réversibles
 - ✓ liaisons hydrogènes, interactions ioniques
 - ✓ mobilité et enchevêtrement des chaînes polymères
- Zones limitées
- Compatibilité !
- Réversibilité : réparations multiples

- ✓ efficacité : 21% à > 100%
- ✓ performances du matériau
- ✓ systèmes plus sûrs, plus durables et moins coûteux à entretenir

Étant plane, la super lentille élimine totalement les aberrations sphériques de l'image que produit une lentille ordinaire. Mais sa propriété la plus étonnante est qu'elle peut atteindre une résolution plus grande que celle imposée par la limite de diffraction

classique, qui interdirait d'imager une source lumineuse plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisée. La partie de l'onde contenant l'information nécessaire pour obtenir cette résolution se dissipe très rapidement dans une lentille classique alors qu'elle est amplifiée par une super lentille, permettant donc d'envisager d'aller au-delà de la limite de diffraction ! Pendant plus de cent ans, cette loi est restée gravée dans le marbre de la physique. En 2005, des chercheurs de Berkeley ont réussi à imager clairement le mot NANO écrit avec une épaisseur de ligne environ 10 fois plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisée.

Le principe physique qui sous-tend les métamatériaux est une variation spatiale de l'indice de réfraction : on transforme l'espace pour les ondes électromagnétiques, on leur trace le chemin qu'on veut leur faire parcourir.

Pour ça, pour créer ces déviations, il faut créer des matériaux artificiels structurés, dont on peut ajuster l'indice optique en ajustant la géométrie des structures, cette géométrie étant déduite à partir de transformations reliant l'espace réel à un espace virtuel, où une partie est supprimée.

Plutôt qu'un matériau massif, Pendry a eu l'idée d'utiliser des résonateurs constitués de deux anneaux conducteurs ouverts, de quelques millimètres de diamètre, concentriques et faiblement espacés dont la perméabilité est ajustable en fonction de la géométrie de la cellule élémentaire du matériau.

En combinant un réseau de fils fins, tiges ou circuits imprimés, avec un réseau de ces anneaux, une première démonstration expérimentale de structure d'un méta-matériau présentant simultanément une perméabilité et une permittivité négatives a été obtenue en 2001 pour des fréquences de l'ordre du GHz (domaine des micro-ondes).

Il apparaît alors une bande de transmission sous la fréquence plasma du réseau de fils et autour de la fréquence de résonance des SRR.

Les applications envisagées sont nombreuses. Une des plus fascinante est l'invisibilité d'un objet enrobé par un méta-matériau.

Dans le cas présent, la cape cylindrique est formée d'anneaux métalliques coupés, répartis suivant les rayons du cylindre. L'indice optique est ajusté radialement en modifiant l'ouverture des anneaux depuis la paroi interne du cylindre jusqu'à sa périphérie. La cape est testée sur un banc micro-onde et la transformation comprime effectivement les trajectoires de tous les rayons afin qu'ils évitent la région centrale $r < R_1$, et restent confinés dans la région $R_1 < r < R_2$.

Le résultat de Pendry : la cape permet de rendre invisible aux micro-ondes et de protéger contre ces micro-ondes des objets quatre fois plus gros,

La force du concept c'est qu'il est transposable à toutes les disciplines de la physique :

En fait il s'agit de créer des résonances, en envoyant une onde, un champ électromagnétique, qui va faire vibrer la nanostructure, et cette nanostructure va réagir avec un indice de réfraction négatif, une permittivité négative et pourquoi pas une masse ou un coefficient de poisson négatif...

Conclusion:

Que faut-il finalement retenir?

La science des Matériaux est une science jeune qui depuis les années 50 s'est développé dans trois directions les métaux, les polymères et les céramiques. Depuis les années 1990, de nouvelles opportunités s'offrent à elle avec les matériaux biologiques et un nouveau positionnement émerge à la confluence de la physique de la chimie et de la biologie.

Ce schéma est indicatif des interactions complexes qu'il est nécessaire de maîtriser et de contrôler en vue d'exploiter et de s'inspirer des matériaux biologiques.

Il y a bien sûr des obstacles à cela :

- 1- Il faut bien sûr adapter les principes, c'est-à-dire ne pas essayer de copier la nature, mais s'en inspirer. Il faudra pour cela développer les outils qui sont déjà à notre disposition et sans doute en imaginer de nouveaux.

La chimie supramoléculaire en est un. Si la chimie moléculaire est la science de la matière inerte et de sa transformation, la chimie supramoléculaire est l'approche indispensable pour comprendre comment la matière s'anime et prend vie. Les liaisons physiques réversibles qu'elle étudie sont à l'oeuvre dans des processus biologiques comme la reconnaissance moléculaire et l'auto-assemblage.

De manière évidente la transdisciplinarité en est un autre : Sans l'avènement des métamatériaux en optique, sans la capillarité de la connaissance de l'optique vers d'autres disciplines on n'aurait pas pu avoir aujourd'hui des résultats fascinants pour les métamatériaux thermiques, acoustiques ou mécaniques.

- 2- Il faudra adapter les procédés.

Intégrer la géométrie et la topologie, penser les interfaces, incorporer la complexité hiérarchique en privilégiant les approches « bottom-up » et les connexions aux échelles nano-micro-méso et macro. Cette approche est à l'intersection de la biologie et des nanotechnologies, et a déjà produit de nouvelles architectures avec des applications potentielles dans de nombreux domaines.

- 3- Il faudra enfin augmenter notre compréhension des interactions entre matériaux synthétiques et structures biologiques dans le but d'intégrer des systèmes nouveaux et complexes dans le corps humain. Cela nous conduira encore plus et de manière plus efficace à la supplémentation et la substitution d'organes, au développement de l'ingénierie tissulaire...

Et bien sûr continuer à intégrer toute la chaîne : de la disponibilité des ressources à l'analyse de cycle de vie avec toujours le souci de prendre en compte le coût énergétique global sur l'ensemble du processus.

Séance II :
SCIENCES ET TECHNIQUES DU VIVANT

DE LA DIVERSITE DES GENES À LA COMPLEXITÉ DU VIVANT

Pr. Philippe KOURILSKY

*Membre de l'Académie des Sciences de France
Professeur Honoraire au Collège de France*



INTRODUCTION

La biologie est profondément marquée, depuis une vingtaine d'années, par l'évolution foudroyante des méthodes et techniques d'analyse. Le séquençage de l'ADN est emblématique. Aujourd'hui la vitesse d'acquisition des séquences est environ un milliard de fois supérieure à celle des débuts. La baisse des coûts a été substantielle. On va pouvoir séquencer un génome humain pour quelques centaines de dollars en moins d'une heure, ce qui ne manquera pas de modifier certaines pratiques médicales. Cette révolution n'est pas la seule, ce dont témoigne, dans le jargon sémantique des biologistes, la prolifération des «-omes» et des «-omiques». L'imagerie (s'agissant, notamment des techniques non-invasives) ne cesse de progresser. Il en va de même pour la robotique. Tous ces développements sont permis et soutenus par la progression colossale de l'informatique, qu'illustre «la loi de Moore».

Ce contexte facilite une évolution de la recherche biomédicale, dans laquelle l'homme, sa finalité, est pris pour objet premier, et pas seulement pour des applications médicales. Tout en les exploitant, la recherche fondamentale, tend à s'affranchir des modèles animaux. Ces derniers restent, bien sûr, indispensables, mais certains problèmes peuvent désormais être abordés directement chez l'homme. Le «modèle humain», comme certains l'appellent, bénéficie de l'énorme quantité d'informations sur les polymorphismes génétiques et d'observations cliniques bien documentées.

Il est devenu banal d'affirmer que ces avancées marquent la fin de l'exclusivité des approches réductionnistes auxquelles les biologistes étaient contraints d'adhérer. Cela est juste, mais l'entrée dans l'ère des «big data» autorise immédiatement une meilleure compréhension des systèmes. Nous sommes plutôt à une époque d'acquisition systématique des données, et ce que j'ai baptisé «*biologie systématique*» n'est qu'un prélude (sans doute nécessaire) à la *biologie systémique*. Il est de fait qu'une quantité considérable et croissante de données échappe aujourd'hui à toute interprétation. Quant à la biologie systémique, elle requiert des concepts et des outils spécifiques. Elle est aujourd'hui dans les limbes. J'aborderai ici une série de sujets, qui ont pour point commun de tendre, à partir des bases fournies par la génétique moléculaire, vers la complexité du vivant. Et ce, au niveau de la recherche elle-même et à celui de ses applications à l'homme. Dans cet article à la bibliographie sommaire, je m'appuierai sur quelques uns de mes écrits qui contiennent, eux, une bibliographie détaillée ¹.

I- SUR LES SYSTEMES COMPLEXES EN GENERAL : QUELQUES CONCEPTS UTILES

A- Définition et propriétés des systèmes complexes

On doit reconnaître que les ingénieurs, les climatologues, les informaticiens, et d'autres, ont, bien avant les biologistes, développé une approche scientifique de la complexité et théorisé les systèmes complexes. Ainsi, la conception et la construction d'un Airbus mettent en jeu des plateformes gigantesques de modélisation et de calcul. Certains estiment que de tels artefacts sont compliqués sans être complexes, parce qu'ils pensent que leur construction ordonnée par l'homme élimine toute surprise (toute propriété émergente). Mais cela est inexact, notamment parce que, comme on le verra, ces objets font, eux aussi, face au hasard. Je tiens donc pour assuré que l'étude de la complexité d'objets biologiques, peut bénéficier de celle des artefacts créés par l'homme ².

Qu'est ce qu'un système complexe? J'adopterai la définition selon laquelle les systèmes complexes comprennent de nombreux constituants distincts, et de nombreux liens différents entre des éléments distincts. Ainsi, un gaz parfait n'est pas complexe. Au demeurant, la physique s'est initialement développée grâce à une démarche simplificatrice visant précisément à écarter ou diminuer la complexité. De façon générale, les traitements

1- Je renvoie à deux de mes livres et à deux articles en «open source», le dernier, daté 2016, étant particulièrement documenté

- Philippe Kourilsky *Le jeu du Hasard et de la Complexité, la nouvelle science de l'immunologie*, Odile Jacob, Paris, 2014

- Philippe Kourilsky *Le Temps de l'Altruisme*, Odile Jacob, Paris, 2009

- Kourilsky P., Giri I., «Safety standards : an urgent need for Evidence-Based Regulation» *S.A.P.I.E.N.S.*, 2008, 1, 105-115, www.sapiens-journal.org.

- Kourilsky, P *The natural defense system and the normative self model* *F1000Res*, 2016 May 3;5:797. doi: 10.12688/f1000research.8518.1. eCollection 2016.

2- Doyle JC, Csete M *Architecture, constraints, and behavior*. Proc Natl Acad Sci U S A. 2011 Sep 13;108 Suppl 3:15624-30.

statistiques sont insuffisants pour décrire les comportements des systèmes complexes.

Trois termes sont essentiels pour ce qui suit.

- *réseau* : c'est un mode de représentation fréquent, qui figure les éléments et leurs liens, ainsi que les nœuds d'interactions.
- *module* : c'est un sous-ensemble pertinent du système.
- *robustesse*, c'est la propriété que possède (ou non) un système de continuer à fonctionner correctement en dépit d'aléas externes ou internes. Cette capacité repose généralement sur l'existence de mécanismes de contrôle de qualité et de dispositifs de correction d'erreurs. On verra que cela vaut pour un avion comme pour une bactérie ou un éléphant.

B- Comment évaluer la complexité d'un système ?

J'ai volontairement omis de préciser les nombres de constituants et de liens qui permettent a minima de qualifier un système de « complexe », tant il est vrai qu'il y a une certaine subjectivité dans cette appréciation. Le doute s'évanouit devant des réseaux tels que celui de la figure 1. On peut vouloir en évaluer la complexité en dénombrant les éléments et les liens (plusieurs centaines pour les uns et les autres). Il existe une autre méthode, récente, qui dérive de la théorie des contrôles. Combien de nœuds d'un réseau faut-il contrôler pour assurer son passage d'un état A à un état B en un temps fini ? La proportion de ces nœuds « directeurs » fournit une mesure de la contrôlabilité, dont on comprend intuitivement qu'elle informe sur la complexité du système (et sur son architecture)³.

Les résultats de modélisations effectuées à partir de données publiées sur plusieurs dizaines de réseaux sont frappants. Avec 80% de nœuds directeurs, les systèmes biologiques, depuis la cellule, apparaissent comme les plus complexes de tous. De plus, l'architecture multi-niveaux des systèmes biologiques comme le corps humain accroît leur complexité. Cela soulève de nombreux problèmes, dont celui de la modularité, (abordé plus loin sous l'angle de l'intégration fonctionnelle dans des dispositifs modulaires de logique floue).

II- LE SYSTÈME COMPLEXE DES DÉFENSES NATURELLES DE L'HOMME

1- La complexité dans les sciences de la vie et dans les sciences de l'ingénieur

Entre ces deux grands champs disciplinaires, on peut trouver des points de convergence majeurs (en particulier, sur la question de la *robustesse*, comme cela sera expliqué plus loin) et deux différences importantes. La première a déjà été mentionnée. Le *degré de complexité* des systèmes vivants est extrêmement élevé, ce qui implique que leur architecture est extrêmement intriquée. De plus, l'identification des *modules* dans n'est pas triviale. Au lieu d'être « fermés » comme dans les systèmes mécaniques, ils sont

3- Liu YY, Slotine JJ, Barabási AL. *Controllability of complex networks*. Nature. 2011 May 12;473(7346):167-73.

«ouverts» : leurs limites sont incertaines, du fait, notamment, des nombreuses intrications fonctionnelles. En réalité, ils résultent de conventions entre scientifiques, de discussions plus ou moins explicites, d'où il apparaît qu'un module «réplication de l'ADN» fait sens. Mais cela n'implique pas qu'il soit précisément borné.

Ainsi s'explique la définition donnée plus haut. Les modules sont bien des *sous ensembles pertinents*, et jugés tels par des communautés scientifiques. Leur contenu est susceptible d'évoluer, et cela est patent dans le cas du système immunitaire, qui, comme le système nerveux, constitue un module majeur de l'organisme. La discussion qui suit en élargit les limites au point de l'inclure dans un module que je juge plus pertinent : le système des défenses naturelles.

2- Le système des défenses naturelles

a- Agents infectieux et erreurs de fonctionnement internes

Les dangers auxquels l'organisme est confronté proviennent, soit de l'extérieur, soit de l'intérieur. Les ennemis de l'extérieur se trouvent dans l'environnement, et les plus abondants et dangereux sont les agents infectieux, contre lesquels, dans sa conception première, lutte principalement le système immunitaire.

Les ennemis de l'intérieur nous sont moins familiers. Ce sont, pour l'essentiel *des erreurs de fonctionnement internes*. En voici quelques exemples :

- Dans la synthèse de l'ADN : 1 nucléotide sur 1.000.000.000
- Dans la synthèse des protéines: 1 acide aminé/100.000
- Dans le repliement des protéines
- Dans les interactions entre récepteurs et ligands spécifiques
- Dans le trafic des molécules et des cellules

Etc.

Le point clé est que *l'accumulation d'erreurs peut déborder les dispositifs de surveillance de détection, de correction et de réparation, avec pour conséquences pathologiques majeures, les cancers, les accidents cardiovasculaires, etc.*

b- Un seul système, (plutôt que deux), gère les dangers internes et externes.

On peut s'en convaincre en constatant qu'un agent infectieux peut être reconnu comme une structure «étrangère», mais aussi par les désordres qu'il provoque. Un système qui détecte les désordres peut prendre en compte *les infections comme les cancers*. Dans les deux cas, sentinelles, soldats, éboueurs et réparateurs sont en général les mêmes.

Une autre raison dérive de la parfaite congruence entre le périmètre assigné au système des défenses naturelles, et la robustesse telle que je l'ai définie : la propriété que possèdent certains systèmes de continuer à fonctionner correctement en dépit d'aléas externes ou internes. Ainsi, la fonction du système de défenses naturelles est tout simplement de conférer de la robustesse à l'organisme. L'idée que la robustesse est probablement un

moteur puissant de l'évolution des espèces ajoute à la cohérence de cette vision. En résumé, la robustesse permet à l'organisme de faire face et de résister aux hasards de la vie.

Voilà pourquoi cet élargissement du système immunitaire, désormais «dilué» dans un sous ensemble plus grand (dont il est difficile d'évaluer la taille, peut-être 20% ou plus de tout l'organisme?) me paraît utile et porteur de sens, comme je l'ai discuté ailleurs en détails (Kourilsky, P. 2016).

c- Les erreurs sont inéluctables, et se produisent partout, tout le temps.

Leur élimination totale est impossible, parce que le coût biologique serait trop élevé. Par ailleurs, plus un système est complexe, plus il fait d'erreurs, à moins qu'il n'intègre toujours plus de mécanismes de correction. Mais ceux-ci, bien que rarement, font eux aussi des erreurs, d'où, peut-être, certaines maladies auto-immunes).

d- Surveillance, correction et réparation sont à l'œuvre sans relâche.

D'où il résulte que, sans avoir conscience de cette intense activité interne, nous faisons probablement plusieurs infections et petits cancers chaque année, chaque mois, chaque semaine, chaque jour ? Ces événements adverses, une fois corrigés, passent inaperçus puisque, en général, nous n'observons que ceux qui ne le sont pas. Nous serions bien venus de nous intéresser de plus près aux cicatrices, même minimes, qu'ils peuvent engendrer.

e- Enfin, il faut noter que la démarche intellectuelle proposée conduit à examiner de façon particulière *l'intégration du système des défenses naturelles dans l'organisme*, et à établir des liens plus étroits entre des champs apparemment distincts : métabolisme, rythmes circadiens, système endocrinien, système nerveux, sciences «molles». On doit encore compter avec le microbiote (le microbiote intestinal est le plus étudié mais n'est pas le seul), avec des corrélations parfois surprenantes (différence de microbiote entre naissance naturelle ou par césarienne : quelles conséquences?), et de nouvelles interfaces et ouvertures. Ainsi, il me paraît possible de progresser vers une «neuro-psycho-immunologie» scientifique.

III- SUR LA GENETIQUE DES SYSTEMES VIVANTS COMPLEXES

A l'ère du séquençage et à une époque où l'on promet que celui ci apportera de nombreux bienfaits médicaux, il est bon de s'interroger sur le statut de la génétique humaine. Je n'aborderai que deux aspects de cette vaste question.

A- L'importance des mutations faibles pour la génétique humaine

Historiquement, la génétique des microorganismes s'est fondée sur l'étude de mutations fortes, qui affectent de façon observable le phénotype des mutants (voire leur survie). Mais beaucoup de mutations, dites «faibles» ont des effets non aisément observables. Les mutants de ce type ont été peu étudiés.

La génétique de l'homme est dominée par l'existence d'un très grand nombre de polymorphismes, qui, pour une large part, échappent à l'interprétation. Si beaucoup de ces polymorphismes génétiques n'ont probablement aucun effet, d'autres pourraient constituer des *mutations faibles*. Elles pourraient altérer, de façon «modeste», soit la fonction d'une protéine en raison d'une mutation dans sa séquence codante, soit son niveau d'expression lorsque la mutation affecte l'environnement du gène (promoteur, structure locale de la chromatine, etc.).

Dans cette perspective, ce seraient des *combinaisons de mutations faibles* (possiblement actives en cis) qui pourraient produire des pathologies.

B- Une génétique des réseaux représentatifs de systèmes complexes

Un autre angle d'approche est d'inscrire les mutations, faibles et fortes dans le fonctionnement des réseaux. Cela pousse à analyser les compensations (par exemple entre deux mutations fortes qui peuvent se neutraliser) et les synergies (notamment entre combinaisons de mutations faibles qui finissent par dérégler l'ensemble).

Une question importante est celle des combinaisons de mutations actives en cis, c'est à dire localisées sur le même chromosome. Typiquement, des mutations qui affectent la structure de la chromatine ont une action locale et pourront n'avoir d'effet que combinées à d'autres situées sur le même chromosome. Les données de séquençage livrent le mélange des séquences des chromosomes homologues, d'où il n'est pas facile de tirer des informations sur ce qui se passe en cis. Ce pourrait être l'une des raisons pour lesquelles les analyses de GWAS ne livrent que peu de corrélations très fortes avec des maladies.

C- Une évolution darwinienne interne pendant la génération des gamètes?

Chez l'homme, plus de 200 divisions séparent la cellule primitive des spermatozoïdes mûrs. Cela fournit un formidable espace de sélection intérieure. J'ai relevé que cela pourrait permettre des sélections au niveau des réseaux de gènes fonctionnels des cellules, et non plus seulement des gènes en tant que tels ⁴.

D- Une forme supplémentaire d'épigénétique : la déformation des réseaux

Enfin, les réseaux intracellulaires sont très probablement «élastiques», ie, ils peuvent fluctuer entre plusieurs états. C'est ce que suggèrent de nombreuses observations sur la diversité d'expression des gènes dans des cellules isolées. Cela fournit une autre source de phénomènes épigénétiques, dont j'ai discuté l'importance dans le système immunitaire et dans le système de défenses naturelles

4- Kourilsky, P., *Selfish cellular networks and the evolution of complex organisms*.
C R Biol. 2012 Mar; 335(3):169-79.

IV- COMPLEXITE ET MEDECINE DU FUTUR

A- Les promesses (excessives?) du séquençage pour la médecine

Il est clair que le séquençage du génome humain a déjà et aura plus encore des incidences majeures sur la pratique médicale. Mais, comme Sidney Brenner, on ne peut qu'alerter sur les mirages des «big data» et les rêves de déconvolution de ces dernières⁵. On est encore loin de l'époque où chaque patient, avec son génome en poche, ira voir un médecin formé de façon à être capable de s'en servir utilement. On notera aussi qu'avant une médecine individualisée, on verra plutôt une médecine catégorisée, ou personnalisée par des traitements autologues.

Il n'empêche que la médecine connaît une évolution profonde et spectaculaire. J'insisterai sur trois points :

- a- D'une part, ce qui est neuf et important, c'est une meilleure prise en compte de la complexité, appréhendée et comprise (autant qu'il est possible) à partir d'un maximum de données pertinentes.
- b- Le séquençage en fait partie, mais n'est pas tout. Il faut faire attention à ne pas le surinvestir aux dépens d'autres secteurs importants, comme l'imagerie.
- c- De plus, il faut veiller à la formation des médecins comme des chercheurs, et prêter attention à l'émergence de nouveaux métiers (comme celui de bio-analyste).

B- Biotechnologie et nouveaux médicaments

Il est remarquable d'observer que, *bien que la science biomédicale soit florissante, les nouveaux médicaments et vaccins sont apparemment plus difficiles à découvrir et plus chers à développer*. C'est la «EROOM's law»⁶. Peut-être faudrait-il l'actualiser, mais on peut discuter de quelques points.

Le premier relève une fois encore de la complexité. Il se peut qu'ils soient *plus difficiles à découvrir*. On notera que les criblages à haut débit n'ont pas eu autant d'efficacité qu'on l'avait espéré. Qu'en sera-t-il du séquençage massif? Etre systématique ne suffit pas. Il faut accéder à la compréhension systémique. *L'intelligence biologique est plus nécessaire que jamais*.

Le second est que ces nouveaux produits sont beaucoup *plus chers à développer*. Mais pourquoi cette augmentation du coût de l'innovation médicale? On peut invoquer plusieurs raisons. La première est le coût de la précaution, dont les externalités financières et sociales sont parfois sous estimées, voire ignorées. Cela est particulièrement criant pour certains pays en développement dans lesquels le principe de précaution a été exporté sous forme de normes internationales parfois très coûteuses et prétendument animées par la morale (cas du vaccin contre le rotavirus). On ajoutera que la croissance ininterrompue de la complexité

5- Brenner, S. *Sequences and consequences* Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2010 Jan 12; 365(1537):207-12.

6- Scannell, J W et al, *Nature Reviews Drug Discovery* **11**, 191-200 (March 2012).

institutionnelle et de la lourdeur des réglementations a un coût significatif (qu'illustre bien le coût et la durée de mise en place des essais cliniques de phase I pour la recherche).

Enfin, il faut prêter attention à la financiarisation. Elle répond à des besoins d'investissements de longue durée pour le développement des médicaments et vaccins (dix ans et plus), et au désir de partager les risques. Ceux-ci sont significatifs, puisque de nombreux produits en développement échouent et n'atteignent jamais le marché. Une mécanique financière à plusieurs étages et mettant en jeu des apporteurs de fonds divers, est ainsi, le plus souvent à l'œuvre.

Le cas du dernier médicament dirigé contre l'hépatite C me paraît doublement exemplaire. D'abord, il s'agit d'un succès thérapeutique remarquable, qui guérit à environ 90% une maladie jusqu'alors difficilement curable. Ensuite, c'est, à ma connaissance, le premier médicament issu d'une biotech dont les coûts de développement ont dépassé les 10 milliards d'Euros (contre 2 à 3 précédemment). Sur cette somme, il semblerait que les trois quarts soient des frais financiers. In fine, en effet, l'entreprise pharmaceutique Gilead a acheté en 2011 Pharmasset (fondée en 1998) pour 11 milliards de dollars, (avec un emprunt de 6 milliards) dont environ 5% ont (probablement) été versés au CEO et aux 81 employés.

Evidemment, le prix du médicament est élevé. Son coût en France a été négocié à près de 50.000 Euros par traitement. Potentiellement, il existe, en France, de plus de 100.000 patients, ce qui définit un marché de 5 milliards d'Euros. Il sera largement imputé à la sécurité sociale, qui, au demeurant, ne fait pas une mauvaise affaire : le traitement précédent, peu efficace, coûtait en moyenne un peu plus cher.

Quoi qu'il en soit, cela donne à réfléchir sur les dispositifs de valorisation des recherches académiques, sur les start-ups, les biotechs, leurs modes de financement, ainsi que sur le positionnement des «big pharma» et l'externalisation fluctuante de leur R&D. Je n'entamerai cette discussion mais j'inciterai à réfléchir sur la soutenabilité.

QUELQUES CONCLUSIONS

J'ai couvert trop brièvement de vastes champs de la biologie, et je conclurai par une série d'interrogations éthiques qui portent :

- sur la pratique de la recherche elle-même :

Où nous mène une course aux publications parfois déraisonnable, avec une dérive notable du système de publications, une dégradation trop fréquente de la revue par les pairs, un certain arbitraire dans l'évaluation des chercheurs (particulièrement des jeunes chercheurs), etc.?

- sur le partage des bénéfices de la connaissance* pour les individus, pour les institutions de recherche, les états qui les financent, l'industrie et les investisseurs.
- sur les arbitrages entre précaution et intérêt public*, comme dans le cas de la vaccination où l'intérêt individuel ne coïncide pas toujours avec l'intérêt public.

- *sur les arbitrages entre opinion publique, intérêt public et intérêt politique*, comme on a pu le voir dans des cas tels que la vaccination contre l'hépatite B en France ou contre la rougeole au Royaume Uni.
- *sur des questions de justice et d'équité à l'échelle nationale* : inégalités devant les traitements et les soins, notamment en raison de leur coût (coût élevé des anticancéreux, des traitements contre l'hépatite C).
- *sur des questions de justice et d'équité à l'échelle internationale* : parmi la longue liste d'exemples, les problèmes liés au Sida sont emblématiques (accès aux antirétroviraux, politique des brevets, accords de Doha, ...). On y ajoutera la question de la politique des prix différenciés, de la distribution des vaccins essentiels (cf GAVI et le vaccin contre la rougeole, notamment), etc.

Je tiens encore à souligner l'importance que revêt à mes yeux la prise en considération de l'éthique contextuelle en regard de l'éthique universaliste (cas du vaccin contre le rotavirus discuté dans : Kourilsky et Giri, 2008), et tout autant de l'éthique de la rationalité et de la rationalisation. Cela veut dire, pour moi, de revenir autant qu'il est possible aux données objectives, à la méthode scientifique, et à la science elle-même (science de la réglementation).

Chacun de ces points mériterait de longs développements. Mais il reste, pour finir, une question majeure : Que faut-il enseigner à nos étudiants? Comment les préparer à la science de la complexité? Comment les instruire sur l'éthique d'un monde de plus en plus complexe?

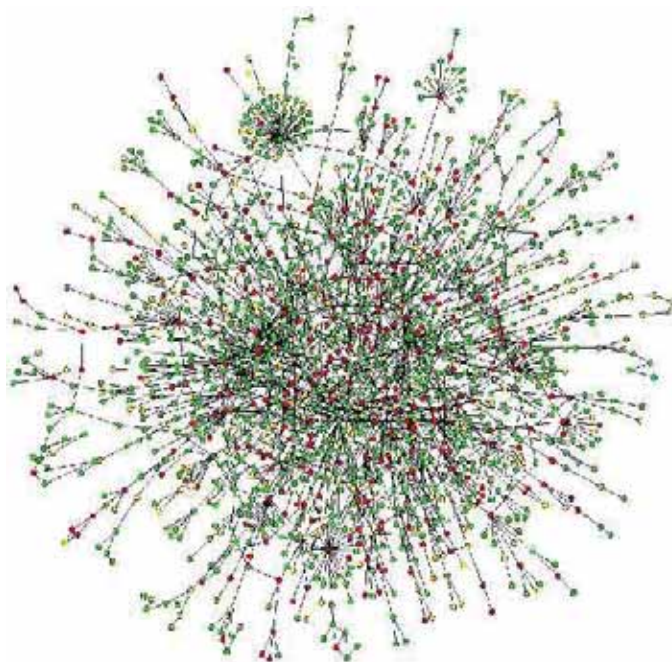


Figure 1 : (from Barabási et al. Network Biology: Understanding the cell's functional organization. Nat Rev Genet. 2004 Feb;5(2):101-13.)

CRISPR/CAS9 : DU SYSTÈME IMMUNITAIRE BACTÉRIEN À L'OUTIL RÉVOLUTIONNAIRE D'INGÉNIERIE DES GÉNOMES

Pr. Philippe HORVATH

*Université Louis-Pasteur
Strasbourg, France*



**Madame la Directrice,
Monsieur le Secrétaire Perpétuel,
Chers Collègues,
Mesdames et Messieurs,**

J'ai l'honneur et le plaisir d'être parmi vous aujourd'hui, et je voudrais remercier le Professeur Fassi-Fehri de son invitation; j'exprime également ma gratitude au Professeur Sasson pour ses conseils.

Je vais vous présenter ce qu'est CRISPR-Cas, incluant Cas9. Depuis 2007 j'ai eu l'occasion de faire différentes présentations, mais aujourd'hui celle-ci est une première, à différents titres. D'une part c'est pour moi la première fois que je mets le pied sur le sol africain, donc je réalise – grâce à Michel Brunet – que je reviens «à la maison»; c'est bien sûr une première fois au Maroc, et c'est également la première fois que je commencerai ma présentation par une citation. J'ai repris un passage du livre «Le hasard et la nécessité» de Jacques Monod, chapitre 9, où il est dit : «Non seulement la génétique moléculaire moderne ne nous propose aucun moyen d'agir sur le patrimoine héréditaire pour l'enrichir de traits nouveaux, pour créer un surhomme génétique, mais elle révèle la vanité d'un tel espoir : l'échelle microscopique du génome interdit pour l'instant et sans doute à jamais de telles manipulations». Il s'agit d'un livre qui a été publié en 1970, année de ma naissance, donc cela ne fait que 45 ans (une paille par rapport aux 7 milliards d'années d'évolution de l'homme!) mais c'est quand même suffisant pour dire maintenant que cette allégation est fausse. Et donc, contrairement à ce qui a été dit hier à

propos d'Einstein et de Darwin, dont les théories se sont avérées justes, cette affirmation de Jacques Monod est manifestement fausse, aujourd'hui.

Vous avez peut-être entendu parler de CRISPR-Cas9: il s'agit d'une véritable «révolution», c'est le terme employé depuis 3 ans dans la presse et également dans la presse scientifique. Le terme CRISPR est utilisé pour cet outil d'ingénierie des génomes, et je tiens à préciser que ce n'est pas entièrement correct: pour l'édition des génomes, il ne s'agit pas de CRISPR qu'on utilise, mais d'outils biotechnologiques dérivés de CRISPR, et je vais essayer de vous le montrer. C'est une technologie qui permet de modifier les génomes – d'une manière efficace, précise, simple, peu coûteuse – à la fois des micro-organismes, des plantes, des animaux, et également de l'homme. Elle consiste à utiliser une enzyme, Cas9, avec une molécule d'ARN appelée «guide» qui dirige la protéine Cas9 vers une cible bien définie.

CRISPR-Cas9 fait la une des médias, avec des articles dans *Le Monde*, dans *Libération* (par exemple en juillet 2015), et même dans le *Canard Enchaîné*. Donc j'imagine que vous avez déjà entendu parler de CRISPR, mais peut-être que vous ne savez pas exactement ce qu'est CRISPR? Sur cette illustration, vous voyez un locus CRISPR... j'espère que vous le voyez? Avant tout CRISPR est un acronyme, que l'on peut éventuellement se hasarder à traduire en «répétitions d'ADN, de taille courte, de séquences palindromiques, régulièrement espacées, et groupées sur le génome». Je vais vous aider à voir un peu plus clair dans ces répétitions : vous voyez maintenant en gras et en majuscules les séquences répétées, qui sont strictement identiques; il y en a une quarantaine ici. Entre chaque séquence répétée se trouve une petite séquence aussi, qui, elle, est unique. Toutes les séquences entre «repeats» sont uniques, et c'est cet ensemble de séquences répétées séparées par des «spacers» que l'on appelle CRISPR. On représente ces structures de la façon suivante, sur la partie droite de la figure, en bas : les repeats peuvent être représentés par des losanges noirs ; ils sont séparés par de petits rectangles blancs, qui sont les spacers. Sur la partie gauche de la figure se trouve un ensemble de formes, des flèches qui représentent les gènes *cas*, qui codent pour des protéines appelées Cas. Cas signifie «associé à CRISPR». Parmi ces gènes *cas*, sur l'exemple que je montrais, il y a *cas9*, tout à gauche. L'ensemble des gènes *cas* (ou des protéines Cas) et de la région de séquences répétées constitue le système CRISPR-Cas, qui est présent dans environ la moitié des génomes bactériens séquencés à ce jour.

L'illustration suivante représente l'historique de la thématique CRISPR, qui aura bientôt 30 ans. CRISPR a été découvert en 1987 par une équipe japonaise, qui décrivait des séquences répétées situées à côté du gène *iap* chez *Escherichia coli*, séquences répétées qui n'étaient pas expliquées à l'époque. Entre 1993 et 2000 il y a eu une série d'articles, quatre ou cinq, décrivant des séquences répétées qui ont eu des noms différents. Le terme CRISPR n'existait pas encore, donc il est difficile de retrouver ces articles à l'heure actuelle, puisqu'on ne peut pas les retrouver à travers le mot-clé CRISPR. Mais ces différents noms désignaient la même chose, et c'est en 2002, à travers l'accumulation de génomes bactériens, que des chercheurs se sont rendu compte que ces structures de

séquences répétées formaient en fait une seule et même famille, qui a été appelée CRISPR.

Ensuite, en 2005, il y a eu une série de trois publications où l'hypothèse immunitaire (le rôle immunitaire) de CRISPR était évoqué, mais avec un certain nombre d'inexactitudes. C'est vraiment en 2007 qu'a été apportée la première démonstration du rôle biologique de CRISPR en tant que système adaptatif d'immunité contre les virus chez les bactéries. C'est un article qui a été publié dans *Science*, journal à haut facteur d'impact ; suite à cet article, différentes équipes se sont engouffrées dans la thématique. En faisant une sorte d'arbre de causes, et en revenant un peu en arrière sur les découvertes majeures qui ont permis d'arriver à la révolution actuelle du *genome editing*, il n'y a qu'une petite dizaine de découvertes qui sont cruciales :

- en 2008 notamment, la découverte du PAM, motif adjacent à la séquence ciblée;
- en 2008 également, le fait que l'ADN était la cible, et qu'il était coupé;
- que le système CRISPR-Cas fonctionnait à travers de petits ARN, qui permettent de cibler la coupure;
- en 2010, le travail de Garneau *et al.* qui a montré le site précis de coupure par Cas9;
- en 2011, une découverte importante de l'équipe d'Emmanuelle Charpentier : la découverte du tracrRNA;
- en 2011 également, la démonstration qu'un système pouvait être transféré d'une bactérie *Streptococcus thermophilus* (une bactérie Gram-positive) vers *Escherichia coli*, et que le système était fonctionnel ; donc première démonstration de la portabilité du système;
- et c'est en 2012 qu'a démarré la révolution CRISPR pour le genome editing, à travers l'article de Jinek *et al.* incluant Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier.

Je vais maintenant vous présenter de manière schématique comment fonctionne CRISPR naturellement dans les bactéries. Le mécanisme peut se diviser en deux grandes parties. Une première partie, que l'on appelle «adaptation» (et que j'aime appeler «immunisation») pendant laquelle le système CRISPR-Cas réagit à l'arrivée d'un ADN étranger, qu'il soit viral ou plasmidique. Les enzymes codées par les gènes *cas* permettent de découper un petit morceau de l'ADN étranger et de l'incorporer dans le locus CRISPR, en même temps qu'un nouveau repeat; il s'agit donc d'un processus de mémorisation. La figure montre un phage (virus) bleu; un spacer bleu en est dérivé et incorporé dans le locus CRISPR. La deuxième phase est appelée «interférence » (ou immunité), où le locus CRISPR est transcrit en un long ARN qu'on appelle «pre-crRNA», ARN qui est ensuite processé en petites unités, de petites molécules d'ARN appelées «crRNA» qui sont chargées sur des nucléases telles que Cas9. Lorsque Cas9, qui patrouille dans le cytoplasme de la cellule, rencontre un ADN dont la séquence correspond, et qui porte ce fameux PAM, l'ADN est clivé de manière très précise au niveau du «proto-spacer». Le fait qu'il n'y ait pas de PAM au niveau du locus CRISPR lui-même permet d'éviter l'auto-immunité, et donc empêche Cas9 de cibler son propre ADN. Ceci est le mécanisme naturel : CRISPR

constitue un système de défense, une barrière additionnelle que possèdent les bactéries pour lutter contre les virus. C'est un système qui s'apparente aux enzymes de restriction – aux systèmes de restriction-modification – puisque ce système intervient après injection de l'ADN viral, pour le dégrader; en tout cas c'est un système qui peut être intéressant pour les bactéries qui le possèdent, environ une sur deux.

Chez DuPont, mon intérêt est de développer des ferments qui ont une résistance aux virus accrue, puisque les bactéries que nous vendons à nos clients – fabricants de yaourts et de fromage – peuvent être soumises à des problèmes phagiques (viraux); il s'agit d'attaques virales contre les bactéries ajoutées à la matrice, le lait, car ces virus sont présents naturellement dans le lait. De ce fait notre mission principale est de fournir des ferments qui sont robustes en fabrication industrielle, et pour cela nous consacrons des moyens importants pour isoler des bactéries résistantes. Avec CRISPR, nous avons l'opportunité d'augmenter la résistance des bactéries d'une manière naturelle. C'est un processus que l'on a appelé «crispérisation», à travers lequel nous soumettons des bactéries à l'attaque de virus choisis, et nous sélectionnons, sur boîte de Petri par exemple, des variants qui ont survécu à l'infection virale. Ces variants sont analysés au niveau de leur locus CRISPR. Vous voyez au milieu de cette figure une représentation de petits carrés colorés correspondant à quatre systèmes CRISPR présents dans la même bactérie; vous voyez aussi que deux d'entre eux, le premier et le troisième, ont acquis (à gauche de la ligne pointillée) chacun un spacer additionnel. Le fait d'avoir acquis de nouveaux spacers permet à ces variants de résister au phage qui a été utilisé pour le challenge. A condition d'avoir des virus qui sont toujours efficaces (lytiques) sur le mutant, nous pouvons refaire de genre de processus de manière itérative, et ainsi contribuer d'une part à allonger les loci CRISPR, mais également à augmenter le profil de résistance aux phages de nos bactéries; jusqu'à épuisement, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'on n'ait plus de virus pour faire ce genre de «vaccination». Nous espérons ainsi arriver à des bactéries qui ont gagné suffisamment de résistance au laboratoire pour être plus robustes sur le terrain, en utilisation laitière par exemple.

Ceci est une première application industrielle de CRISPR, et je vais en décrire une seconde que nous avons appelée «*natural genetic tagging*», marquage génétique naturel, où, sans prendre en compte la nouvelle résistance apportée par les nouveaux spacers, ces nouvelles séquences peuvent en fait être considérées comme une signature génétique que l'on ajoute naturellement, sans ingénierie génétique; c'est le phage (virus) et le système CRISPR lui-même qui font le travail. En utilisant une sélection de virus et en définissant quels sont les spacers acquis, on obtient une combinaison de spacers qui est unique. Plus on ajoute de spacers, moins la probabilité d'avoir ailleurs ces mêmes événements dans le même ordre est grande. Donc ce genre d'utilisation a une application industrielle aussi, puisqu'elle nous permet de marquer nos souches et de les suivre sur le terrain.

Je reviens à ma frise historique; ces découvertes et ces applications ont été faites entre 2005 et 2011. 2012 est le début de la «folie CRISPR» en tant qu'outil de *genome editing*, et la vraie révolution est représentée à droite sur cette figure, où les équipes de Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier ont transformé un système à 3 composantes,

représenté en haut à droite : en bleu la protéine Cas9, avec un premier ARN, le crRNA (cf. ma description du mécanisme), et un second ARN, le tracrRNA, qui est nécessaire à la fonction de Cas9. Ce système ternaire a été simplifié en un système binaire, plus simple à transférer, composé de Cas9 et d'un ARN hybride (synthétique, par exemple) appelé ARN guide. C'est le début de la révolution CRISPR, en août 2012. Dès janvier 2013, des articles publiés dans *Science* ont montré l'efficacité du système pour modifier des génomes complexes. Cela a marqué le début de l'engouement pour CRISPR, et il faut reconnaître que notre contribution a été reconnue, d'où ma présence ici aujourd'hui, mais je répète qu'à l'heure actuelle l'outil d'ingénierie n'est pas utilisé pour modifier les bactéries qui constituent les ferments.

Je vais d'ailleurs présenter le principe du *genome editing*. Il s'agit d'induire une coupure de l'ADN double brin dans l'organisme étudié; ce sont les systèmes naturels de réparation des altérations de l'ADN qui vont ensuite opérer. Sur la figure, à gauche est représenté un système qui effectue des réparations imparfaites, et qui donc introduit des mutations de manière aléatoire; à droite se trouve un autre système, basé sur l'homologie des séquences, et qui utilise, lorsqu'on la fournit, une matrice d'ADN pour indiquer à la cellule comment la réparation doit être réalisée. Cette approche à droite permet de déléter des gènes, d'ajouter des gènes, ou de remplacer des allèles (de remplacer un allèle par un autre). Ce système a été utilisé dans de nombreux organismes, et notamment dans les organismes eucaryotes supérieurs, cette technologie fonctionne très bien. Différents cas ont été rapportés, certains assez impressionnants; je vais en mentionner juste quelques-uns. Des équipes ont notamment montré que cela permettait de se débarrasser du virus du SIDA dans des cellules en culture; de soigner ou d'éliminer certaines formes de cancer; récemment, de traiter des myopathies chez la souris (mais je pense que cela sera assez rapidement appliqué à l'homme); de traiter des problèmes d'hémophilie, d'anémie falciforme, etc. En ce moment sont réalisées des manipulations de moustiques pour que ceux-ci ne transmettent plus la malaria; donc le fait de modifier génétiquement des moustiques et de les répandre dans l'environnement pourrait permettre de limiter la diffusion de parasites tels que la malaria. Je mentionnerai également les vaches sans cornes, qui sont plus faciles à gérer dans les élevages. En plus de ces applications animales, il y a également de nombreuses applications chez les plantes, notamment pour améliorer la résistance à la sécheresse, ou pour éliminer des allergènes comme chez la cacahuète.

Les applications sont donc vraiment énormes, et le système Cas9-ARN guide peut être considéré comme une nouvelle génération d'enzymes de restriction qui sont programmables à travers le petit ARN (l'ARN guide). Un catalogue d'enzymes est en train d'être établi pour justement pouvoir faire ce genre de manipulations encore plus facilement. Le système est également utilisé à l'heure actuelle pour essayer de revivifier des espèces disparues; certains se sont attaqués au mammouth laineux (il s'agit plus de modifications de l'éléphant en mammouth, que de réellement faire revivre le mammouth), d'autres au dodo, par exemple. Tout cela a entraîné un tel emballement médiatique qu'est paru dans le magazine *Wired!* aux Etats-Unis un article très inquiétant, alarmiste, qui a déclenché une tempête médiatique sur Twitter, cynique, très ironique, où CRISPR était capable de faire

tout et n'importe quoi... jusqu'à avril 2015, où une équipe chinoise a publié un travail de modification de la lignée germinale humaine. C'était une modification d'embryons humains non viables, avec une efficacité qui n'était pas très bonne, mais la démonstration a été faite. Ce travail a déclenché une prise de conscience collective, par les inventeurs de la technologie mais aussi par leurs utilisateurs, et un moratoire a depuis été demandé, à l'image d'Asilomar dans les années 70, pour essayer de réglementer l'utilisation de cet outil très efficace. Evidemment les questions éthiques sont nombreuses, mais je dirais qu'il est impossible de désapprendre ; on ne peut pas oublier ce qu'on a appris, l'outil existe, il va falloir faire avec. Je pense que les applications concernant les végétaux sont très importantes aussi. Nous avons plusieurs fois entendu parler de la croissance de la population mondiale, des problèmes de la faim dans le monde, donc je pense qu'il y a beaucoup de choses à développer au niveau des plantes, et c'est important pour DuPont à travers la société Pioneer. Pioneer est un utilisateur très actif de la technologie CRISPR-Cas, avec une particularité : dans un certain nombre de cas, les plantes modifiées échappent aux réglementations actuelles sur les OGM, puisque, selon la façon de construire les mutants, il n'y a pas d'ADN étranger (transgénique) introduit dans la plante; on ne fait que modifier le contenu en ADN déjà présent. Ce sont des modifications qui pourraient très bien se produire naturellement. Il y a eu un positionnement de la Suède sur le côté non-OGM de la technologie CRISPR.

Je terminerai sur des remerciements. Le travail que nous avons fait inclut un grand nombre de personnes, à la fois à Dangé-Saint-Romain en France, et à Madison aux Etats-Unis. Nous avons également travaillé avec différents collaborateurs, très importants: Rodolphe Barrangou, Sylvain Moineau, Virgis Siksnys, ou Jill Banfield (aux Etats-Unis). Je souhaiterais également remercier Pascale Cossart, pour son soutien. Je terminerai sur une citation de Willard Gaylin, qui disait «Je ne pense pas seulement que nous modifierons Dame Nature, je pense qu'elle veut que nous le fassions».

Je vous remercie pour votre attention.

LA PHYSIOLOGIE CÉRÉBRALE COMME EMBRYOGENÈSE SILENCIEUSE

Pr. Alain PROCHIANTZ

*Administrateur Général du Collège de France
Paris, France*



Résumé :

A travers les concepts d'évolution et d'individuation, l'accent sera mis sur l'instabilité de toute structure vivante, compensée par un renouvellement infini de formes, fondement d'une individuation qui fait de chacun d'entre nous un être unique, en évolution permanente. Même si cette instabilité engage tous les niveaux du génome à l'organisme, nous nous concentrerons sur le cerveau et, plus précisément, sur le cortex cérébral.

A travers des expériences récentes, nous illustrerons la possibilité de jouer sur la plasticité cérébrale adulte et de modifier la physiologie corticale par la manipulation de facteurs de transcription. Nous discuterons la possibilité ouverte par cette conception dynamique de la physiologie de remédier à des pathologies qui s'installent au cours du développement cérébral.

Séance III :
MATHÉMATIQUES ET SCIENCES DE L'UNIVERS

LES MATHÉMATIQUES : DES IDÉES SIMPLES AU SERVICE DE TOUS

Pr. Gilles GODEFROY

*Institut de Mathématiques de Jussieu
(CNRS & UPMC-Université Paris VI)
France*



Cette note résume la conférence donnée à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques le 17 février 2016. Je remercie très vivement l'Académie pour avoir bien voulu m'inviter à cette occasion, ainsi que tous ceux qui ont contribué à organiser un séjour à Rabat aussi agréable que passionnant.

L'objet de cette conférence est de présenter quelques idées mathématiques. Les mathématiques ont la réputation de constituer un domaine technique, dont on ne peut saisir le contenu sans apprendre d'abord tout un vocabulaire, et quantité de notions abstraites. Sans prétendre simplifier à l'extrême cette science, on peut quand même donner quelques idées fortes et bien naturelles, qui structurent les mathématiques et peuvent servir de guide à ceux et celles qui souhaitent y progresser. Cette conférence s'adresse à des collègues scientifiques qui ne sont pas mathématiciens. Elle va donc se focaliser sur quelques-unes de ces idées simples et sur les champs de recherche où elles conduisent, en évitant autant qu'il est possible toute technique. Le lecteur désireux d'en savoir plus pourra consulter les livres [1] et [2], qui relèvent de la même approche.

Les quatre sections qui suivent abordent divers aspects des mathématiques: science de la forme et du nombre dès l'antiquité, science du calcul numérique et fonctionnel, puis du calcul différentiel et intégral, enfin science des formules. Mais dans tous les cas, science universelle au service de toutes les autres.

1. La forme et le nombre

Blaise Pascal a écrit: “les nombres imitent l’espace, [eux] qui sont de nature si différente”. De fait, les mathématiques contiennent l’arithmétique et la géométrie, non pas comme domaines séparés et mutuellement étrangers, mais plutôt comme pôles en interaction constante. Tout a commencé quand on a compris que la surface d’un rectangle s’obtenait en multipliant la longueur par la largeur. L’agriculture a rendu indispensable la mesure de la terre (*géométrir* des *etria* en Grec), et cette mesure nous a conduit à considérer multiplications. Tout le reste s’en est suivi.

Illustrons cela par le polygone qui figure sur le drapeau du Maroc: le pentagone étoilé. Cette figure a été considérée dès la haute antiquité, comme le montre sa présence sur des vases grecs contemporains de Pythagore. Soit D la diagonale d’un pentagone régulier, qui joint deux sommets non consécutifs, et C son côté qui joint deux sommets consécutifs. Un petit argument de géométrie, qui revient à dire que tous les pentagones réguliers sont semblables, montre qu’on a

$$\frac{D}{C} = \frac{C}{D - C}$$

Donc, si on effectue l’algorithme d’Euclide pour trouver une commune mesure à D et C , on trouve

$$D = C + (D - C)$$

puis ensuite

$$C = (D - C) + (2C - D)$$

et on remarque que la deuxième ligne est proportionnelle à la première. Mais il s’ensuit que la troisième ligne sera proportionnelle à la deuxième, et ainsi de suite... Par conséquent, toutes les divisions successives donneront des lignes proportionnelles à la première, donc au reste non nul, et l’algorithme ne convergera pas. Nous avons donc montré que la diagonale du pentagone n’est pas commensurable avec le côté. Notons au passage qu’on a obtenu ce résultat par un argument géométrique, et que l’on a pas eu besoin de calculer le rapport D/C -dont une équation du deuxième degré montre facilement qu’il est égal au “nombre d’or” $(1 + \sqrt{5})/2$, mais les Anciens ne savaient pas résoudre l’équation du deuxième degré.

On peut traduire cet argument algébrique en termes géométriques. En effet, le pentagone étoilé peut être considéré comme un vénérable ancêtre des figures fractales: dès lors qu’on le trace, on est amené à le voir réapparaître en plus petit. L’itération illimitée de cette construction nous confronte donc à un phénomène troublant: l’incommensurabilité de certaines longueurs, ou de façon équivalente l’existence de nombres irrationnels. Les Grecs de l’époque classique étaient conscients de cette irruption de l’infini dans les calculs par le cheval de Troie de la géométrie. Ils ont répondu à cette crise en définissant de façon précise ce qu’était pour eux un nombre, en intégrant dans cette définition les irrationnels, pour asseoir la géométrie sur un socle apparemment cohérent. Eudoxe,

membre de l'Académie de Platon, a donc défini un nombre comme étant le rapport de deux grandeurs du même genre, et expliqué comment les comparer. Pour cela, il a identifié un nombre inférieurs. C'était nécessaire: représenter la forme à l'aide du nombre, mettre en relation le discret et le continu, nous conduit inexorablement à envisager l'infini.

Mais au fait, n'éludons pas une question toute simple: pour nous, qu'est-ce qu'un nombre?

Suivant notre niveau d'intérêt et de connaissance des mathématiques, il y a bien des réponses possibles. Eudoxe, nous l'avons vu, a déjà répondu à la question, en définissant ce que nous appelons aujourd'hui un nombre réel positif (les Grecs ne disposaient pas du zéro ni des quantités négatives, et il faudra attendre les Arabes pour que se développe l'*algèbre*). Mais la définition d'Eudoxe, reprise par Dedekind au dix-neuvième siècle, n'épuise pas le sujet: un nombre, ce peut-être aussi un nombre complexe, un ordinal, une branche d'arbre, un jeu, un noeud, un quaternion, un opérateur sur l'espace de Hilbert, une classe d'équivalence... et la liste n'est pas close.

Proposons donc un changement de point de vue, un pas vers l'abstraction: l'important ce sont les relations entre les objets, et non les objets eux-mêmes. L'essentiel est de disposer d'un ensemble sur lequel on peut effectuer des additions et des multiplications. On appellera "nombres" ses éléments, tout simplement. Georg Cantor a écrit: "l'essence des mathématiques, c'est la liberté". Exercer cette liberté, c'est par exemple poser une définition, donc élargir le domaine du langage qu'on se donne le droit d'employer: un objet existe dès lors que postuler son existence ne conduit pas à une contradiction. Les mathématiques brisent irrésistiblement les cadres dans lesquels on voudrait les enfermer. Il y a des choses impossibles. Mais rien n'est interdit.

2. Les bases.

Le terme de "base" a des sens assez variés en mathématiques, et il n'est pas immédiat de percevoir les liens qui unissent ces différentes significations. Commentons donc par le concept le plus élémentaire: les bases numériques.

Lorsque nous écrivons 1729, nous voulons dire en fait

$$10^3 + 7 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 9 \times 10^0$$

Nous représentons les entiers, et plus généralement les réels, à l'aide des puissances successives d'un entier donné. Les Mésopotamiens calculaient en base 60, d'où vient le fait que notre mesure du temps repose toujours sur cette base, ainsi que celle des angles qui lui est intimement corrélée, puisque c'est à partir du mouvement angulaire des astres que l'on mesure le temps. Nous calculons en base 10, du fait de nos dix doigts. Les ordinateurs calculent en base 2 et n'utilisent que 2 symboles.

Passons maintenant du statique au dynamique. Quelle base peut-on utiliser pour représenter un signal périodique? La base doit être un signal particulièrement simple, par exemple un mouvement circulaire parcouru à vitesse constante, qu'on peut donc paramétrer par:

$$f(t) = e^{it}$$

En utilisant la démarche qui nous permet de représenter les nombres, on est conduit à écrire un signal périodique s comme une somme de puissances de la base, donc sous la forme

$$s(t) = \sum_n a_n e^{int}$$

et nous reconnaissons là ce qu'on appelle le développement en série de Fourier du signal s , sur la base (au sens de l'algèbre linéaire cette fois) formée par la suite des fonctions (e^{int}) . Les signaux non périodiques peuvent quant à eux être représentés par une intégrale de Fourier.

La convergence des séries de Fourier soulève de nombreuses questions, dont certaines constituent jusqu'à aujourd'hui des thèmes de recherche difficiles. Le résultat le plus important est probablement le théorème démontré en 1962 par Lennart Carleson, suivant lequel la série de Fourier d'une fonction de carré intégrable (qui modélise donc un signal d'énergie finie) converge presque partout. Ce théorème relève de l'analyse hilbertienne. En analyse fonctionnelle, on a considéré des bases beaucoup plus générales, pour développer, ou approximer, les fonctions appartenant à des espaces fonctionnels, le plus souvent munis d'une structure d'espace de Banach ou de Fréchet.

Certains espaces de Banach (précisément, ceux qui ne possèdent pas la propriété d'approximation de Grothendieck) se sont montrés réfractaires à tout calcul de ce genre. Mais il est heureux de constater que les espaces qui, jusqu'à présent, sont *utilisés* en mathématiques appliquées possèdent en effet des bases qui permettent des calculs explicites. Un exemple important: à l'interface entre les espaces de Hilbert et les espaces de Banach de fonctions continues, la théorie des ondelettes s'est constituée pendant ces dernières décennies. En particulier, elle s'est montrée très utile dans le codage et la reconstruction des images. On peut affirmer que les mathématiciens savent désormais modéliser correctement les images et les sons. Il reste cependant de grands progrès à faire pour modéliser les sens à courte portée: toucher, goût, odorat. Un défi pour les chercheurs du vingt-et-unième siècle !

3. L'intégrale

Intégrer, c'est calculer des sommes et prendre une limite. Dériver, c'est calculer des différences et prendre une limite. Nous savons depuis Newton et Leibniz que ces deux opérations sont inverses l'une de l'autre. Cette constatation tout simple a permis de connecter deux opérations géométriques qui semblaient si différentes: la construction des tangentes et le calcul des surfaces.

Intéressons-nous au plus simple, donc aux sommes. Considérons une surface comprise entre l'axe horizontal et le graphe d'une fonction comme constituée de petits carrés. On peut la calculer et compter ces petits carrés par colonnes, ou bien par lignes pondérées par les ordonnées. On obtiendra bien sûr le même résultat, mais la symétrie s'arrête là. En effet, la première méthode conduit à l'intégrale de Riemann. La deuxième méthode conduit à l'intégrale de Lebesgue et elle est bien plus efficace: elle se focalise sur la

distribution de la fonction, c'est-à-dire sur l'ensemble où la fonction vaut à peu près une valeur donnée. La variable, déjà muette dans le calcul intégral, disparaît ainsi complètement. D'ailleurs, comme l'explique Lebesgue lui-même, quand un commerçant calcule ses recettes après sa journée de travail comme intégrale par rapport au temps des liquidités reçues, c'est bien à la Lebesgue qu'il travaille: il mettra ensemble toutes les pièces et billets de 1, 2, 5...unités, sans se préoccuper de savoir s'il les a reçus en début ou en fin de journée.

La théorie de l'intégration de Lebesgue conduit donc à oublier la variable, et à voir une fonction comme une distribution: ce qui compte, quand on intègre une fonction, est de savoir la mesure de l'ensemble sur lequel cette fonction prendra (à peu près) une valeur donnée. Dès lors que de nombreux ensembles - coïncés entre un ouvert et un fermé, comme au temps d'Archimède on encadrait une surface entre deux polygones -sont mesurables, de nombreuses fonctions seront intégrables. Et de fait, on sait désormais que le non-mesurable n'existe qu'au prix de l'axiome du choix. L'intégrale de Lebesgue fournit en particulier le cadre de la théorie contemporaine des probabilités, qui permet de modéliser de nombreux phénomènes biologiques, physiques ou économiques (par exemple le mouvement brownien) et a conduit à la découverte de nouveaux universels: le théorème central limite, et sa version non commutative, la loi du demi-cercle de Wigner.

Ce petit examen historique de l'intégrale, des premiers calculs de surface au *calculus* de Newton et Leibniz, puis à Lebesgue et à la théorie moderne des probabilités, illustre un phénomène général: aux trois états fondamentaux - solide, liquide, gazeux - de la matière qui nous entoure répondent, discipline par discipline, trois niveaux de complexité: le statique, le dynamique, l'aléatoire. Ainsi en est-il de l'argent, autrefois liquide et désormais gazeux.

4. La logique mathématique

Celui qui affirme "je suis en train de mentir" ment-il ou dit-il la vérité?

Ce "paradoxe du menteur", exemple typique des propositions autologiques (qui disent quelque chose d'elles-mêmes), remonte aux Anciens. Il n'est pas immédiat qu'il relève des mathématiques et non pas de la philosophie -ou du calembour. Mais il a bien été transposé dans le monde mathématique par Kurt Gödel en 1930, qui l'a utilisé dans la démonstration d'un théorème fondamental. Il a en effet travaillé sur une version formalisée de l'arithmétique (et des démonstrations de l'arithmétique) et il est parvenu à exhiber un énoncé (G) de l'arithmétique qui énonce également: l'énoncé (G) n'est pas démontrable. Cet énoncé est donc vrai car s'il était faux, il serait démontrable donc vrai. Mais il n'est pas démontrable puisqu'il est vrai.

Le théorème de Gödel a donc montré, entre autres choses, la pertinence de la distinction entre démontrable et vrai pour les énoncés de l'arithmétique. Cette distinction provient du fait que l'arithmétique est assez complexe pour pouvoir parler d'elle-même, au sens où un énoncé de l'arithmétique peut être rigoureusement interprété comme un énoncé sur les énoncés de l'arithmétique. Le théorème de Gödel est un beau résultat sans doute, mais à

quoi sert-il ? Est-ce de la philosophie, ou bien des mathématiques ? Répondons clairement à ces deux questions qu'il s'agit de mathématiques, et qui plus est de mathématiques utiles. Voyons donc quelques applications.

Le théorème de Gödel repose sur le présupposé que l'arithmétique (formalisée par Peano) ne recèle pas de contradiction. Cette affirmation non démontrable dans l'arithmétique - puisque la consistance de l'arithmétique démontre que (G) n'est pas démontrable, donc démontre (G) - fait néanmoins consensus, tant les axiomes de Peano sont simples et évidents. Démontrer un énoncé (E) suffit donc à conclure que *toutes* les démonstrations de sa négation ($nonE$) sont fausses. Mais il s'ensuit du théorème de Gödel que nous n'avons pas de moyen algorithmique d'exhiber des erreurs dans ces démonstrations, bien qu'on sache d'avance qu'elles sont erronées. Cette obstruction n'apparaît pas encore comme si gênante : la conséquence la plus désagréable en est aujourd'hui que si vous refusez de lire un argument dont vous savez qu'il est faux - par exemple, une quadrature du cercle à la règle et au compas - son auteur peut vous taxer d'amateurisme ou de mépris injustifié. Mais on peut penser qu'il en sera tout autrement dans l'avenir : nous ne sommes qu'à l'aube de l'ère informatique, et l'explosion de nos moyens de calcul conduit naturellement aux tentatives de créer des logiciels de vérification ou de création de preuves. Il demeure que le théorème de Gödel affirme l'existence d'obstructions absolues, indépendantes de la puissance de ces moyens de calcul : rappelons que les mathématiques ne connaissent pas l'interdit, mais sont riches de résultats d'impossibilité. D'autres aspects des découvertes de Gödel (et Tarski, dans ce cas) : il n'y a aucune chance pour que la forme d'une question nous oriente mécaniquement vers la solution. En effet, Tarski a montré que la complexité de l'ensemble des énoncés démontrables est telle qu'il est impossible de borner a priori la longueur de la démonstration d'un énoncé (E) supposé démontrable. En termes simples, nous n'avons et nous n'aurons jamais rien de mieux à faire que d'essayer de démontrer cet énoncé, et N échecs ne nous permettront pas de conclure, quel que soit l'entier N .

L'énoncé (G) de Gödel est une expression formelle, sans réelle importance arithmétique. Il existe cependant des énoncés raisonnablement concrets qui appartiennent à cette même catégorie de résultats indémontrablement vrais. En particulier, Julia Robinson et Yuri Matijasevic ont montré en 1970 qu'il existe des polynômes explicites $P(X_1, X_2, \dots, X_N)$ à coefficients entiers tels que l'énoncé "l'équation $P(X_1, X_2, \dots, X_N) = 0$ n'a aucune solution en nombres entiers" est indémontrablement vrai. En d'autres termes, si l'on trouve soit un N -uplet d'entiers (x_1, x_2, \dots, x_N) tels que $P(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0$, soit une démonstration du fait que $P(x_1, x_2, \dots, x_N) \neq 0$ pour toutes les valeurs entières des variables, on peut en déduire mécaniquement une démonstration du fait que $0 = 1$ dans l'arithmétique de Peano. Ces polynômes P sont jusqu'à ce jour des objets assez lourds : typiquement, de degré 4 avec $N = 58$ variables. Julia Robinson a cependant conjecturé qu'il en existait avec trois variables. L'existence des polynômes de Robinson-Matijasevic peut troubler le lecteur. Pour réconcilier l'expression "indémontrablement vrai" avec notre intuition, disons que pour vérifier que $P(X_1, X_2, \dots, X_N) \neq 0$ pour toutes les valeurs entières des variables, on ne peut rien faire de plus malin que prendre tous les N -uplets d'entiers et de vérifier qu'aucun d'entre eux n'est

racine. Problème, il y a une *infinité* d'entiers, alors que pour nous, pauvres mortels que nous sommes, une démonstration est une suite *finie* d'arguments.

On peut conclure de ce qui précède que la complexité de l'ensemble des entiers muni de l'addition et de la multiplication est effectivement infinie. Cette complexité garantit que les théoriciens des nombres ne seront jamais au chômage technique. Mais elle a d'autres conséquences bien plus importantes. En effet, savoir coder et décoder l'information est aujourd'hui plus important que jamais, et l'arithmétique est un outil fondamental des méthodes de codage. La connaissance de grands nombres premiers est maintenant un enjeu stratégique, et les méthodes de factorisation sont en passe de devenir des secrets d'état. Nous puiserons encore et encore dans ce réservoir de complexité que sont les nombres entiers. Mais pour une fois, nous n'avons pas à craindre un épuisement des ressources: notre provision est inépuisable.

Terminons cet exposé par une digression historique sur l'indécidabilité. Le premier exemple concerne le postulat d'Euclide, indépendant des autres axiomes de la géométrie comme l'ont montré il y a plus de deux siècles Gauss, Bolyai et Lobatschevsky, en construisant des modèles de la géométrie (sphérique ou hyperbolique) où par un point extérieur à une droite (D), on pouvait mener soit aucune, soit une infinité de parallèles à (D). Au vingtième siècle, l'indécidabilité a envahi la théorie des ensembles: par exemple, l'hypothèse du continu est un énoncé indécidable, et pourtant assez important pour changer la valeur de vérité de divers énoncés d'analyse naturels. Nous avons désormais pris l'habitude de travailler dans une théorie des ensembles ramifiée, et on s'y fait très bien dès lors que les axiomes utilisés sont correctement explicités. C'est à présent au tour de la théorie des nombres d'être exposée à ce phénomène. C'est troublant, dans la mesure où nous croyons savoir ce que c'est qu'un nombre entier, et où nous sommes tentés d'en conclure un peu vite que nous comprenons également l'ensemble des entiers. Pourtant, il se pourrait que certains des exposés centraux de l'arithmétique (par exemple, l'hypothèse de Riemann (HR) sur la répartition asymptotique des nombres premiers) soient indémontrablement vrais. Les arithméticiens ont maintenant pour coutume de montrer des théorèmes conditionnels, en supposant par exemple (HR) ou - plus rarement -sa négation, dans l'espoir d'obtenir un jour une contradiction qui effacerait d'un coup toute une branche. S'il se trouve que (HR) est indémontrablement vraie, cette contradiction n'advientra jamais et nous continuerons à développer ces deux branches, ou bien nous privilégierons l'une d'entre elles pour des raisons informelles: intuition, utilité, adéquation à la description de phénomènes naturels, cohérence interne, simplicité ou beauté. Faut-il donc se résoudre à la pratique d'une arithmétique ramifiée? L'avenir nous le dira.

Références

- [1] Gilles Godefroy: *L'aventure des nombres*, Editions Odile Jacob, 1997 (réédité en livre de poche en 2011).
- [2] Gilles Godefroy: *Les mathématiques mode d'emploi*, Editions Odile Jacob, 2011.

UNE EXCURSION DANS LE MONDE DES ÉQUATIONS AUX DÉRIVÉES PARTIELLES

Pr. El Maâti OUHABAZ

*Institut de Mathématiques,
Université de Bordeaux, France*

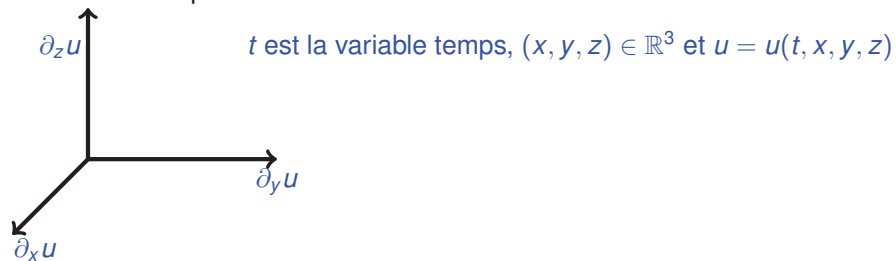
*Membre correspondant de
l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques*



Avant tout, c'est quoi une EDP ?

Prenons une quantité u (fonction ou champs scalaire) dépendant d'un paramètre x . La **dérivée** de u par rapport à x représente la variation instantanée (la vitesse instantanée). Si u dépend de plusieurs paramètres, la

dérivée partielle dans une direction donnée représente la variation dans cette direction sans opérer de mouvement dans les autres directions.



On peut aussi avoir besoin de **dérivée partielle d'ordre 2** (accélération), $\partial_t^2 u, \partial_x^2 u, \partial_y^2 u, \partial_z^2 u, \dots$

Les **équations aux dérivées partielles (EDP)** qui nous intéressent ici sont des **équations d'évolution**:

$$\begin{cases} \partial_t u &= \text{Relation entre } \partial_x u, \partial_x^2 u, \partial_y u, \partial_y^2 u, \partial_z u, \partial_z^2 u \dots \\ u|_{t=0} &= f : \text{la donnée à l'instant initial} \end{cases}$$

A quoi ça sert ?

Les **EDP** sont apparues (au moins) depuis la naissance de la mécanique rationnelle au cours du 17^e siècle (Newton, Leibnitz...).

- Euler, Navier, Stokes (18^e et 19^e) : **équations de la mécanique des fluides**
- Fourier (18^e) : **équation de la chaleur**
- Maxwell (19^e) : **équation de l'électromagnétisme**
- Schrödinger et Heisenberg (fin 19^e, 20^e) : **équations de la mécanique quantique**
- Einstein (20^e) : **équations de la théorie de la relativité**
-
-
-

ET BEAUCOUP D'AUTRES...

Le rôle du mathématicien ?



"Le rôle du mathématicien est de définir le cadre fonctionnel, de rendre plus rigoureux certains arguments basés sur l'intuition de ceux qui manipulent, de modéliser (mettre en équation) des phénomènes (physique, chimie, biologie, économie...)"

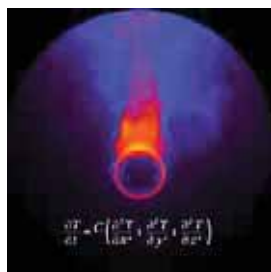
- Développer les outils adéquats
- Mettre dans un cadre plus général, définir le formalisme, cadre fonctionnel
- Rendre plus rigoureux certains arguments basés sur l'intuition de ceux qui manipulent
- Modéliser (mettre en équation) des phénomènes (physique, chimie, biologie, économie...)
- - -

Pour les EDP:

- Chercher à résoudre...Mais dans la majorité des cas, pas de solution explicite!
- La solution existe ? (cadre fonctionnel: contrainte du modèle), si oui, est-elle unique ? (très utile pour les approximations numériques)
- Existe-t-elle pour tous les temps $t > 0$ ou seulement en temps fini ? (explosion en temps fini ?)
- La comparer à des quantités que l'on connaît ou que l'on maîtrise
- Sa régularité ? son comportement asymptotique.... ?

Le génie, c'est 1% d'inspiration et
99% de transpiration (T. Edison)

Quelques célébrités (sympathiques)



(Biatriz Milhazes)

- Equation de la chaleur sur tout l'espace: $u = u(t, x, y, z)$, $X = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$

$$\begin{cases} \partial_t u &= \Delta u = \partial_x^2 u + \partial_y^2 u + \partial_z^2 u \\ u|_{t=0} &= f \text{ (l'état initial)} \end{cases}$$

La solution est la convolution de la gaussienne avec l'état initial f :

$$u(t, X) = \int p_t(X, Y) f(Y) dY \quad \text{avec} \quad p_t(X, Y) = \frac{1}{(4\pi t)^{3/2}} e^{-\frac{|X-Y|^2}{4t}}$$

- Equation des ondes:

$$\begin{cases} \partial_t^2 u &= \Delta u = \partial_x^2 u + \partial_y^2 u + \partial_z^2 u \\ u|_{t=0} &= f, \quad \partial_t u|_{t=0} = g. \end{cases}$$

Solution explicite en terme de fonctions trigonométriques de Δ (calcul fonctionnel, propagation à vitesse finie...).

- Equation de Schrödinger:

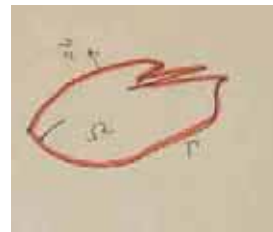
$$\begin{cases} \partial_t u &= i\Delta u \\ u|_{t=0} &= f \end{cases}$$

$$u(t, X) = \int \frac{1}{(4\pi it)^{3/2}} e^{-\frac{|X-Y|^2}{4it}} f(Y) dY$$

Quelques célébrités ("moins sympathiques")



(Biatriz Milhazes)



- Equation de la chaleur sur un domaine: $u = u(t, x, y, z)$, $X = (x, y, z) \in \Omega$

$$\begin{cases} \partial_t u = \Delta u = \partial_x^2 u + \partial_y^2 u + \partial_z^2 u \\ u|_{t=0} = f \text{ (l'état initial)} \\ + \text{CB: condition au bord (déterminée par le milieu physique)} \end{cases}$$

- CB de Dirichlet: $u = 0$ sur le bord Γ de Ω

- CB de Neumann: $\partial_n u = \nabla u \cdot \vec{n} = 0$ sur Γ

On sait que la solution existe, elle est unique mais n'est pas explicite. Parmi les problèmes qui se posent: récupérer des propriétés sur le comportement de u à partir de la géométrie de Ω .

- Equations anisotropes

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t u = \operatorname{div}(a(X) \nabla u) \\ u|_{t=0} = f \\ + \text{CB: condition au bord} \end{array} \right.$$

$a(X)$ est le coefficient de diffusion: la diffusion peut privilégier certaines directions (matériaux composites). L'équation apparaît aussi dans des problèmes de restauration d'images (tenir compte de la corrélation entre composante et non pas restaurer composante par composante).

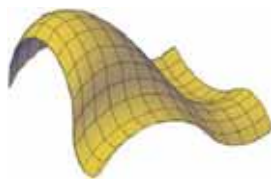
On sait que la solution existe, elle est unique mais n'est pas explicite.

$$u(t, X) = \int p_t(X, Y) f(Y) dY \quad \text{avec} \quad p_t(X, Y) \simeq \frac{C}{t^{3/2}} e^{-c \frac{|X-Y|^2}{t}}$$

[Aronson, Davies, Varopoulos, Ouhabaz,....]

Divers problèmes se posent, notamment la régularité de la solution...

Sur les variétés riemanniennes



M muni d'une structure de variété avec son gradient et Laplacien-Beltrami Δ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t u = \Delta u \\ u|_{t=0} = f \end{array} \right.$$

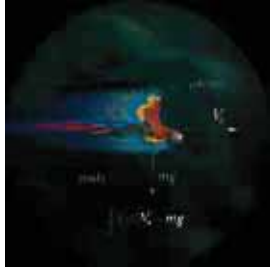
Sur chaque carte locale, c'est une équation anisotrope faisant intervenir la métrique de M

Problèmes qui se posent: comprendre les **propriétés** de la solution à partir de la **géométrie** de M .

$$u = \int_M p_t(X, Y) f(Y) dY \quad \text{avec} \quad p_t(X, Y) \simeq \frac{C}{V(X, \sqrt{t})} e^{-c \frac{\operatorname{dist}(X, Y)^2}{t}}$$

Travaux de Li-Yau, Varopoulos, Saloff-Coste, Coulhon, Grigor'yan, Ouhabaz,...

Quelques célébrités ("féroces")



(Biatriz Milhazes)

- Equations de Korteweg-de Vries (KdV)

$$\begin{cases} \partial_t u &= -\partial_x^3 u - u \partial_x u \\ u|_{t=0} &= f \end{cases}$$

Intervient dans la modélisation de vague en eau peu profonde ou des tsunamis. Solution = onde solitaire qui se propage sans se déformer.

- Equation de Schrödinger non-linéaire

$$\begin{cases} i \partial_t u &= \Delta u + Vu + |u|^2 u \\ u|_{t=0} &= f \end{cases}$$

V est une fonction (le potentiel de condensat). L'équation apparaît dans: des modèles de fluides compressibles, propagation de la lumière dans les fibres optiques, propagation d'ondes de surface, condensats de Bose-Einstein gazeux....

Ce qui est connu: si la donnée initiale f est dans un espace approprié (espace de Sobolev), la solution u existe en temps fini, c-à-d sur $[0, T)$ pour un temps fini $T > 0$ et que $u(t) \rightarrow \infty$ lorsque $t \rightarrow T$ (explosion en temps fini).

Difficile de traiter le cas de potentiel général V .

Techniques: point fixe, analyse harmonique, inégalité de Strichartz (pour Schrödinger linéaire et sans V):

$$\int \left(\int |u(t, X)|^q dX \right)^p dt \leq C \int |f(X)|^2 dX.$$

- Equation de Navier-Stokes (NS)

$$\begin{cases} \partial_t u = \Delta u - (u \cdot \nabla) u - \nabla p \\ u|_{t=0} = f \\ \operatorname{div} u = 0 \quad (\text{équation d'incompressibilité}) \end{cases}$$

Ici l'inconnue u est le champs (vectoriel) de vitesse du fluide et p est sa pression. C'est donc un système.

Sans le terme Δ c'est l'équation d'Euler.

(NS) apparait dans les modèles de:

- Ecoulement de fluide incompressible
- Météorologie: modélisation des courants dans les océans
- Aeronautique: optimisation des ailes des avions
- Biologie: circulation du sang dans le corps....

On peut aussi la considérer sur un domaine et mettre des conditions au bord, voire même sur des domaines Ω_t qui dépendent du temps mais (NS) est déjà **trop difficile** comme cela!

Petit aperçu de ce qui est connu:

- Jean Leray (1934): existence de solution faible
- Fujita-Kato et Koch-Tataru existence de solution pour des données initiales f "petites"

- Existence de solution globale (pour tout $t > 0$) régulière (pour toute donnée initiale) est un problème célèbre non-résolu à ce jour! Fait partie des 7 problèmes du Millénaire (à 1 million de dollars, Institut Clay)

Des groupes de chercheurs dans le monde entier, diverses tentatives et même des articles de recherche affirmant la résolution du problème...avant de se rétracter!

Autres EDP

$$\begin{cases} \partial_t u &= \Delta u + ru(1-u) \\ u|_{t=0} &= f \end{cases}$$

Eq. de Fisher. Modèle de dispersion en dynamique de population

$$\begin{cases} \partial_t u &= \Delta u + f(u) - v \\ \partial_t v &= \delta \partial_t^2 v + \alpha u - \beta v \end{cases}$$

Eqs de Fitz Hugh-Nagumo. Modèle d'impulsions nerveuses

$$\begin{cases} \partial_t u = \operatorname{div}(u \nabla p) + uG(u) \\ -\Delta u + \psi(u, c) = 0 \end{cases}$$

Eqs de Hele-Shaw. Modèle de croissance de tumeur en cancérologie.

Eqs de Black-Scholes en finance (option européennes), équations d'évolution sur des réseaux (lien avec l'informatique, modélisation de trafic routier)....

Autre aspects des EDP: Problèmes inverses (prospection pétrolière, traitement d'images, médecine...), Problèmes de contrôle, Calcul scientifique....

Ce qui compte ne peut pas toujours être compté,
et ce qui peut être compté ne compte pas forcément
(A. Einstein)

LA QUESTION DES ORIGINES : BILAN ET PERSPECTIVES D'UNE DISCIPLINE EN ÉBULLITION, L'ASTRONOMIE-ASTROPHYSIQUE

Pr. Jean Michel ALIMI

*Laboratoire Univers et Théories, CNRS,
Observatoire de Paris, France*



Résumé :

S'il est une question qu'interroge toute l'Astrophysique, c'est la question des origines. De l'origine du système solaire et des planètes qui le constituent jusqu'à l'origine de l'Univers et la formation des galaxies, les progrès instrumentaux, observationnelles et théoriques réalisées ces dernières décennies par notre discipline sont considérables. Depuis peu également, le calcul numérique intensif des systèmes astrophysiques permet même la réalisation d'expérience (in silico) dans une discipline qui en était jusqu'à présent privée.

Nous présenterons quelques uns de ces progrès et les résultats forts associés en insistant spécialement sur la détection des planètes extra-solaires, la recherche de vie extra-terrestre et la nature des composantes invisibles de notre Univers, la matière et l'énergie noires.

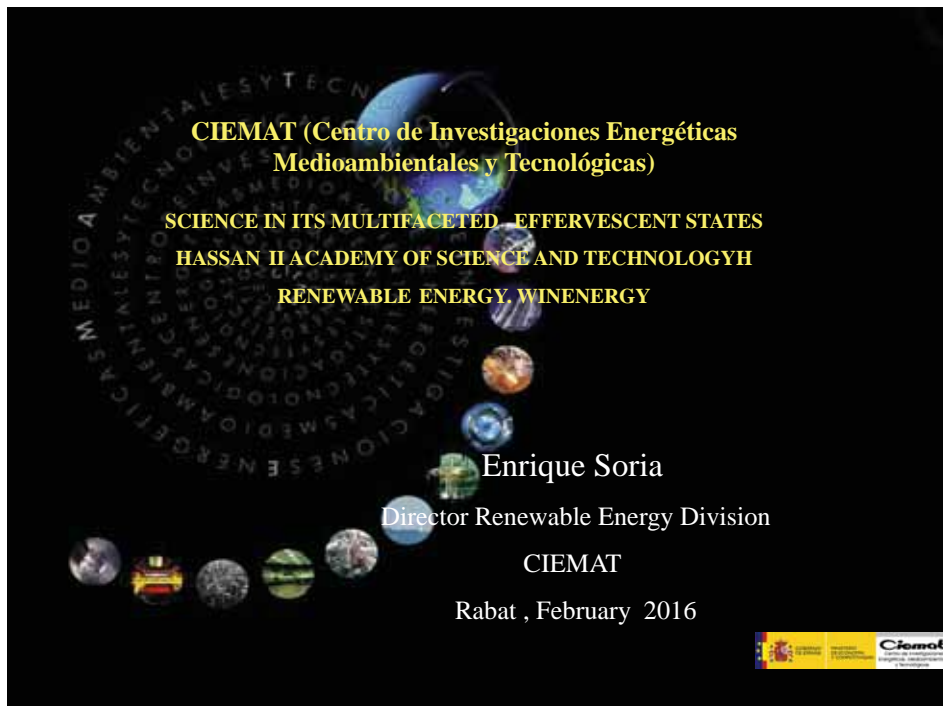
Les perspectives et défi futurs de notre discipline sont aussi formidables, nous illustrerons cela avec la probable future détection des oscillation de l'espace-temps que sont les ondes gravitationnelles émises au tout premier instant de notre Univers ou autour d'un objet compact comme un trou noir.

Séance IV :
NOUVELLES TECHNOLOGIES,
ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : L'UNE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES LES PLUS COMPÉTITIVES

Pr. Enrique Soria LASCORZ

*Avenida Complutense 40, 28040 - MADRID
enrique.soria@ciemat.es*




**CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas
Medioambientales y Tecnológicas)**

**SCIENCE IN ITS MULTIFACETED – EFFERVESCENT STATES
HASSAN II ACADEMY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
RENEWABLE ENERGY, WINENERGY**

Enrique Soria
Director Renewable Energy Division
CIEMAT

Rabat , February 2016



CIEMAT: Basic data

**Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas**

Personnel (2014): 1.320 (including Ph. D. students)

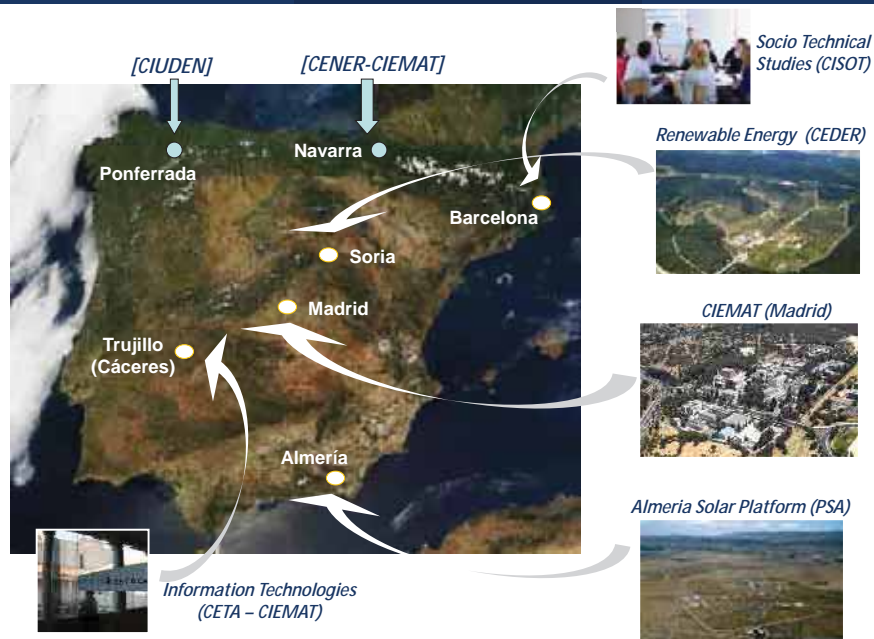
Operational Budget (2014): 100 M€

External Income (2014): 38 M€

OPI: Ministerio de Economía y Competitividad



CIEMAT sites



Scientific and technical areas

- Renewable energy, biofuels and energy saving
- Nuclear energy
- Fossil fuels (energy recovery)
- Elementary particles and astroparticles
- Biology and biomedicine
- Environment
- Ionizing radiations (Metrology and Radiological Protection)
- Scientific instrumentation and medical physics
- Materials analysis and characterisation
- Computation and information technology sciences
- Energy and environmental system studies



CIEMAT facilities



Heliac Flexible TJ-II



Solar Platform of Almeria (PSA)

Pilot pelleting plant
(300-500 kg/h)Ionizing Radiation Metrology
Laboratory (LMRI)

Wind Testing Laboratory



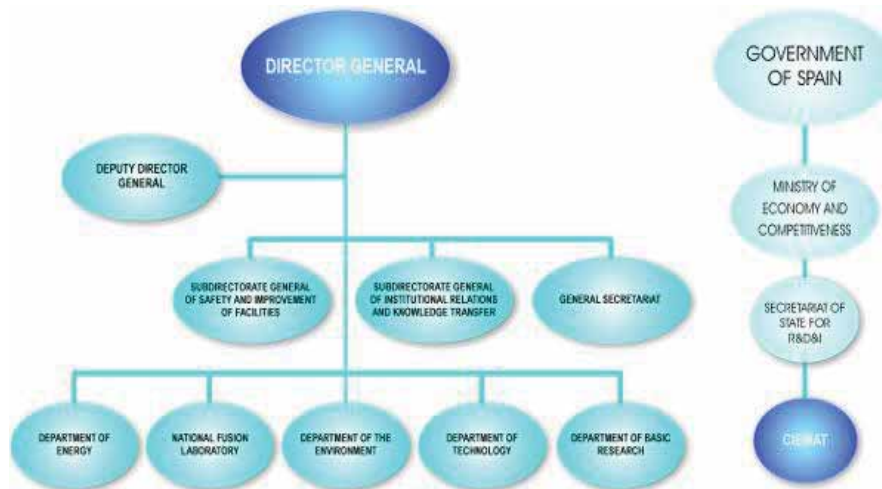
Dosimetric measurements in mannequin

Safety System Analysis
Laboratory (Peca Facility)

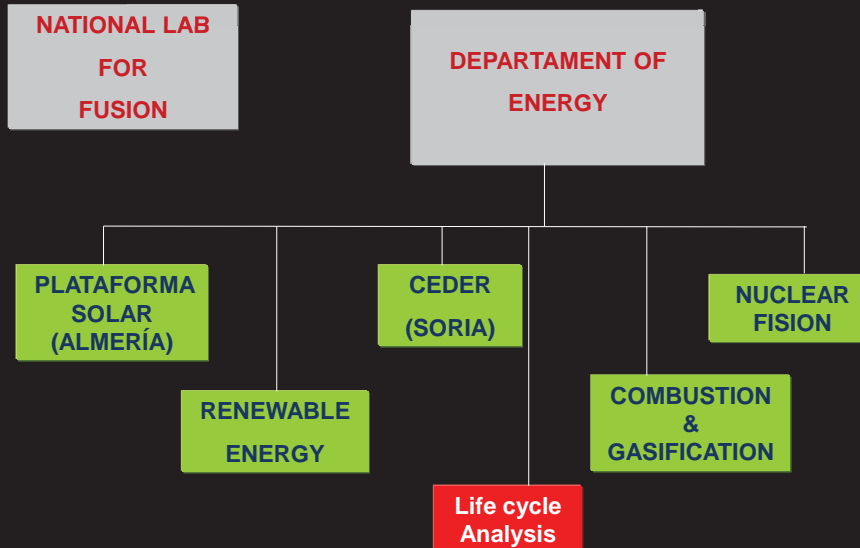
Pilot membrane gas separation plant

PET/CT of small animals for biomedical
applications

Organization

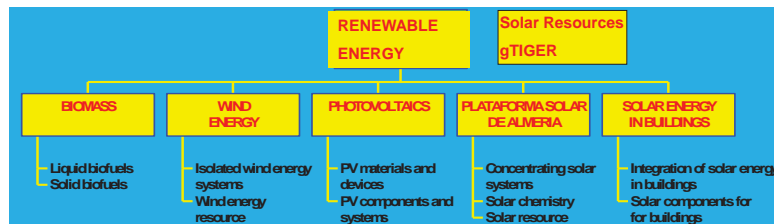


Energy activities at CIEMAT

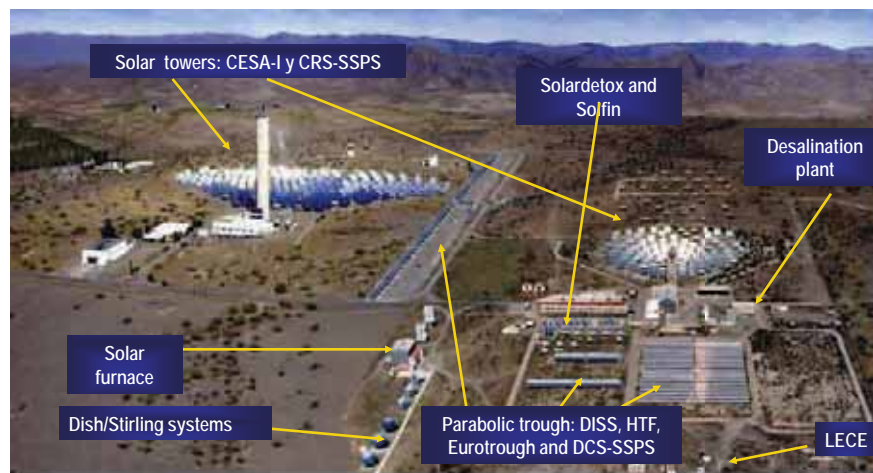


RENEWABLE ENERGY ACTIVITIES AT CIEMAT

- ✓ Part of the Energy Department of CIEMAT
- ✓ Public Research Body → Technological Development
- ✓ Facilities in Madrid, Almeria (PSA) and Soria (CEDER)
- ✓ Pioneer team from 1985 with a strong international projection
- ✓ Staff more than 300 people

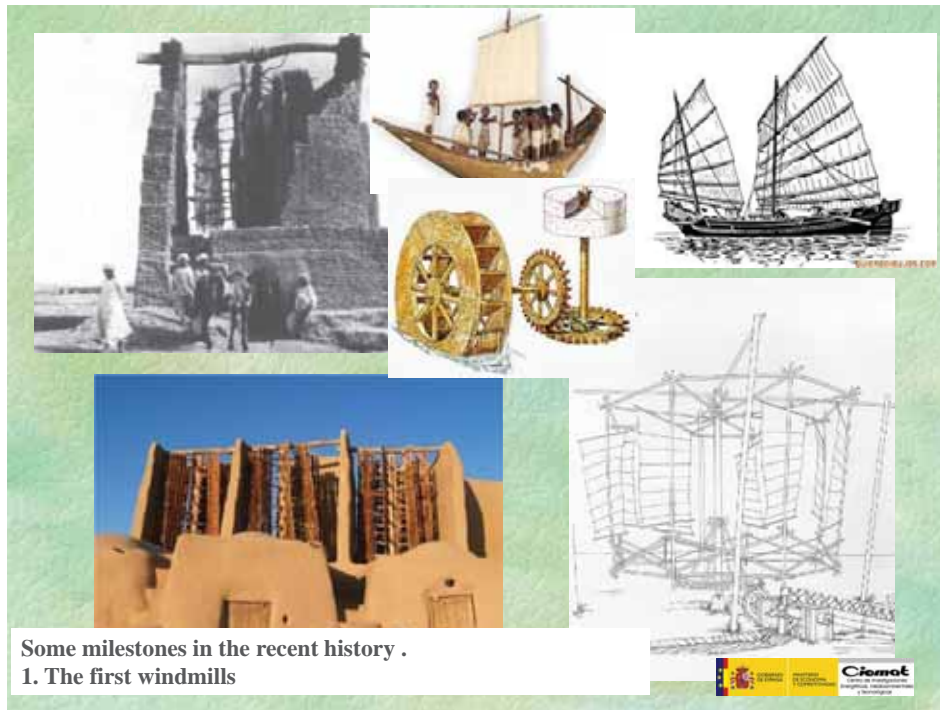


PLATAFORMA SOLAR DE ALMERIA



Most complete installation worldwide for testing Concentrating Solar Thermal Technologies (www.psa.es)





Some milestones in the recent history
3. Electricity generation from the wind



Brush(1887)

Lacour(1897)

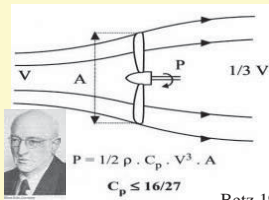


Some milestones in the recent history.
4. American windmill

Medio Ambiente



Some milestones in the recent history.
5. Aerodynamic



Betz 1926



Congreso Nacional del Medio Ambiente



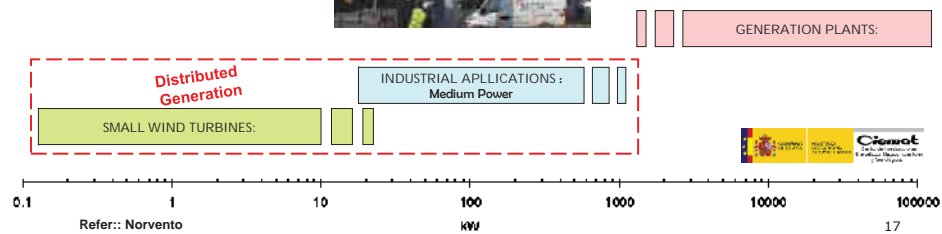
6.-A personal reference.
Prototypes; PEE -Tarifa. AWEC-60



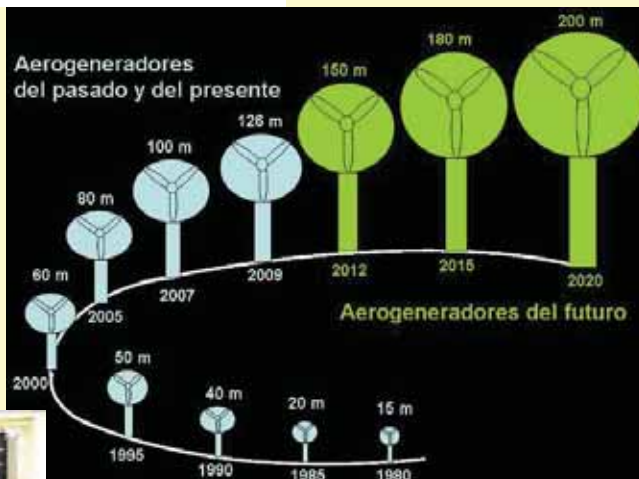
7.- Wind Energy today
(432 GW in operation in the world)



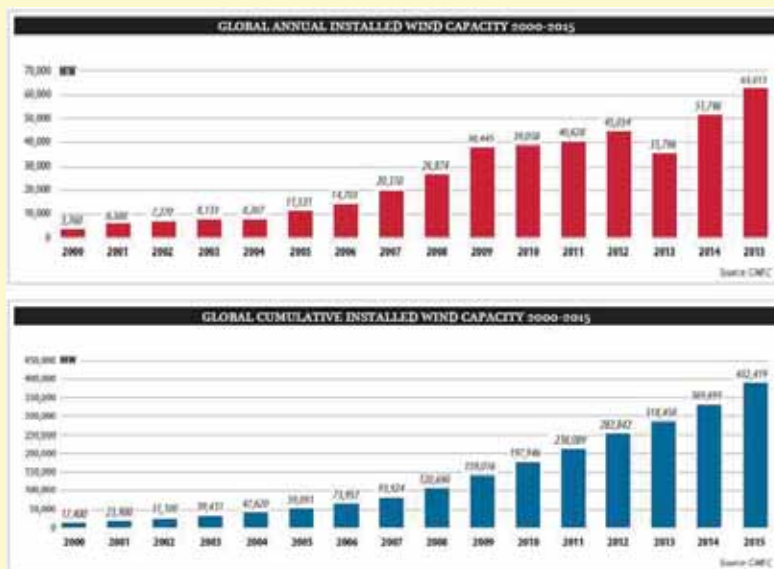
8.- Wind energy, different solutions for different applications



9.- Wind Energy. The future



WIND ENERGY IN THE WORLD



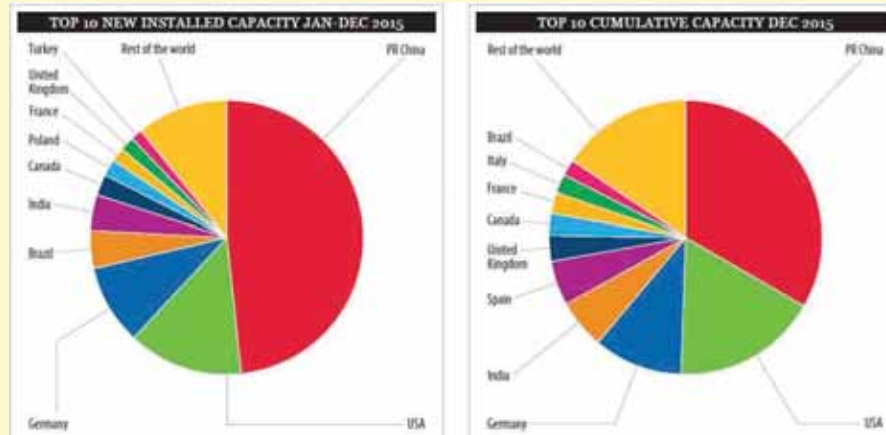
END 2015: 432 GW

INSTALLED 2015: 63 GW

Source : GLOBAL WIND STATISTICS 2015 GWEC



WIND ENERGY IN THE WORLD



END 2015: 432 GW

INSTALLED 2015: 63 GW

Source : GLOBAL WIND STATISTICS 2015 GWEC



WIND ENERGY IN THE WORLD

Position 2015	Country/Region	Total capacity end 2015** [MW]	Added capacity 2015*** [MW]	Growth rate 2015 [%]	Total capacity end 2014 [MW]
1	China	148'000	32'970	29.0	114'763
2	United States	74'347	8'598	13.1	65'754
3	Germany	45'192	4'919	11.7	40'468
4	India *	24'759	2'294	10.2	22'465
5	Spain	22'987	0	0.0	22'987
6	United Kingdom	13'614	1'174	9.4	12'440
7	Canada	11'205	1'511	15.6	9'694
8	France	10'293	997	10.7	9'296
9	Italy	8'958	295	3.4	8'663
10	Brazil	8'715	2'754	46.2	5'962
11	Sweden	6'025	615	11.1	5'425
12	Poland	5'100	1'266	33.0	3'834
13	Portugal	5'079	126	2.5	4'953
14	Denmark	5'064	217	3.7	4'883
15	Turkey	4'718	955	25.4	3'763
	Rest of the World	40'800	5'000	14.0	35'700

END 2015: 432 GW

INSTALLED 2015: 63 GW

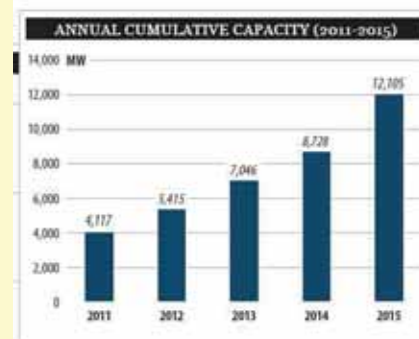
Source : GLOBAL WIND STATISTICS 2015 GWEC



WIND ENERGY IN THE WORLD



OFFSHORE WIND CAPACITY



Wind in power 2015 European statistics



12.8 GW 2015 annual installations

44% of total 2015 power installations

142 GW total wind energy installed at end 2015

€26 bn total wind energy investments in 2015

16 EU countries with over 1 GW of installed capacity

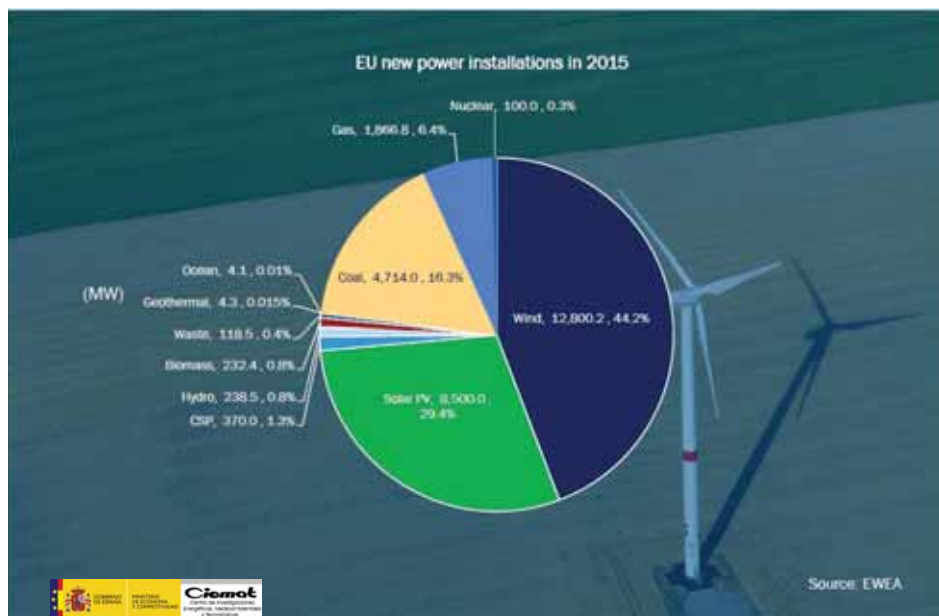


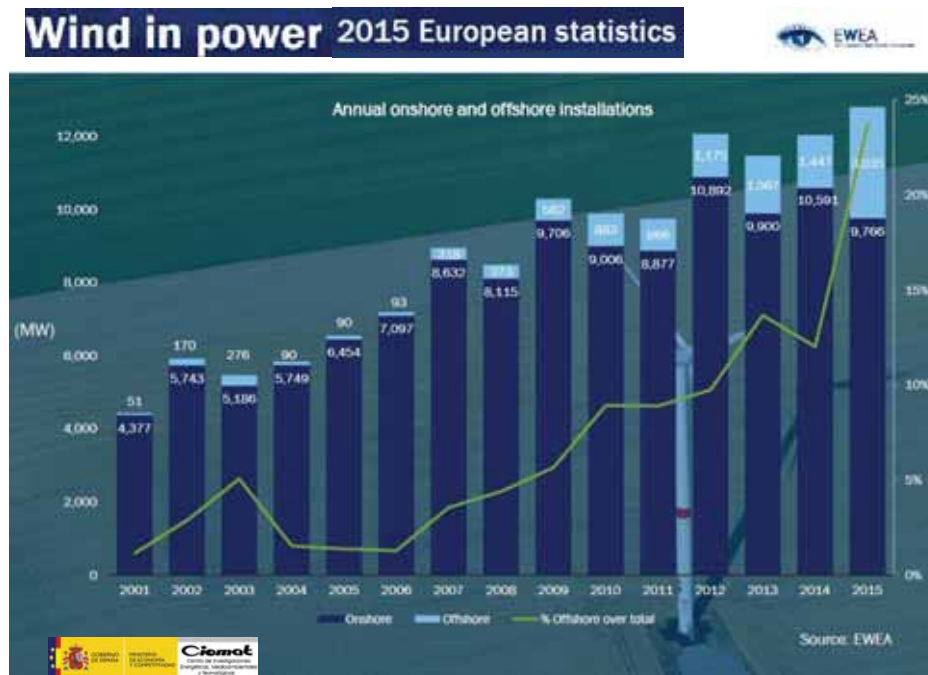
Source: EWEA

Wind in power 2015 European statistics



Wind in power 2015 European statistics





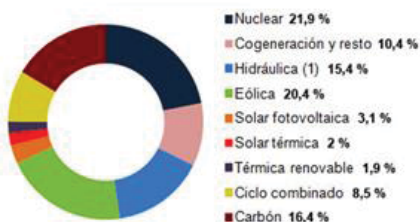
Wind energy in Spain

- **WHY A SUCCESS STORY?**
 - Early mover (90s)
 - Feed-in tariff (no system changes until 2009)
 - Utilities amongst main developers
 - Deployment in a growing power market (1995-2008)
 - Own industry with R&D&I
 - Capital costs – Banking System
- **CURRENT SITUATION**
 - 4TH country in installed power in the world (second in the EU): 23.003 MW
 - No new installations in Spain
 - 1st country in EU in wind power generation (2013 data): 54 TWh
 - 1st country in the world with wind as main power technology during a whole year (2013)
 - Spanish companies had 9.700 MW installed outside the country (2013)
- **CHALLENGES AHEAD**
 - Changes to existing regulatory framework and development of internal market.
 - New 500 MW scheduled for 2015
 - Integration in the grid and storage (pumped storage, electrical vehicles, other storage)
 - First wind farm without any subsidies



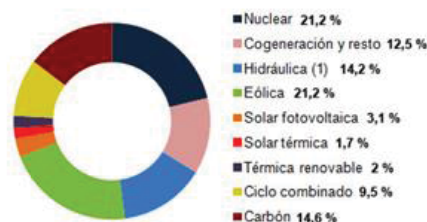
RENEWABLE ENERGY IN SPAIN YEARS 2013- 2014

Cobertura de la demanda peninsular 2014



(1) No incluye la generación de bombeo

Cobertura de la demanda peninsular 2013



(1) No incluye la generación de bombeo



RENEWABLE ENERGY IN SPAIN YEAR 2015



Nuclear	21,13 %
Coal	21,08 %
Natural Gas	11,24 %
Fuel /Gas	2,56 %
Cogeneration and others	10,11 %
Wind	18,00 %
Hydro	9,57 %
Small Hydro (<50MW)	2,11 %
Solar PV	3,07 %
Solar CSP	1,92 %
Biomass	1,83 %
TOTAL RENEWABLES	36,51 %
TOTAL ENERGY DEMAND	268.809 GWh
TOTAL CAPACITY	108.299 MW





WIND ENERGY IN SPAIN

Key Statistics 2015

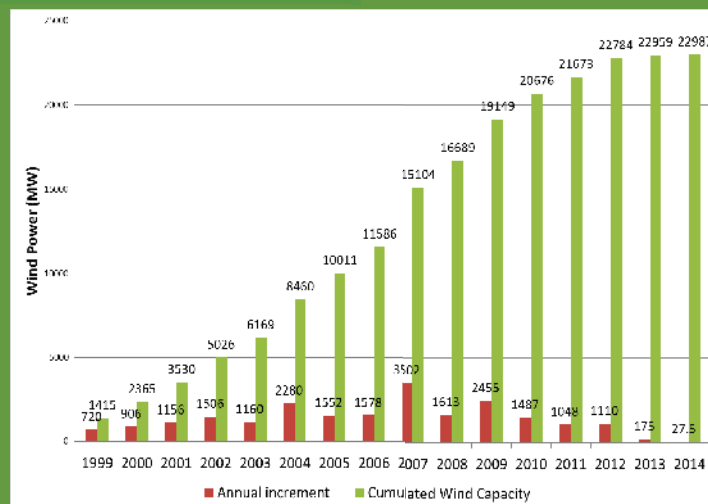


Total installed wind generation	23.003 MW
New wind generation installed	0.0 MW
Total electrical output from wind	48.380 GWh
Total electrical power generation	268.809 GWh
Wind generation as % of national electric demand	18.0 %
Average Capacity Factor	24 %
NREAP Target	35,000 MW by 2020



Wind Energy in Spain

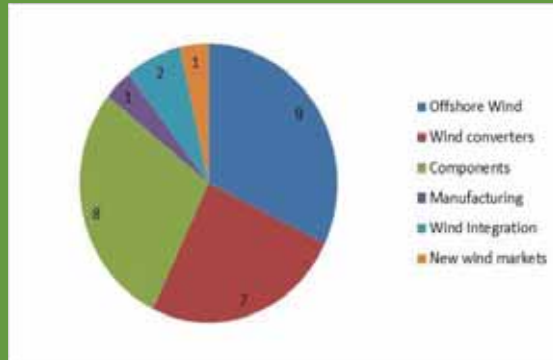
Wind Capacity installed



No new wind capacity installed during 2015

2015 Wind R&D Activities in Spain

Research areas / Number of projects



Offshore Wind	9
Wind converters	7
Components	8
Manufacturing	1
Wind Integration	2
New wind markets	1
Total # Projects	28



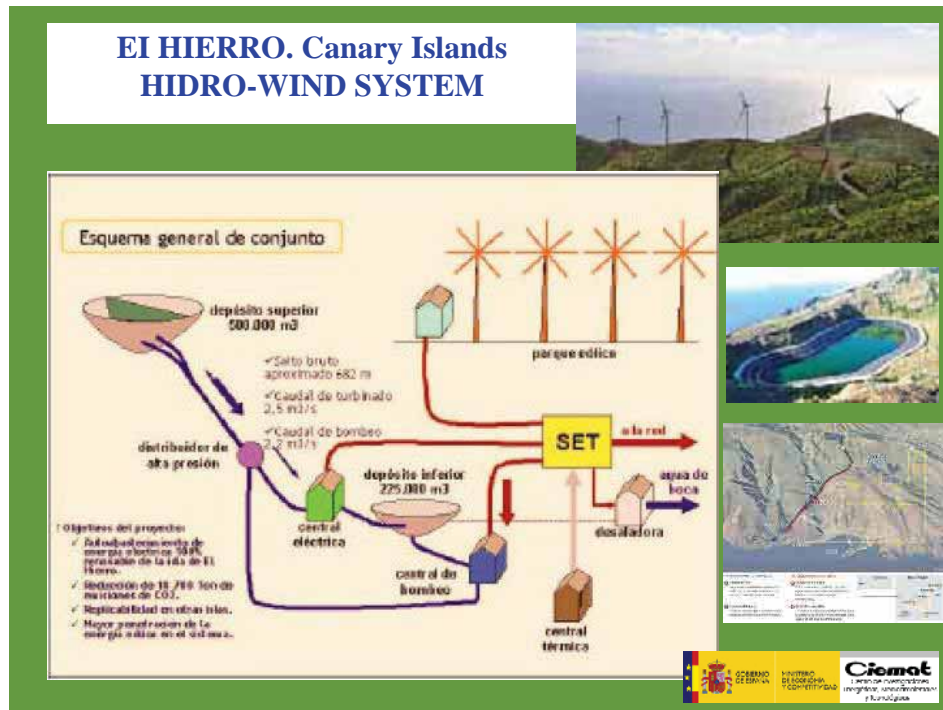
Technological developments



Regarding new technologies the offshore wind turbine Gamesa G128-5.0 installed in Aguinaga port dock in Las Palmas de Gran Canaria island has demonstrated a **very high reliability**, beating the monthly production record of a single wind turbine in Spain. In August 2014, **the averaged output power was 4,27 MW equivalent to a capacity factor of 85.4%.**

The companies Areva and Gamesa have signed an agreement to establish a 50/50 Joint Venture, named **Adven** for offshore wind development.





Spanish Experience on **wind energy integration** into the grid (source AEE)

Critical elements of the integration of wind power into the electric grid, system and market operations

TECHNICAL REQUIREMENTS TO **CONNECT** WIND FARMS TO PUBLIC MAINS:

- Power quality: flicker, harmonics, ...
- Safety.
- Minimum requirements for later technical operations: permanent voltage control, f/P, LVRT, ...

TECHNICAL SYSTEM **OPERATION**:

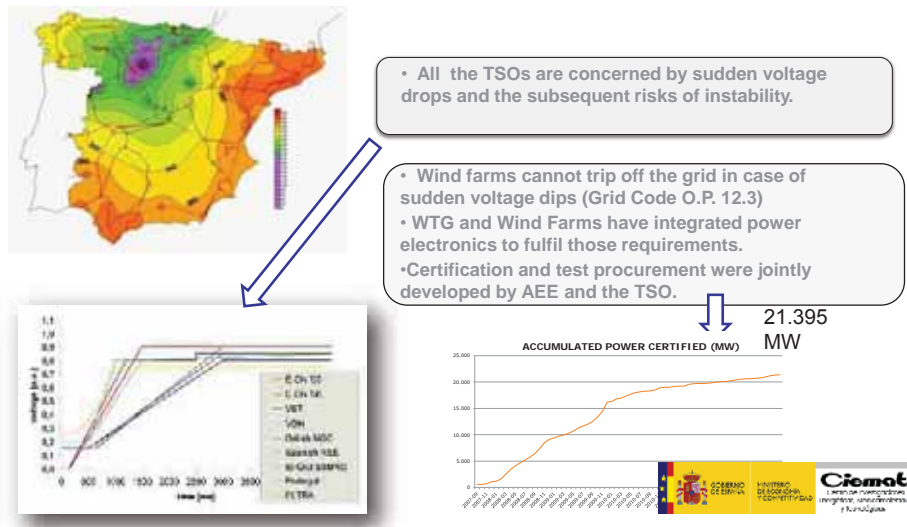
- Local voltage control.
- Contribution to grid stability.
- Regulation and balancing power costs as low as possible.

WHOLESALE ELECTRIC **MARKET**:

- Wind power increases market liquidity.
- Day-ahead offers are based on weather forecasting.
- Deviations can be compensated in the intra-day markets.

Spanish Experience on wind energy integration into the grid (source AEE)

Only 5% of the wind power installed in Spain is not adapted to the LVRT grid code



Spanish Experience on wind energy integration into the grid (source AEE)

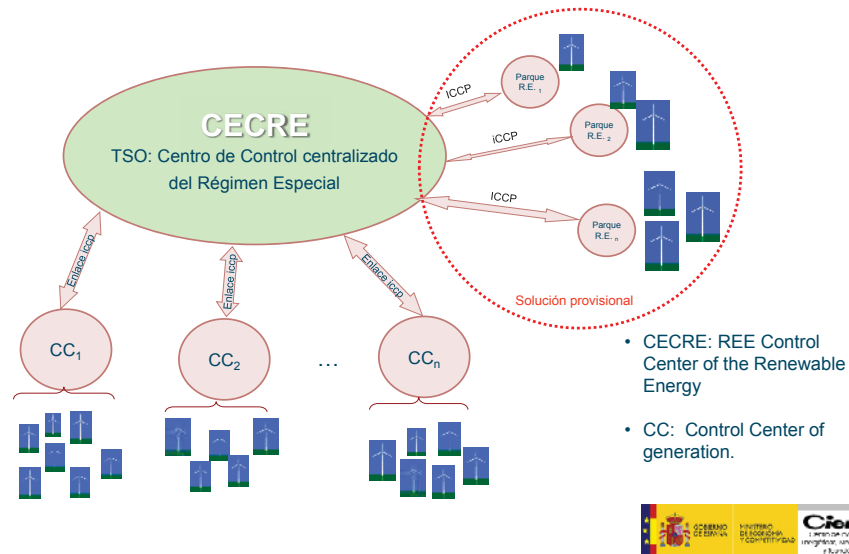
Testing wind turbine generators

- Barlovento Recursos Naturales has tested more than 100 models of wind turbine generators. Tests of FRT, energy quality, power curve, etc.



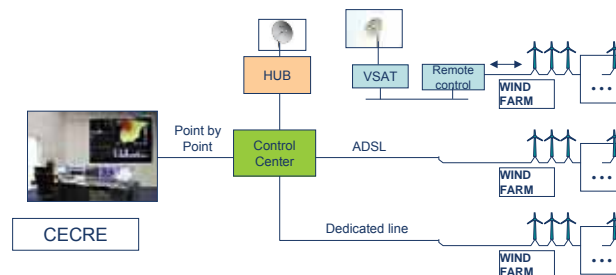
Spanish Experience on wind energy integration into the grid (source AEE)

The coordinated operation of the system is crucial



Spanish Experience on wind energy integration into the grid (source AEE)

All wind farms over 5 MW of capacity are controlled by the TSO



REASONS FOR CURTAILMENTS (O.P 3.7)

- Overload risks in transmission and distribution grids.
- Risks of losing power by transient instability (LVRT).
- Limited short circuit capacity of the installed wind farms which could restrict the operation of neighbourhood protections.
- Excess of generation which cannot be consumed by the demand (limited exchange capacity with France).

A photograph showing five white wind turbines of varying sizes situated on a grassy hill. The sky is a clear, deep blue. The turbines are positioned at different heights and angles, with the largest one in the center foreground. The hill is covered in green grass, and there's a small structure or building near the base of the central turbine.



Source: wind sector industry estimates

30

Main players in major activity areas:



Future



- **Spain has renewable energy targets agreed with the EU of 22.7% of final energy consumption.** That means some more new renewable energy capacity has to be installed, Ministry of energy planning departments predicts between 4,553 and 6,473 MW wind energy capacity increase by 2020.
- The new Energy Law includes a **bidding scheme with some investment cost subsidy (500 MW are scheduled for 2015)** but the energy reform approved by the current government included the possibility to modify the economical conditions every 6 years introduces some uncertainty in this process.
- Some specific markets with high energy cost such as the **Canary Islands are included in the** new Energy Law contemplates the approval of 460 MW in the archipelago during the next years with an approximate tariff of 85€/MWh. Wind energy may be really price competitive with the local generation price that reaches some 230 €/MWh due to the high dependence on fossil fuels.
- Spain is wasting some crucial years to develop its domestic wind power market. Although **the international markets are still supporting a local industry** generating some 25,000 jobs, the future development of a domestic market is crucial in a market with a highly undeveloped potential.



THANK YOU!
enrique.soria@ciemat.es

MESURE DE L'ENTROPIE POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE DES BATTERIES

Pr. Rachid YAZAMI

*NANYANG Technological University,
Singapour*



KMI
THE BATTERY INTELLIGENCE COMPANY

 **NANYANG
TECHNOLOGICAL
UNIVERSITY**

**Entropymetry for battery science and
technology**

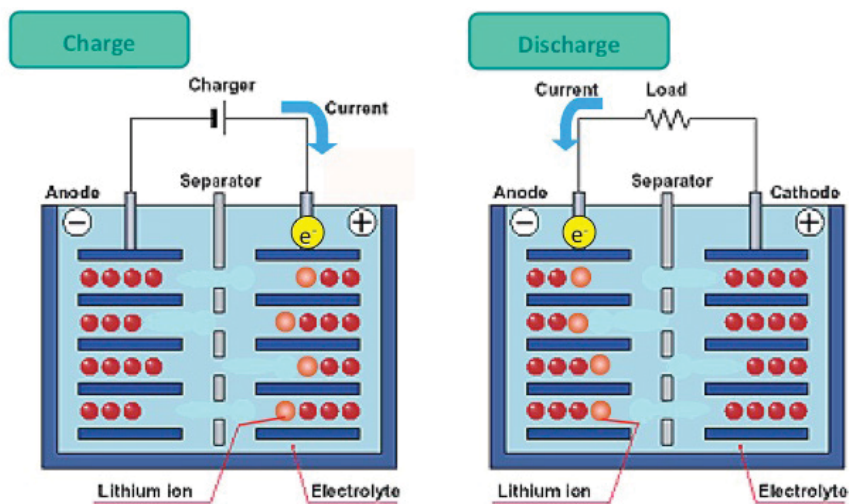
Rachid Yazami

Outline

- Context: LIB operation, materials and market
- Principles of entropymetry
- BA-2000 equipment
- Applications of entropymetry
 - SOC, SOH and SOS
- Other applications
- Future developments

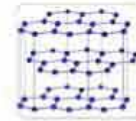
Operation Principles of LIB



Major Anode Materials

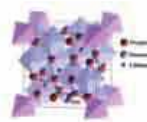
Graphite
(hex/Rh.)

372 mAh/g
(LiC_6)



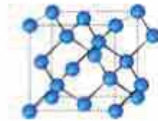
Lithium titanate
(spinel)

~220 mAh/g
 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$



Silicon
(cubic)

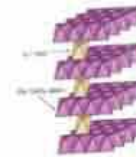
~4200 mAh/g
 $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$



Major Cathode Materials

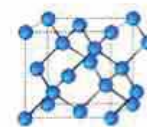
LCO
(hex)

138 mAh/g
(LiCoO_2)



LMO
(spinel)

110 mAh/g
 LiMn_2O_4



LFP
(orth.)

170 mAh/g
 LiFePO_4



Charles Stark Draper Prize' 2014:



Dr. A. Yoshino

Mr. Y. Nishi

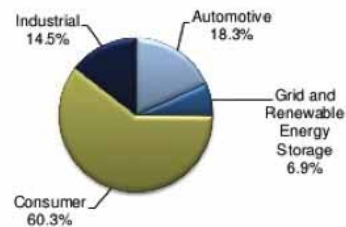
Prof. J. Goodenough

Prof. R. Yazami

Market Segmentation by Application

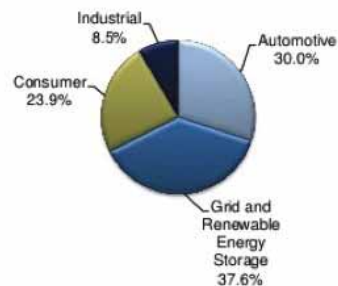
Key Takeaway: The consumer segment dominates the global lithium-ion battery market with increased use in laptops, smart phones, power tools, and other applications.

Total Lithium-Ion Battery Market: Percent Revenue Breakdown by Application, Global, 2013



Key Takeaway: The utility segment dominates the market as utilities are seeking smart grid solutions that utilize lithium-ion batteries to improve operational efficiency and effectiveness.

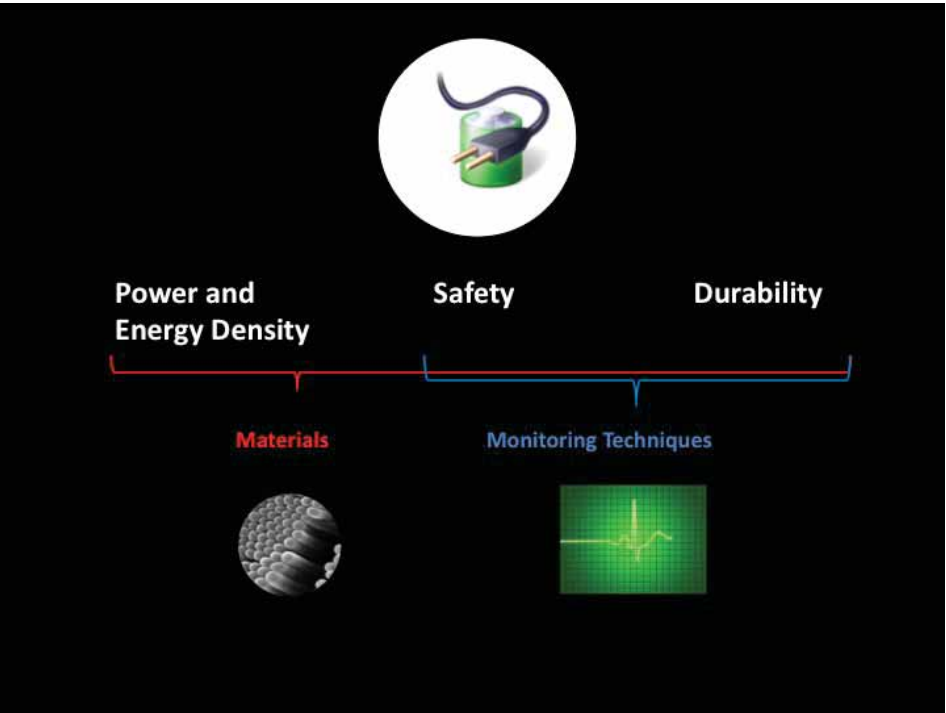
Total Lithium-Ion Battery Market: Percent Revenue Breakdown by Application, Global, 2020



Note: All figures are rounded. The base year is 2013. Source: Frost & Sullivan

LIB Market Forecast 2015-2025

Billion cells	3C	XEV	SES
2015	1.5	0.6	0.135
2016	1.67	0.67	0.19
2017	1.86	0.75	0.27
2018	2.07	0.83	0.38
2019	2.30	0.93	0.53
2020	2.56	1.04	0.75
2021	2.84	1.16	1.06
2022	3.16	1.29	1.50
2023	3.52	1.44	2.11
2024	3.92	1.61	2.97
2025	4.35	1.80	4.17
TOTAL (Bn)	29.75	12.12	14.07



The Gibbs free energy ΔG relates to the OCP, E_{OCP} :

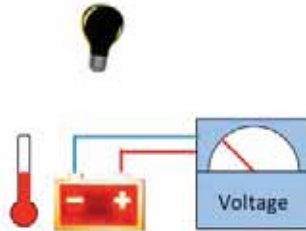
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta S(x) = nF \partial E^{\uparrow 0}(x) / \partial T$$
$$\Delta H(x) = nF(T \partial E_{F0}(x) / \partial T - E_{F0}(x))$$

10



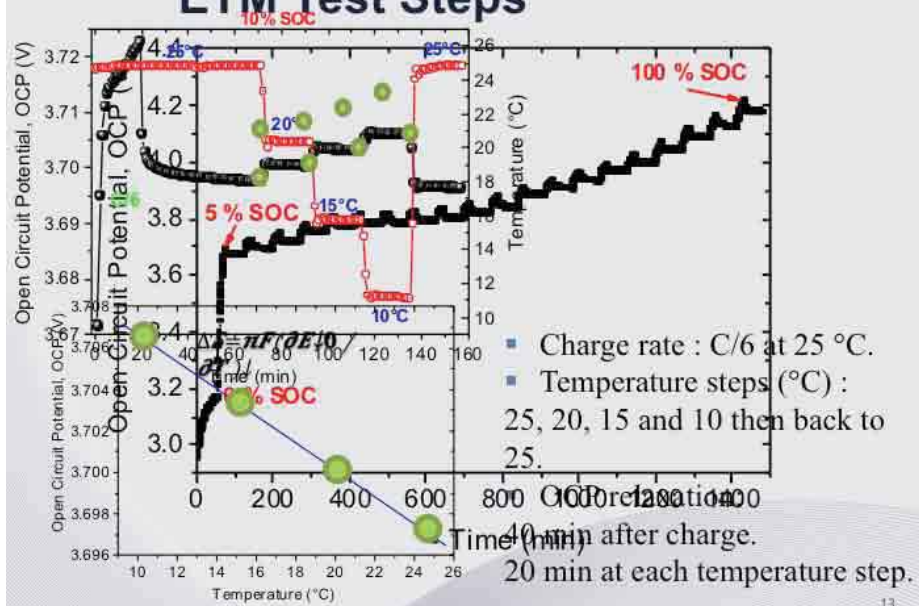
ETM Test Steps



12

TUM CREATE

ETM Test Steps



13

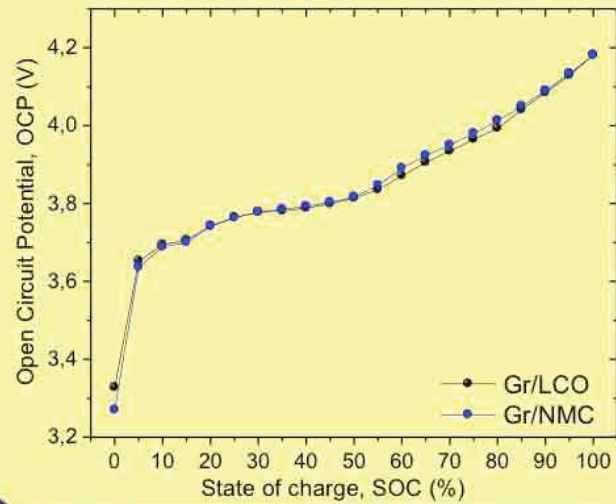
Applications of entropymetry



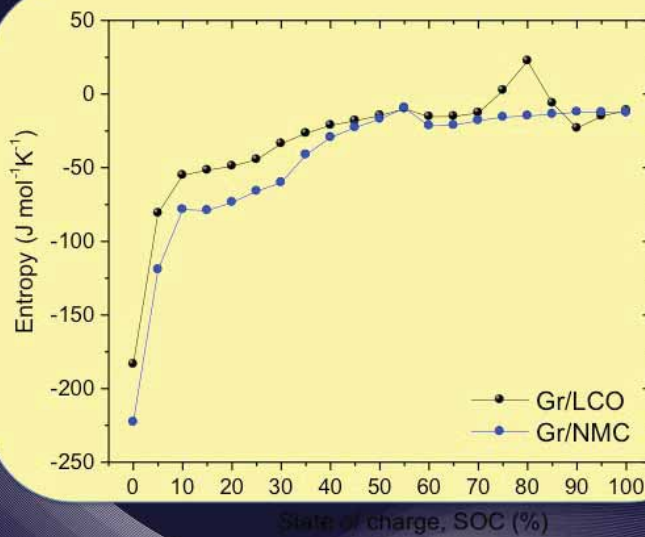
1. Cell' chemistry



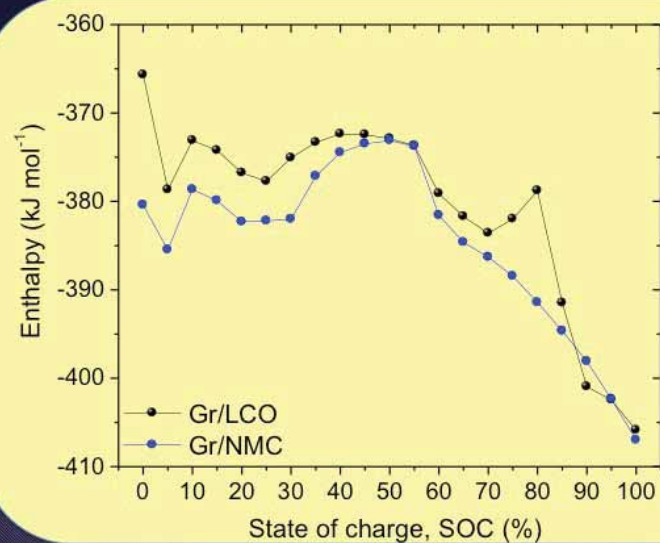
LCO vs. NMC: OCP profile



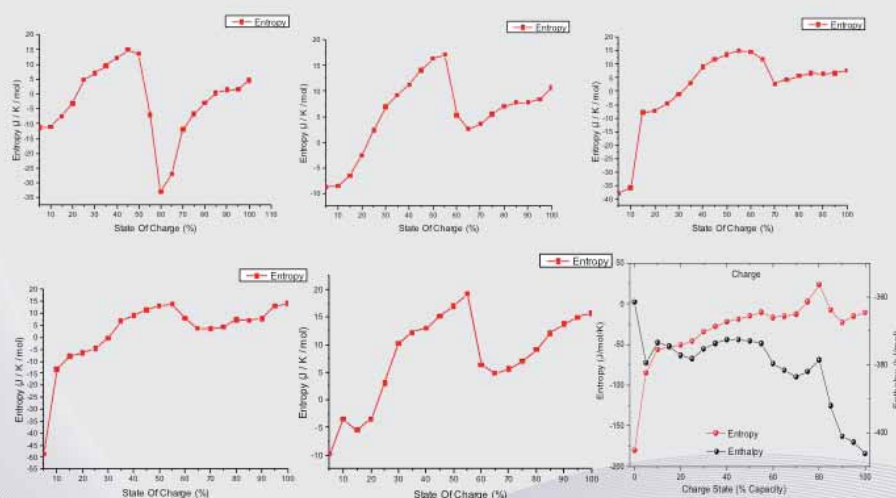
LCO vs. NMC: Entropy profile



LCO vs. NMC: Enthalpy profile



Entropy profiles of different LIB



2. State of Charge



The “battery theorem”

“Two different SOC of a closed rechargeable cell cannot have simultaneously the same entropy and enthalpy values”



Illustration of the battery theorem

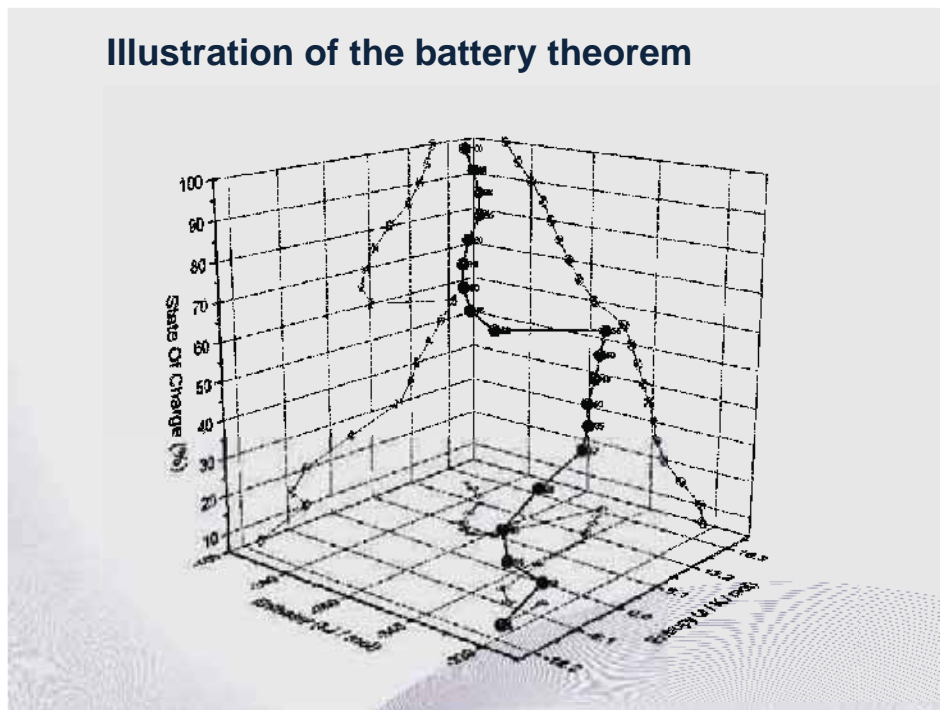


Illustration of the battery theorem

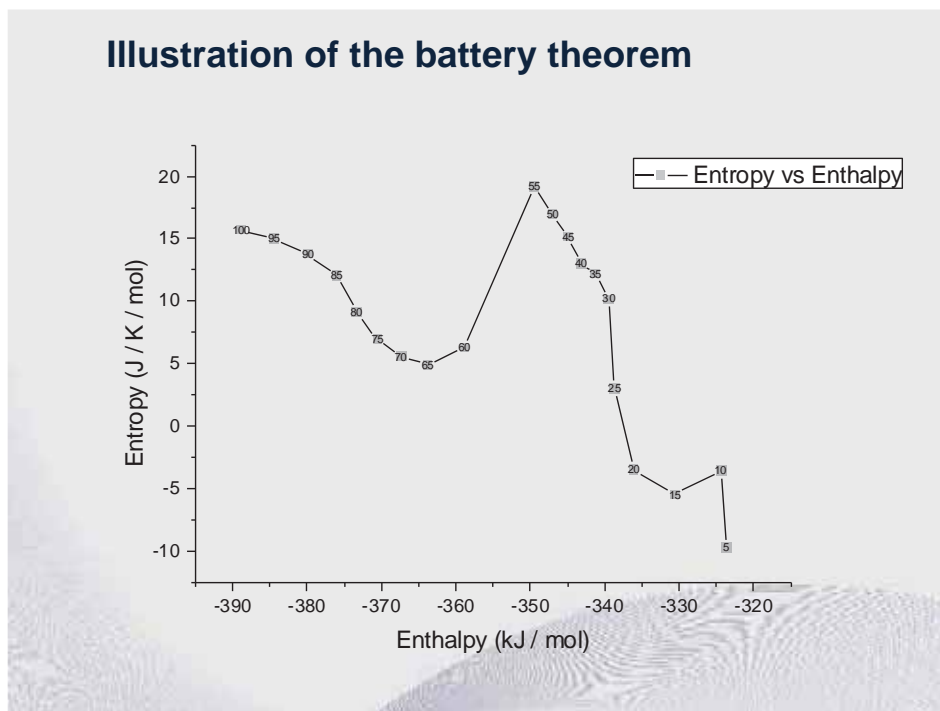
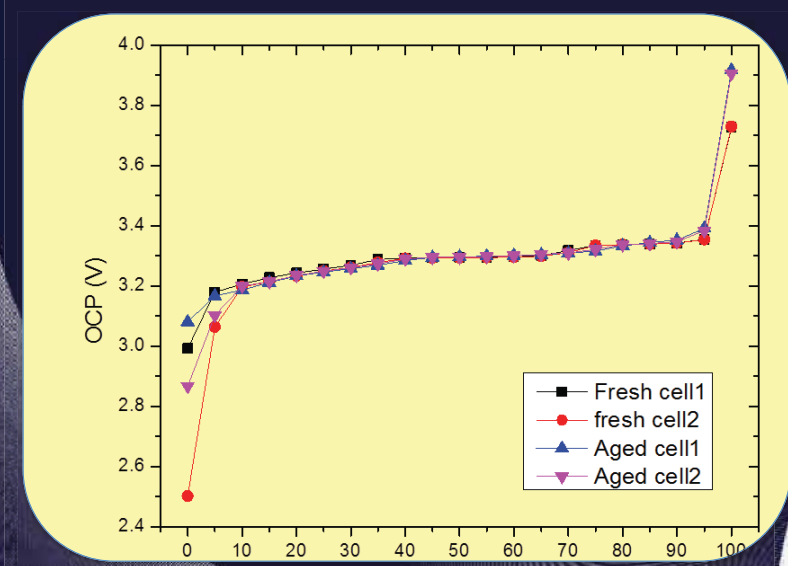


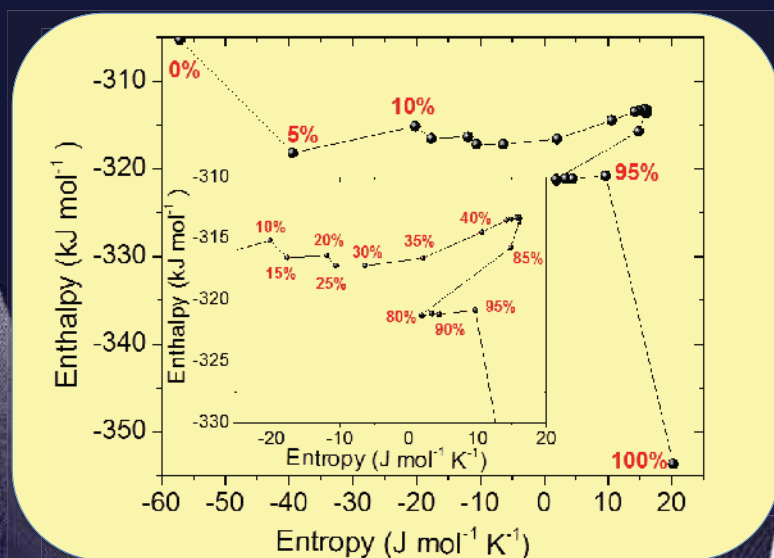
Illustration of the battery theorem

<https://www.youtube.com/watch?v=fpvj5ciLHxQ>

Graphite-LFP' cell

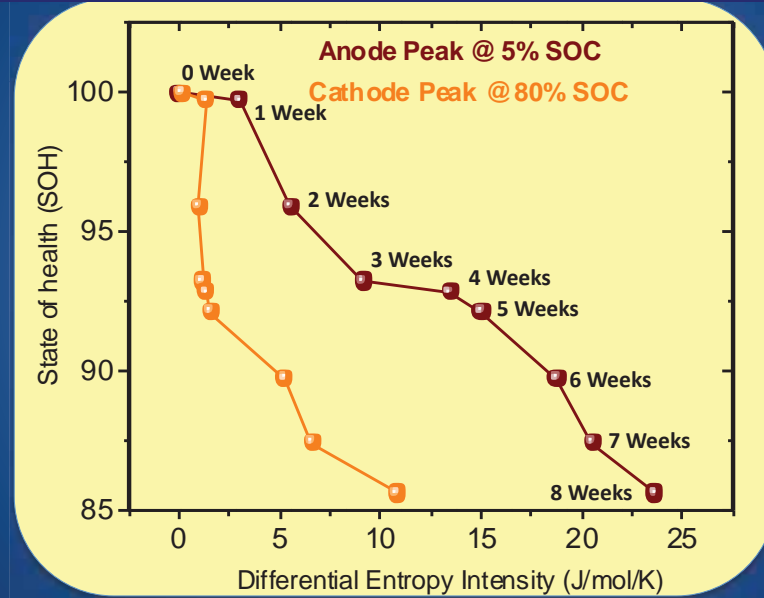


SOC assessment of LFP Cells



3. State of Health

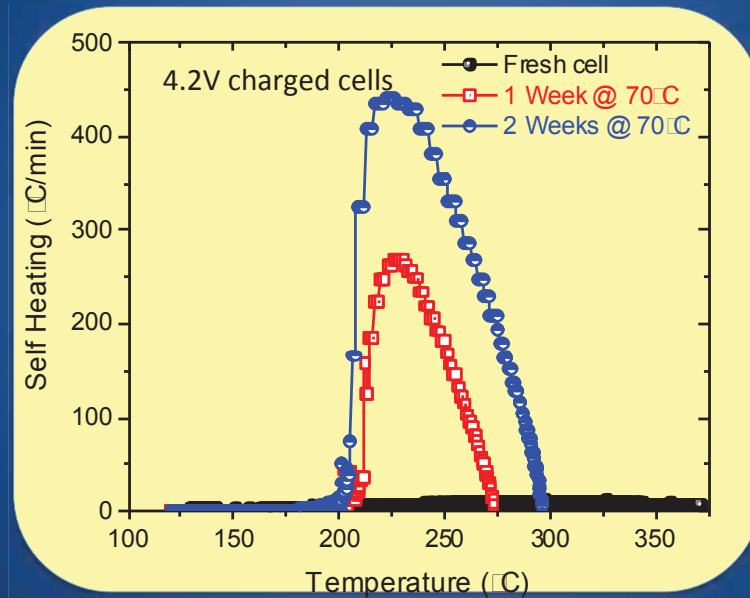
Differential entropy and SOH



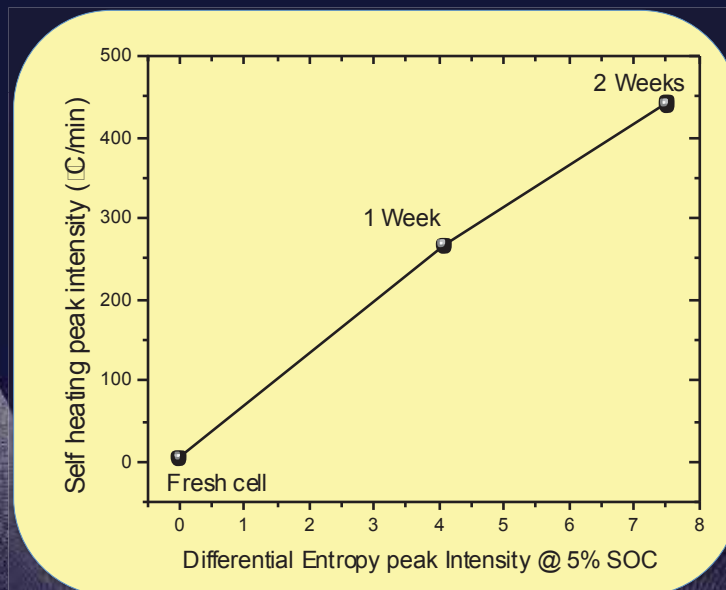
4. State of Safety



ARC results (self-heating rate)



Differential entropy and SOS



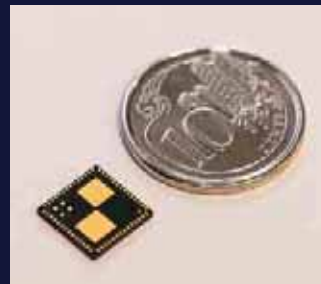
Other applications:

- Ageing memory
- Electrode materials characterization
- Cell quality control
- SOC of anode and cathode vs. SOC of full cell
- Adaptive charging protocol according to SOH
- Cell optimization



Future developments:

- Imbedded chip



CO-OPÉTITION ET CO-INNOVATION : QUEL RÔLE POUR LA RECHERCHE PUBLIQUE?

Pr. Philippe A. TANGUY

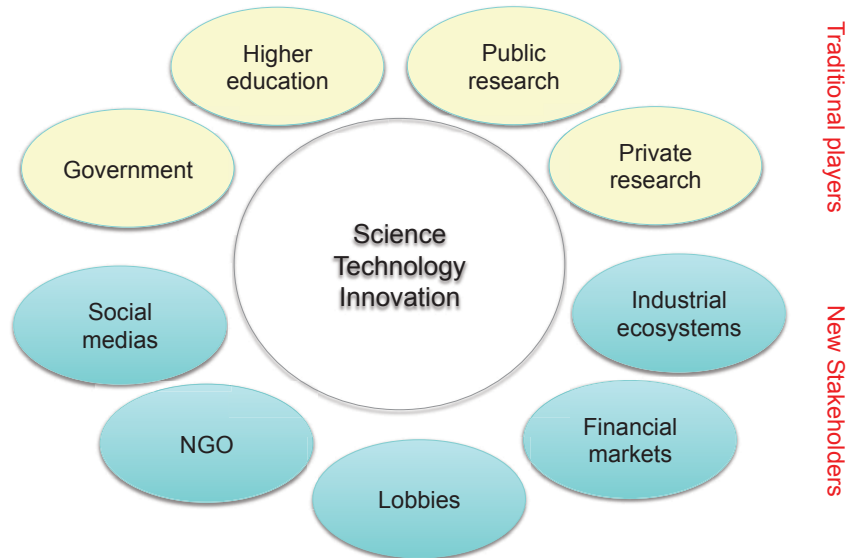
*Membre Correspondant de l'Académie
Hassan II des Sciences et Techniques*



OUTLINE

Innovation Megatrends
TRL and Valley of Death
Three Innovation Models
Ingredients for Success

A FIRST MEGATREND: STAKEHOLDER DIVERSITY



Societal changes: public opinion is shaped by low level digital media

GLOBALIZATION MEGATRENDS

Systemic Evolution: **Globalization**

- Complexity => **Holistic approach**
- Speed of change => **Creation** addressing real needs
- Discontinuity, disruption and economic Volatility => **Anticipation**

Addressing worldwide issues: **Grand Challenges**

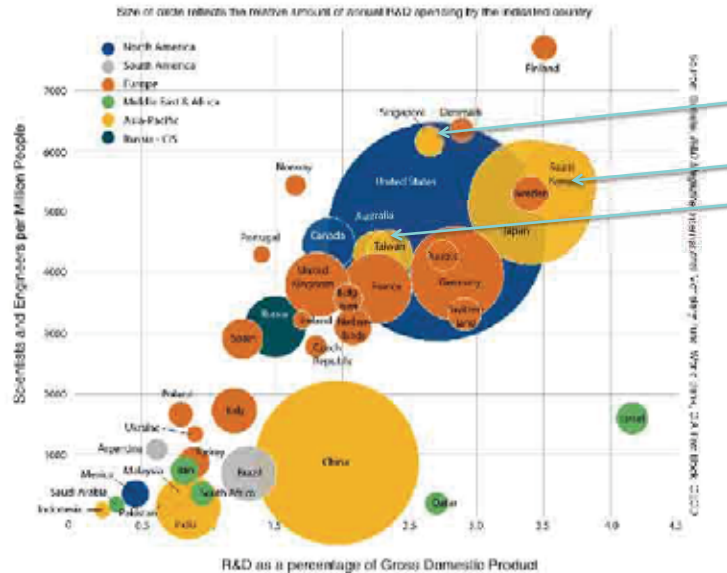
- **Energy**, Water, Food, Health
 - **Sustainability**, **Acceptability**
 - Poverty, **Bottom-of-the-Pyramid**
- } System approach, Interdisciplinarity

Innovator Landscape: **Asia Shift**

- Emphasis on entrepreneurship - **EU**
- Shorter term focus for R&D objectives - **USA/Canada**
- Upcoming scientific superpowers **China and India**
- Powerful contenders from smaller countries - **Singapore, Korea, Taiwan**

- ❑ Research increasingly built on non-formal network aided by Internet
- ❑ Cutbacks in public R&D funding and focus on economic returns
- ❑ Hyper-competition for brains and talents developing on a global scale

WORLD OF R&D IN 2013



BUSINESS ANSWERS TO THE MEGATRENDS

Accelerating of Innovation through **Co-opetition** and **Co-innovation**

- Addressing the systemic level - **Complex**, **Fast** and **Disruptive**
- Co-creating with actors in the value chain (trendsetters, knowledge generators, technology suppliers, marketers, finance) **speeding up** the process from idea to product or process

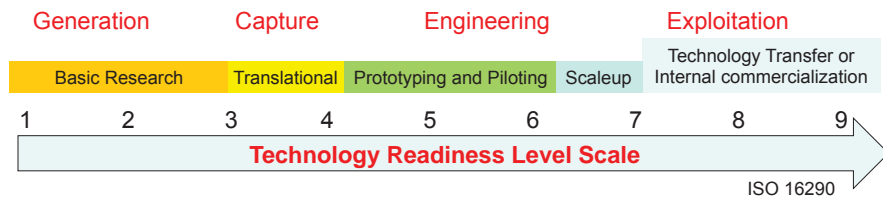
Eliminating the traditional barriers

- **Open Innovation** practices allowing others to use ideas and results
- **Co-funding** to reduce R&D costs
- **Breaking the walls** between chemistry, biology, physics, mathematics and social sciences (no separation of disciplines ☐ *la* [Auguste Comte])

Adapting to the Supply/Demand Disconnect:

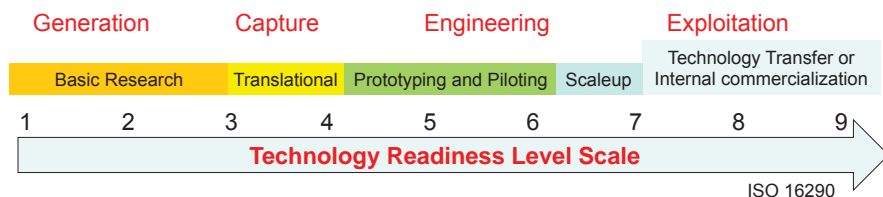
Government and big Companies are **supply-driven** (what can I sell, what can I provide), whereas **startups** are developing solutions often

TECHNOLOGY READINESS LEVELS



- Academia focus: TRL 1-3
- Industry focus: TRL 4+

TECHNOLOGY READINESS LEVELS



- Academia focus: TRL 1-3
- Industry focus: TRL 4+



TRL 3-4: Valley of Death

Disconnect in translational R&D inhibiting research valorization

- Divergence in interest and motivation between academia and industry
- Failure of Governments to reconcile these two solitudes
- Differences in organization and social cultures
- Very diverse practices between countries and institutions

- Some innovation approaches proposed to tackle the Valley of Death

EUROPEAN INSTITUTE OF INNOVATION & TECHNOLOGY

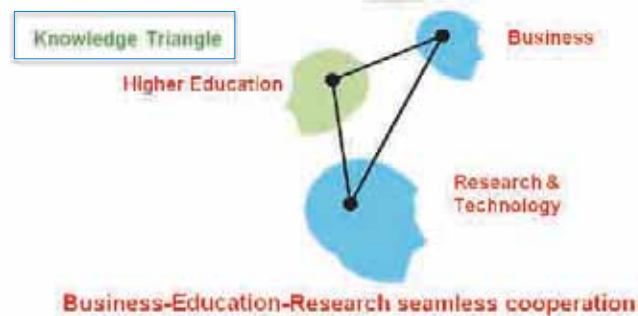
EIT: THE BARROSO LEGACY TO UNLOCK THE EUROPEAN INNOVATION LANDSCAPE

EIT MISSION:

□ To become the catalyst for a step change in the European Union's innovation capacity and impact □

- EIT is the first initiative of the EU bringing together the **three corners** of the knowledge triangle with the **entrepreneur in the driver's seat** to form the necessary links between education, business and research
- Development of an innovative knowledge supply chain to specifically address the **TRL disconnect**

KNOWLEDGE TRIANGLE MODEL



KICs: Knowledge and Innovation Communities

- Highly integrated partnerships with a well-defined governance under the leadership of a **CEO** following a **business plan**
- Clustering partners in co-location centers distributed throughout Europe
- Thematically convergent
- Driven by societal needs

Climate-KIC KIC InnoEnergy KIC Digital KIC Health KIC Raw Materials

EXAMPLE: KIC INNOENERGY SE

Technology Strategic Network “Boosting Innovation for Sustainable Energy”

- Created in 2010 - One of the three original KICs of the EIT

- An original business model: Societas Europaea (SE)
NL-based EU corporation

- Addressing the knowledge triangle Education, Research and Innovation in energy through a for-profit company with 100% dividends reinvested



- 27 shareholders (Total is a founding member)

- 33% industry partners

- 50+ % of key research players in Europe

TRL: 3 to 5 and 5 to 8

GERMANY RESEARCH SYSTEM AND STRATEGY

Independence and Freedom (« Grundgesetz ») – Art. 91b

Based only on excellence (irrespective of concentration consideration)

National political consensus on objectives => continuity

Elaborated by Industry, Academia and Länder (not the « Bund »)

Deeply convinced that 'Research = Industrial Leadership & Power'

Support cutting-edge technologies - Made in Germany

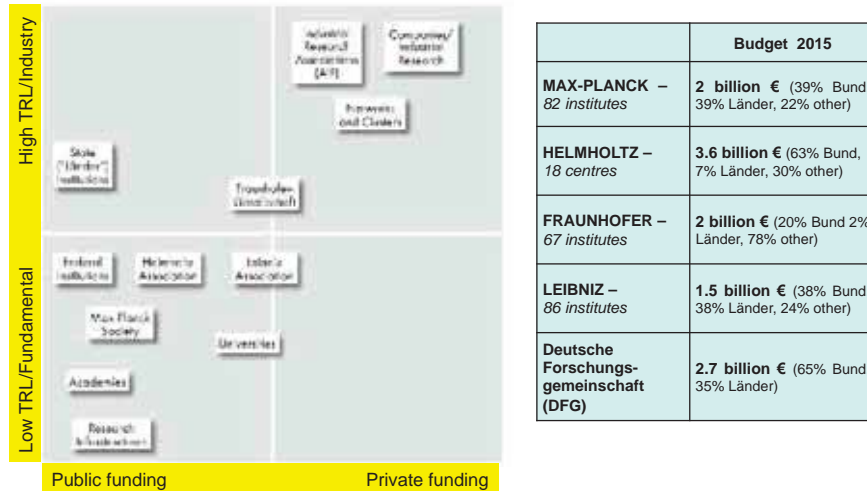
Harness the potential of SMEs - "Mittelstand"

No tax credit for industrial R&D!

High-Tech Strategy 2020 focusing on **climate**, **energy** and **mobility**

Manufacturing game-changer: "**Industrie 4.0**"

THE FUNDING MIX



Co-opetition and co-innovation are embedded in the R&D ecosystem DNA

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

- **Research and development**
 - Application-oriented research of direct use to businesses and for the benefit to society
 - Application-oriented basic research
 - Departmental research for the German Federal Ministry of Defense
- **Business community**
 - Institutes work as profit centers
 - One-third of the budget consists of income from industrial projects
 - Spinoffs by Fraunhofer researchers are encouraged
- **Contracting partners/clients**
 - Industrial and service companies
 - Public sector

TRL: 5 to 8



THE KOREA MODEL

Societal consensus in investing massively in S&T, higher education, while prioritizing economic development in view of establishing a technology-based nation.

Top-down approach with ambitious objectives for 2017 (3rd Plan on basic Science and Technology):

- 7th economical power
- GERD: 5 % of GDP
- 640,000 new jobs

Korea already ranked 5th in the world for Innovation after Japan, USA, France, and Germany (Thomson 2015)

National long-term priorities: low carbon green growth supported by the development of core green technologies in 27 technological areas including:

- Circular economy
- Eco-friendly automobiles (powertrain, recyclability, biosourced materials)
- Solar power
- Smart grids

3RD PLAN ON BASIC SCIENCE AND TECHNOLOGY

4-year plan released in July 2013 - USD 70 billion invested in Information/communication technology (34%), advanced material technology (13%), environmental technology (10.7%), and biotechnology (7.7%).

Explicitly encouraging:

- o Company-led industrial-academic joint research
- o Business input for R&D thematic areas
- o Technology transfer and speedup of commercialization
- o Education programs aligned to industrial demands
- o Creation of regional thematic clusters headed by a Chaebol



BALANCED ROLE BETWEEN THE R&D ACTORS

Universities perform ca. 10.1 % of Korea R&D

Researchers in South Korea attract the largest amounts of funding per capita from industry (on average USD 0.1 million/year), followed by academics in Singapore and The Netherlands.

25 Government research institutes perform 11.7 % of Korea R&D

Close link with large industrial groups

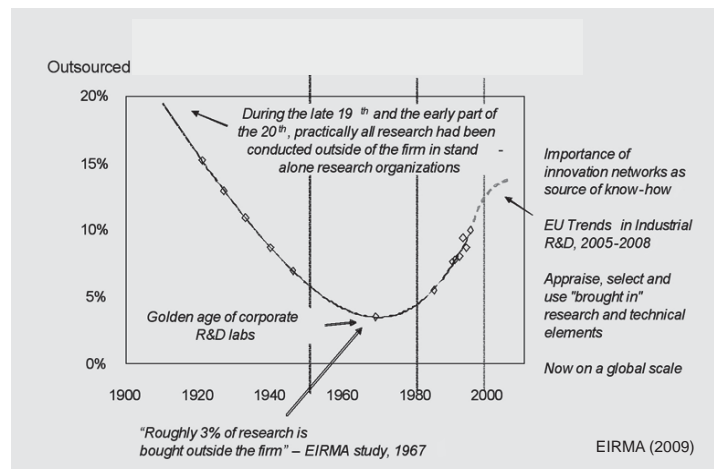
Private sector performs ca. 76.5 % of Korea R&D

The development of SMEs is a top priority for Korea.

Industry-academia research is highly encouraged and supported of up to 75 % of R&D cost.

OUTSOURCING INDUSTRIAL R&D

Nothing New!



OPEN INNOVATION IS MORE THAN OUTSOURCING

Open innovation → innovation ecosystem where ideas and knowledge flow freely across company walls, country boundaries, disciplines, etc.

- Open Innovation capitalizes on **relationships and networks**
 - Internal ideas - linked to the firm strategy
 - Innovations from others, e.g. universities, startups, crowdsourcing
- Performance is achieved through partnership → **Absorbing and using diverse knowledge generated outside.**



Boundaries between public and private, science and technology, university and industry are in flux

SUCCESSFUL RECIPE?

Basic Ingredients

- Working together, every day
- Mutually sharing expertise
- Making all the stakeholders partners
- Collaboration based on project
- Making use of industry resources (other than \$): technology, molecules, pilots

Key Catalysts

- Clear IP issues early on
- Professionalize technology transfer
- Administration/Government should be enablers not barriers: e.g. RWTH, Singapore

Organization

- Knowledge Triangle and Fraunhofer-Gesellschaft: powerful Public-Private models
- Catalyzing the innovation ecosystem □ Germany, Korea

Recent trends show that, as never before, Higher Education and Public Research are at the center of the innovation landscape

Séance V :
ÉCONOMIE ET AGRICULTURE

L'ÉTAT DES SCIENCES ÉCONOMIQUES : VERS UNE DISPARITION DE LA THÉORIE ÉCONOMIQUE ?

Pr. Jean CARTELIER

*Université Paris-Ouest, EconomiX
France*



Une façon relativement conventionnelle d'aborder l'état des sciences économiques est de considérer cette discipline comme une science à l'instar de la biologie ou de la physique (un exemple de cette position est Barbara Bergmann¹). Adoptant un tel point de vue on ne pourrait que se désoler qu'après plusieurs siècles de pratique et de débats, les économistes soient toujours dans l'incapacité (i) de faire des prévisions fiables (ii) de se mettre d'accord sur les propositions les plus fondamentales concernant le fonctionnement des économies modernes (iii) de dépasser les désaccords idéologiques ou philosophiques.

Ce triste état serait d'autant plus incompréhensible que de très nombreux économistes formés aux techniques quantitatives les plus avancées et aux raisonnements formels les plus sophistiqués ont produit une quantité formidable de travaux en tous genres, dont la diversité est un défi absolu pour quiconque se trouverait, comme moi aujourd'hui, devoir en rendre compte, même sommairement.

Mais ce n'est pas ce point de vue que je me propose d'adopter ici. La théorie économique, comme les autres disciplines attachées à comprendre nos sociétés (sociologie, psychologie sociale, anthropologie, etc.), relèvent d'une catégorie de savoir différente des sciences de la nature. Cela n'en fait cependant pas des connaissances de second ordre ; mais il faut garder présent à l'esprit que le rôle qu'elles jouent dans notre société est différent. Elles visent généralement à agir, voire à transformer leur objet – la société – autant que de le comprendre. Ceci leur confère un aspect *normatif* et *prescriptif* se retrouvant rarement dans les sciences de la nature à l'exception de la médecine et de la biologie. Du coup, *on peut considérer qu'elles font partie même de leur objet*, ce qui est une situation un peu

1- Voir références bibliographiques à la fin du texte

paradoxe. Elles sont en outre – mais ceci n’est-il pas lié à ce qui précède? – traversées par des courants doctrinaux que les travaux analytiques à vocation scientifique ne parviennent pas à réduire.

L’analyse économique, pour reprendre la distinction que fait Schumpeter entre doctrine et analyse, n’est qu’une partie du savoir économique et les positions doctrinales des uns et des autres peuvent être soit conformes soit en décalage important avec les propositions démontrées et, par ailleurs, non contestées de l’analyse, qu’elles soient négatives ou positives.

Je n’en donnerai que deux exemples importants.

La théorie de l’équilibre général – longtemps théorie de référence – établit deux théorèmes fondamentaux : d’une part, l’existence et, d’autre part, la Pareto-optimalité de l’équilibre général concurrentiel (dit théorème du bien-être). Toutefois, les théoriciens travaillant dans ce champ – et donc non opposés doctrinalement à l’esprit général de cette théorie – ont établi que la stabilité de l’équilibre général était impossible à prouver – ce qui devrait affaiblir le discours libéral quand il porte sur l’efficacité des règles du marché. Ce résultat négatif, pas davantage que la crise financière récente d’ailleurs, n’a affecté le moins du monde la diffusion de cette doctrine qui s’est même étendue pour des raisons qui échappent à la rationalité scientifique.

De même, d’autres théoriciens appartenant au même champ d’analyse ont montré qu’il n’était pas possible en général que les individus obtiennent de façon décentralisée leurs allocations d’équilibre – ce qui ruine le théorème du bien-être. Ce résultat négatif n’a pas eu, encore moins que le précédent, de conséquences sur les convictions libérales dominantes.

Il faut donc se résigner à considérer que le savoir analytique des sciences économiques a un rapport ambigu avec les convictions y compris de celle de la partie la plus éduquée de la population.

Le foisonnement des travaux empiriques et la diversification des recherches théoriques ont pu être interprétés comme une tentative de s’affranchir de ce qui était considéré par Arrow et d’autres comme des limites à la validité de la théorie de l’équilibre général concurrentiel. Mentionnons notamment les domaines suivants :

- Comportements stratégiques *versus* concurrentiels;
- Information incomplète et asymétrique *versus* information complète;
- Prises en considération des intermédiations et coûts de transactions;
- Atténuations diverses des hypothèses de rationalité.

Un survol, même rapide, des travaux théoriques et empiriques effectués au cours de ces vingt dernières années est impossible dans le cadre de cet exposé. D’autant plus qu’il conviendrait, pour mieux le comprendre, de prendre en compte les transformations de la profession d’économiste au sein du monde académique. C’est pourquoi j’aborderai l’état des sciences économiques aujourd’hui en soulignant les caractéristiques de son évolution récente qui conduisent à se demander si la science économique *en tant que telle* n’est pas menacée de disparition.

Trois traits semblent caractériser l'état des sciences économiques depuis une vingtaine d'années :

- <1> Affirmation sans cesse plus absolue d'une méthode, celle de *l'individualisme méthodologique* avec ses deux composantes principales : d'une part, la *rationalité des comportements individuels*, et, d'autre part, *l'équilibre comme mode de coordination des actions qui en résultent*, la première ayant fait l'objet de davantage de travaux et de discussions que la seconde, à tort semble-t-il. Le résultat est le recul des contestations venant tant de courants théoriques alternatifs (pensée économique classique ou keynésienne) que d'une réflexion critique interne à la pensée dominante et l'extension de cette méthode à d'autres sciences sociales.
- <2> Prédominance des travaux empiriques sur les travaux théoriques, une partie des premiers s'inscrivant dans une remise en cause de la figure de *l'homo oeconomicus* et de sa rationalité, une autre partie s'expliquant par un regain du positivisme et par l'extraordinaire essor des possibilités de traitement de l'information jointes aux perfectionnements remarquables apportés aux techniques économétriques.
- <3> Orientation sans cesse plus affirmée vers l'expertise et la prescription plutôt que l'explication et l'interprétation générale.

La combinaison de ces trois caractéristiques soulève la question de la spécificité de la théorie économique au sein des «sciences sociales», ou, dit plus brutalement, celle de son existence en tant que telle aujourd'hui.

I- La domination de l'individualisme méthodologique

Concernant la domination quasi-exclusive de l'individualisme méthodologique, deux points paraissent dignes d'être remarqués : ce sont d'une part la volonté de donner des *fondements micro-économiques* à toutes les propositions susceptibles d'être énoncées et, d'autre part, la *discussion critique des hypothèses faites sur le comportement des individus*.

Le désir de micro-fondements s'inscrit dans une critique de l'ancienne économie institutionnaliste qui accepte comme donné le cadre qui donne son sens aux actions des individus. L'exigence nouvelle est de rendre compte de ce cadre et d'en faire le résultat même des actions des individus. Un exemple remarquable concerne la *monnaie*. Au lieu de considérer comme Walras et l'ensemble de cette tradition que la monnaie existe et que la question principale est celle des conditions de sa *neutralité*, une école particulièrement dynamique s'est efforcée de montrer comment la monnaie est en fait choisie par les individus qui décident, en fonction de leur intérêt, de se coordonner sur cette technique de transaction plutôt que sur une autre (modèles de prospection (*search*) développés par Randall Wright et autres). Ces auteurs prétendent en tirer l'essence de la monnaie : *money is memory* tente de démontrer Kocherlakota en 1998. Mais cela ne va pas sans difficulté. La théorie moderne de la monnaie est écartelée, selon Wallace (2001) entre deux types de travaux que ne relie aucun pont : d'une part des modèles qui sont censés expliquer le fait que les transactions se déroulent en monnaie mais qui ne permettent pas d'énoncer des propositions intéressantes de politique monétaire, de l'autre des modèles ayant des caractéristiques inverses.

La volonté de justifier de façon microéconomique la macroéconomie semble avoir conduit à la disparition de cette dernière réduite à étudier un agent représentatif (à l'image du modèle dominant DGSE – *dynamic stochastic general equilibrium*), ce qui équivaut, entre autres, à vider de son sens la question de la coordination des individus (le Pr Taouil présente un exposé sur la macroéconomie, ce qui me dispense d'en dire davantage).

Plus généralement, cette tendance à la micro-fondation systématique, dont un effet est la multiplication des approches normatives dites *mechanism design*, se heurte à l'impossibilité de construire une économie à partir des seuls individus privés de toute socialisation. La question est, dès lors, quelle est la socialisation minimale à partir de laquelle il est possible de concevoir une société telle que les nôtres ? Cette question, qui pourrait être le point de départ d'une critique interne à la théorie dominante, n'est jamais évoquée à ma connaissance.

Un autre aspect de la préférence pour l'individualisme méthodologique est l'examen des hypothèses relatives aux comportements individuels, préoccupation bien naturelle dès lors qu'ils constituent la donnée première pour la théorie. C'est à l'occasion de ces interrogations diverses qu'apparaît la question des relations de l'économie aux autres disciplines sociales. La notion de rationalité est centrale ici, tout particulièrement l'hypothèse de maximisation de l'utilité (ou des profits). Le débat n'est pas clos et ne le sera sans doute jamais. D'un côté, on peut considérer que l'hypothèse de rationalité est heuristique et non descriptive (peut-on faire une théorie fondée sur l'individualisme méthodologique en supposant que les individus n'ont pas un comportement systématique et déterminé?). D'un autre côté, on peut également penser que l'on a besoin d'expliquer les comportements effectifs dont il semble que les études expérimentales et les observations empiriques montrent qu'il n'obéit pas à l'hypothèse de rationalité. Rappelons que Kahneman a obtenu le prix Nobel d'économie pour les travaux de psychologie expérimentale qui invalident largement l'hypothèse standard.

Mais l'individualisme méthodologique c'est aussi la façon dont les actions individuelles se coordonnent. Traditionnellement, les économistes dénomment «marché» la façon dont se combinent les actions des individus. L'hypothèse de concurrence parfaite, rappelons-le, est celle qui a permis d'établir les deux grands résultats de l'existence et de la Pareto-optimalité de l'équilibre général. L'abandon de cette hypothèse, jugée depuis longtemps nécessaire pour des raisons de réalisme entre autres, s'est traduit au cours des vingt dernières années par le recours généralisé à la théorie des jeux sous toutes ces formes. La théorie des jeux est devenue un des modes privilégiés du travail théorique. Cependant, en dépit des très nombreux résultats permis par la théorie des jeux – on pense notamment au *bargaining* bilatéral –, aucun résultat de portée aussi générale que ceux liés à l'hypothèse de concurrence parfaite n'a pu être établi.

Notons que, au-delà de la distinction entre diverses formes de concurrence, l'équilibre est la façon exclusive dont la théorie académique conçoit la coordination des individus. Il y a de bonnes (et de moins bonnes) raisons à cela. Le désir de montrer la détermination des grandeurs (prix, richesse, taux divers, etc.) en accord avec une acceptation unanime de chacun vis-à-vis de tous (critère de Nash) fait sans doute partie des bonnes raisons. Il n'en demeure pas moins que les économies de marché connaissent des situations variées dont il paraît peu raisonnable de les considérer comme des équilibres (crise de 1929 ou de

2007-2008 par exemple). Si les études de dynamique du déséquilibre ont longtemps fait croire que l'on pouvait s'accommoder de cette situation, les progrès importants dans ce domaine ont paradoxalement fait apparaître la fragilité des conclusions que l'on pouvait attendre de ces recherches. Il y a là, sans doute, une faiblesse de l'analyse économique, faiblesse que le caractère sophistiqué des modèles ne compense pas.

Cette faiblesse apparaît également dans la multiplicité des modèles d'équilibre partiel, méthode dont on semble oublier aujourd'hui qu'elle fut critiquée il y a bien longtemps déjà par Walras lui-même et par Sraffa (contre les approches d'inspiration marshallienne). Ces modèles sont notamment au cœur des travaux portant sur la régulation des marchés ou des professions. Les travaux de Jean Tirole, dernier prix Nobel, en sont un exemple notable.

Si l'on pense que l'état des sciences économiques est à rechercher dans les articles publiés dans les revues académiques considérées comme les meilleures, on constatera alors que la contestation du courant de pensée dominant a pratiquement disparu. Il y a là un effet sociologique évident – l'éviction des dissidents est justifiée par la domination des autres – mais pas seulement. Au cours des années 1960, à la suite de la publication des œuvres complètes de Ricardo et de *Production of Commodities by Means of Commodities* par Sraffa, un renouveau important de la pensée classique s'est produit. Ce courant ne s'est pas imposé, soit qu'il ait été combattu par les économistes standard par définition plus nombreux, soit que ses partisans n'aient pas réussi à convaincre de la fécondité de leurs travaux. Il en va de même du courant keynésien. Celui-ci est multiple. Mais la branche la mieux acceptée académiquement – on pense aux *New Keynesians* – se révèle n'être en fait qu'une variante de la pensée standard avec l'adjonction de quelques frictions et rigidités.

Si un renouvellement de l'analyse peut être souhaité, on discerne mal aujourd'hui ce qu'il pourrait être et comment il pourrait être accepté.

II- La préférence pour les recherches empiriques : dilution de l'économie dans les «sciences sociales» ou impérialisme de l'analyse économique ?

L'individualisme méthodologique, souverain en économie, a étendu son domaine aux disciplines voisines que sont la sociologie (voir *Handbook* 2013), la psychologie sociale et l'anthropologie. Associé à l'approche du choix rationnel, il a suffisamment triomphé pour ne plus avoir besoin de s'affirmer explicitement contre d'autres paradigmes presque totalement discrédités dans le monde académique de l'économie. Mais il a également tant pénétré les domaines voisins qu'un doute est permis concernant la spécificité de la théorie économique au regard des autres disciplines sociales.

Cette interrogation devient d'autant plus pertinente que, par ailleurs, la discussion, voire la contestation, de l'hypothèse de rationalité s'est appuyée sur de nombreuses réflexions et analyses venant de ces autres disciplines sociales concernées par l'individualisme méthodologique.

Est-ce cette incertitude sur l'existence d'un domaine propre à la théorie économique qui explique la préférence marquée pour les travaux empiriques, dont on peut se convaincre à la lecture des sommaires des grandes revues anglo-saxonnes, celles qui donnent le ton

en la matière? Est-ce l'apparition de techniques statistiques puissantes (dans les années 1970 il s'agissait de l'analyse des données, aujourd'hui des *big data analysis*) qui justifie cette tendance et donner l'illusion à certains que la théorie, qui requiert l'élaboration de modèles abstraits à partir d'hypothèses incertaines, peut être aisément remplacée par une exploitation intelligente et systématique des nombreuses banques de données disponibles? Toujours est-il que ces recherches empiriques prospèrent. Jérôme Gautié parle même en 2007 d'«impérialisme empirique». Le problème est qu'elles répondent souvent plus à des questions de fait (par exemple, l'étendue de telle ou telle discrimination à l'embauche, le niveau comparé des salaires selon la branche ou le type d'entreprise, quand ce n'est pas les déterminants de la criminalité ou le choix des prénoms) qu'à des questions de théorie économique proprement dites. Ces questions de fait, de plus en plus prisées, peuvent légitimement être revendiquées par les psychologues, sociologues et autres anthropologues comme appartenant à leurs domaines propres.

Elles peuvent l'être d'autant plus que le regain de l'attitude positiviste, qui voit dans l'induction et l'observation des faits la caractéristique même de la connaissance scientifique, concourt avec l'extension du paradigme du choix rationnel aux sciences sociales en général et à la sociologie en particulier à l'effacement des frontières entre les disciplines sociales.

On trouvera dans l'article de Jérôme Gautié (mentionné dans la bibliographie) une excellente mise au point sur la façon dont s'esquisse une «théorie générale des comportements et des interactions sociales». Les critiques sur la rationalité supposée de *l'homo oeconomicus* ne dessinent plus une frontière entre ce qui est en deçà et au-delà de l'économie parce que les travaux empiriques et expérimentaux qui soutiennent ces critiques peuvent aussi être considérés comme fournissant les matériaux pour une théorie générale de la société. Une telle théorie, à la différence de la théorie économique standard, serait édictée sur une base empirique solide qui lui conférerait une véritable scientificité. Au lieu d'un sujet économique étroit et déshumanisé, l'individu apparaîtrait comme un être social total pleinement humain. Encastré socialement, ses motivations pourraient être plus larges que l'appât du gain et l'intérêt personnel strictement entendu et, du même coup, la théorie prenant appui sur lui serait une théorie sociale générale.

Une telle attente peut-elle être comblée? On peut en douter dès lors que l'on considère le second élément de l'individualisme méthodologique rappelé plus haut, à savoir le mode de coordination des actions individuelles.

La théorie économique fondée sur l'individualisme méthodologique est aussi fondée sur la notion d'équilibre comme mode de coordination. Plus précisément, le grand mérite dont peut se prévaloir la théorie économique standard est de proposer une version claire et intelligible de l'interdépendance entre les actions individuelles. La notion d'équilibre général est ici essentielle et sans doute spécifique à la théorie économique. Que cette méthode puisse s'appliquer au marché ou à d'autres formes d'interrelations n'en fait pas pour autant un outil de la psychologie sociale ou de la sociologie. La notion d'équilibre, telle qu'elle est définie par le critère de Nash en théorie des jeux, semble bien appartenir en propre à la discipline particulière qui envisage les relations sociales sous l'angle des grandeurs, telles les prix, le taux de l'intérêt, la richesse, etc., c'est-à-dire à l'analyse économique. C'est à partir de leur capacité à utiliser l'outil puissant qu'est l'équilibre

général, que les économistes peuvent construire l'identité de leur discipline. Encore faudrait-il qu'ils n'y renoncent pas au profit d'études particulières sans inspiration théorique bien affirmée. Et qu'ils s'interrogent sur les fondements de leur discipline, ce qui est de moins en moins le cas.

S'interrogeraient-ils qu'ils pourraient noter le caractère paradoxal de leur postulat de base, à savoir l'existence d'un espace de biens donné *a priori* et supposé connaissance commune (le $R^I R^I$ de Debreu) dans lequel sont définis les individus rationnels, alors même que la pratique effective retient *la généralité du calcul monétaire* et de l'expression de l'activité économique au travers des *comptes des agents*. Ces postulats alternatifs, que sont l'unité de compte et l'expression comptable, sont caractéristiques de *l'approche monétaire*, dont la tradition remonte aux mercantilistes et à James Steuart, tradition illustrée à l'époque moderne par Schumpeter et Keynes, ce dernier étant bien différent de la caricature qui en est donnée aujourd'hui.

III- Expertise et prescription plutôt que représentation et explication : l'économiste comme ingénieur de la société?

L'impérialisme des sciences économiques, souvent dénoncé mais généralement accepté, tient à la fois à une question de méthode (généralisation de la problématique du choix rationnel à tous les domaines de la société, y compris le crime et la violence, équilibre général pour penser les interdépendances entre les individus) et à un fait contingent : les économistes sont généralement mieux formés à l'usage des techniques quantitatives poussées que ne le sont les sociologues, psychologues et autres anthropologues. Dans un tel contexte, les économistes se conçoivent plus comme des ingénieurs chargés d'améliorer ce qui peut l'être que comme des philosophes sociaux rationnels, ce qu'ils ont été longtemps sans le dire.

- <1> L'implantation solide de l'approche *mechanism design* dont l'objet n'est pas de rendre compte de la façon dont nos économies fonctionnent mais plutôt de la façon dont il serait souhaitable qu'elles fonctionnassent, a renforcé l'aspect normatif de la discipline ; même s'il n'est pas toujours possible de séparer dans certains travaux les deux aspects – ce qui leur donne un petit côté Dr Pangloss : tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes – l'objet général est de remédier aux défauts de fonctionnement des marchés en instaurant des mécanismes incitatifs adaptés. La régulation des marchés est devenue une préoccupation importante des théoriciens dans le prolongement de la théorie des incitations. La traduction de ce mouvement d'idées dans le monde réel est la multiplication des instances dites «indépendantes» chargées de mettre en œuvre des principes de régulation : dans la finance on peut citer les critères de Bâle (I, II et III) ainsi que les multiples secteurs régulés par des agences diverses : télécommunications, réseau de transport, etc.
- <2> La spécialisation sans cesse plus poussée des chercheurs les a conduits à devenir davantage des experts d'un domaine limité que des penseurs de la société dans son ensemble. L'organisation même du monde académique et les conditions de financement de la recherche par contrats et projets ont largement contribué à cette orientation ainsi que les besoins des entreprises et des décideurs.

- <3> On pourrait se réjouir de ce que les économistes se révèlent utiles socialement si ne se faisait jour une mauvaise pensée, à savoir que les travaux économiques ainsi commandés sont davantage utilisés pour leur capacité de persuasion rhétorique que pour la connaissance objective et scientifique qu'ils apportent.

Une illustration de ces tendances peut être trouvée dans le bourgeonnement de la réflexion sur la finance qui a marqué l'économie mondiale depuis les années 1980, en liaison avec ce qui s'est passé dans la réalité. L'interaction entre les travaux, tant théoriques qu'empiriques, et les activités économiques est tout à fait remarquable comme l'est la contradiction qui se fait jour entre l'inspiration libérale de la majorité de ces travaux et des prescriptions qui en découlent et la multiplication des règlements et directives qui encadrent les activités financières.

Trois courants de recherches ont convergé au cours de ces dernières années en liaison avec le développement considérable de la finance dans l'économie mondiale : ce sont des travaux empiriques, la modélisation des variations des cours de bourse (mouvements browniens) et l'évaluation financière (flux futurs actualisés) joints à la théorie de l'équilibre général. Cette convergence s'est faite grâce à un instrument mathématique (les martingales) sous la notion de *Fair Market Value* et d'efficacité informationnelle des marchés (voir Christian Walter pour un exposé synthétique).

Ce sont ces travaux qui fondent les prescriptions de la BRI et de diverses instances internationales en matière de normes et de règles à respecter par les institutions financières (divers ratios de Bâle I, II et III, etc.). Les conceptions en matière de risque, des praticiens comme de beaucoup d'universitaires, reposent sur ces divers travaux. On a ici une situation idéale, du point de vue des économistes académiques : la théorie la plus abstraite rejoint la pratique la plus professionnelle et lui fournit les prescriptions lui garantissant qu'elle se déroule dans l'intérêt de tous.

L'adhésion à cette vision du risque a sans doute l'efficacité que Keynes prêtait aux conventions, à savoir fournir une justification aux comportements vis-à-vis du futur. On peut néanmoins se demander si l'on n'atteint pas là les limites de l'exercice. La crise financière récente a montré les failles de la régulation établie sur une telle base et il ne semble pas que la convention en question ait été remise en cause. On a pu montrer, par exemple, que les prescriptions en matière de solvabilité, qui reposent sur une hypothèse probabiliste assez précise (caractère gaussien du risque), pouvaient conduire à renforcer l'instabilité dans le cas où les aléas relèvent d'autres lois de probabilité.

La préférence pour les règles plutôt que pour le caractère discrétionnaire des interventions, typique des convictions libérales, se révèle ne pas être sans danger, d'autant plus que maints professionnels sont convaincus qu'ils sauraient mieux affronter les risques en l'absence des règles. Paradoxe du libéralisme et/ou limite de l'analyse économique? La question ne paraît pas simple à élucider.

Références

- Bergmann Barbara, «The Current State of Economics: Needs Lots of Work», *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, vol. 600, The Use and Usefulness of the Social Sciences: Achievements, Disappointments and Promise (July 2005, pp. 52-67).
- Gautié Jérôme, «L'économie à ses frontières (sociologie, psychologie)» Quelques pistes, *Revue économique*, 2007/4 Vol. 58, p. 927-939.
- *Handbook of Rational Choice Social Research*, (2013), edited by R. Wittek, T. Smijders and V. Nee, Stanford University Press.
- Kahneman D., «A Psychological Perspective on Economics», *American Economic Review*, 2003, 93 (2), p. 162-168.
- Kahneman D. & Tversky A., «Prospect Theory: an Analysis of Decisions under Risk», *Econometrica*, 1979, 47 (2), p. 313-327.
- Kiyotaki, Nobuhiro & Wright, Randall, (1993), "A Search-Theoretic Approach to Monetary Economics", *The American Review*, (83), 1, 63-77.
- Kocherlakota, Narayana, R., (1998a), "Money is Memory", *Journal of Economic Theory*, 81, 232-251.
- Wallace, Neil, (2001), "Whither monetary economics?", *International Economic Review*, 42, 4, 847-869.
- Walter, Christian, (2010), "IAS 39 et la martingalisation des marchés financiers" in *Nouvelles normes financières*, sous la direction de Christian Walter, Springer Verlag.

LE NOUVEAU CONSENSUS MACROÉCONOMIQUE : L'UNIFICATION PAR LA DISCIPLINE DE L'ÉQUILIBRE

Pr. Redouane TAOUIL

Université Grenoble Alpes, France

*Membre Correspondant de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques*



Résumé :

Si la dernière décennie du XXe siècle a été marquée par une vive rivalité entre la nouvelle économie keynésienne et la nouvelle économie classique, les années 2000 ont vu la consécration d'une large convergence placée aujourd'hui sous le terme de nouveau consensus macroéconomique. Cette convergence se prête à l'approche en termes d'unification des théories de Ph. Kitcher. La discipline de l'équilibre y tient, en effet, lieu de schéma de dérivation dont la vocation est d'inférer la formation et les propriétés des équilibres. En étendant ce schéma au traitement de la concurrence imparfaite et des rigidités, le nouveau consensus macroéconomique débouche, en effet, sur un modèle canonique en termes d'équilibre général dynamique qui procède à une réécriture de la fonction de demande agrégée et de l'équation de Phillips et à la définition d'une règle de politique monétaire optimale. Cette unification permet au nouveau consensus macroéconomique d'élargir sa base argumentaire en créant de nouveaux objets et propositions. Elle rencontre cependant une limite majeure qui tient à l'exclusion de la monnaie y compris dans la conception de la politique monétaire.

Mots clés : nouveau consensus macroéconomique, unification, équilibre général dynamique.

The new macroeconomic consensus: unification by equilibrium discipline

Abstract : While the last decade of the 20th century was marked by a deep rivalry between the New Keynesian Economy and the New Classical Economy, the 2000s witnessed a wide convergence placed, today, under the term “new macroeconomic consensus.” This convergence can be analyzed in terms of a unification of the theories of Kitcher. The equilibrium discipline, in fact, is a way of derivation pattern from which the vocation is to deduce the formation and the properties of the equilibrium. By enlarging this schema to include imperfect competition and of rigidities, the new macroeconomic result, proceeds to rewrite the function of aggregated demand and the Phillips Equation and to define a rule of optimal monetary policy under a canonical dynamic general equilibrium model. This unification allows the new macroeconomic consensus to widen its explanatory store by creating new objects and proposals. This, however, meets major limitation, which does not allow for the integration of money and of the conception of monetary policy.

Keywords : The new macroeconomic consensus, unification, dynamic general equilibrium

JEL : E32, E 35

«La science avance, un enterrement à la fois» affirme non sans regret l’illustre figure de la physique quantique, Max Planck. La macroéconomie n’est pas avare de tels propos. En 1980, R. Lucas annonce, dans une oraison ironique, la mort de l’économie keynésienne. Deux décennies après, les auteurs du modèle BMW (Bofinger P. Mayer E., Wollmershauser T., 2003), chantent, variations sur l’économie fermée et sur l’économie ouverte à l’appui, un *requiem* pour IS-LM. En 2008, à la veille de la crise financière internationale, O. Blanchard considère que «*State of macroeconomics is good*» du fait qu’un nouveau consensus macroéconomique vient succéder à ce défunt modèle (2009).

Ce consensus s’est affirmé sous les auspices d’une tradition de recherche dont l’objet est l’analyse des rigidités nominales, des imperfections de marché et de la viabilité de la politique monétaire dans le cadre d’une approche d’équilibre général dynamique à fondements microéconomiques. Grâce à ses multiples emprunts à la nouvelle classique, il donne à la macroéconomie l’image d’un référentiel largement partagé dans le domaine de recherche comme dans les Banques centrales¹. Si ce consensus est fortement reconnu, il ne fait guère l’objet d’interrogations dans les termes de la problématique de l’unité et la pluralité des théories scientifiques². L’approche de l’unification promue par Philip Kitcher peut être sollicitée **à cet égard** en vue d’éclairer les enjeux de la dynamique de la macroéconomie.

1- «En surface, l’histoire de la macroéconomie -souligne- O. Blanchard- apparaît comme une succession de batailles, de révolutions et de contre-révolutions (...). Il s’agit d’une image erronée. La vision correcte est celle d’une accumulation étonnamment régulière de connaissances» (O. Blanchard, 2000, p. 1).

2- Pour une synthèse critique sur le débat épistémologique concernant ce sujet, on peut se reporter avec profit à S. Ruphy (2013). Cet ouvrage développe des thèses stimulantes sur la réduction et les formes de pluralité dans les sciences.

L'unification opérée par ce nouveau consensus s'incarne dans un modèle canonique DSGE (*dynamic stochastic general equilibrium*) qui met l'accent sur la dimension intertemporelle des comportements des agents et la composante stochastique des formes structurelles, en procédant à une réécriture des fonctions de demande agrégée et d'offre agrégée et à la formulation d'une règle de politique monétaire. Ce modèle combine un schéma de dérivation fondé sur l'explication par l'équilibre et des procédures de réduction selon le réquisit des micro-fondements. La formation rationnelle des anticipations, l'interdépendance des marchés, les règles de crédibilité monétaire et de discipline budgétaire comme le défaut d'ajustement des prix et les pouvoirs de marché des entreprises sont autant de composants de la base argumentaire. Cette perspective d'unification conduit à incorporer dans le champ de la macroéconomie dominante de nouveaux objets et arguments. Elle est cependant sujette à caution en ce qu'elle implique l'élimination de la monnaie suite au primat de la rationalité optimisatrice des agents et à la réduction par la microéconomie.

A- Convergence, schéma de dérivation et réduction

Le questionnement de l'impact des rigidités sur les cycles et l'efficacité de la politique monétaire, a ouvert la voie à l'émergence d'un agenda de recherche qui s'efforce d'estomper le clivage entre la nouvelle économie keynésienne et la nouvelle économie classique. L'ambition de cet agenda est de construire une grille théorique qui conjugue l'étude des rigidités nominales et des imperfections concurrentielles sous la double égide de la rationalité optimisatrice et de la formation rationnelle des anticipations en vue de décrire les fluctuations cycliques et les conditions d'exercice de la politique économique. Les analyses développées dans cette optique sont baptisées dans des termes qui traduisent la visée d'une unification de la macroéconomie³. «Nouvelle synthèse néoclassique» (Goodfriend M. et King R.; 1997), «nouvelle synthèse néo-keynésienne» (Clarida R., J. et Gertler M. (1999), «nouveau consensus monétaire» (Mishkin F., 2008) «nouveau consensus macroéconomique» (Mc Callum B. et Nelson E., 1999), «nouvelle macroéconomie monétaire» (Walch C., 1998) ou encore «convergence» (Blanchard O., 2008; Woodford M., 2008) sont autant de vocables utilisés par ces analyses pour traduire l'accord sur la démarche et la nature du projet poursuivi. D'abord, le nouveau consensus s'appuie, à l'instar de la théorie des cycles réels, sur la démarche de l'équilibre général dynamique et stochastique, en examinant les choix intertemporels des agents dans un environnement incertain (F. Kydland et Prescott E., 1982). Elle s'attache, à l'aide de modèles conçus selon cette démarche, à voir, d'une part, comment les réactions des agents face à des perturbations se manifestent dans des réponses qui conduisent à des frictions de marché, et d'autre part, à identifier l'impact des politiques monétaires sur le bien-être social dans un horizon dynamique. En incorporant l'interdépendance des différentes variables dans le cadre d'une détermination simultanée, le nouveau consensus macroéconomique consacre le principe de l'équilibre général comme impératif de base reléguant ainsi au second plan le principe d'équilibre partiel caractéristique de la nouvelle économie keynésienne dans les diverses versions de chômage involontaire, de rationnement de crédit ou de rigidités sur le marché des produits. Ensuite, Les tenants de la *New Synthesis* affirment en forme de *leitmotiv*, pour marquer leur convergence avec

3- Ce projet, qui consiste en la construction d'un modèle central de référence alternatif à IS/LM, est assimilé par J-P. Danthine (1998) à la quête du Graal.

la nouvelle économie classique, que leurs modèles échappent à la critique de Lucas⁴. Ainsi ils accordent un rôle crucial à la formation rationnelle des anticipations dans la détermination des règles de décision individuelles en montrant comment les agents définissent leur plans optimaux, sur la base de l'ensemble informationnel disponible sur leur environnement. Cet angle d'analyse, qui est tenu pour une voie de passage obligée à la spécification du comportement agrégé, participe de l'ancrage microéconomique de la macroéconomie dans le contexte d'imperfection de la concurrence et d'ajustement incomplet des prix (Taouil R., 2013). Enfin, dans le sillage de la conception de la politique économique comme un jeu stratégique, le nouveau consensus représente le comportement de la banque centrale à travers une règle de politique optimale. Cette règle reflète la trajectoire du taux d'intérêt qui minimise la perte de bien-être social sous les contraintes de l'économie. L'introduction explicite de micro-fondements en respect des différentes conditions d'équilibre sur des marchés sujets à des distorsions est vue comme un apport majeur à la science de la politique monétaire (Clarida R., Jordi G. et M. Gertler, 1999); M. Woodford M., 2003; Mishkin F., 2009).

Ces ingrédients constitutifs du nouveau consensus macroéconomique expliquent la conclusion du diagnostic d'O. Blanchard: «La macroéconomie [...] connaît un large mouvement de convergence à la fois de vision et de méthode» (2009, p.33). Mise en valeur dans ces termes, cette conclusion pose la question de l'unité de la macroéconomie aujourd'hui et, partant, celle de l'évolution du noyau d'objets, de l'affirmation d'une méthode fondée sur la réduction interthéorique⁵ et la formation d'une synthèse à caractère cumulatif (Walliser B., 2011). L'approche de Kitcher (1989, 1993), qui est tenue pour une contribution emblématique au débat sur l'unité et la pluralité des sciences, offre à cet égard un cadre approprié sous bien des aspects⁶.

4- Cette critique, qui a imposé à la macroéconomie un défi lourd de conséquences, disqualifie sans appel l'estimation des paramètres à partir de l'observation des comportements passés. Ces paramètres sont censés se modifier sous l'effet des politiques économiques. En ce sens, les modèles macro-économétriques ne sont pas pertinents en ce qu'ils établissent des équations des comportements des agents à l'aide de paramètres structurels alors que ces comportements dépendent des programmes du décideur public.

5- Le pionnier majeur de cette problématique qui est étroitement liée aux fondements et la diversité des disciplines scientifiques est Ernest Nagel (1961). Selon lui la réduction est une opération qui consiste à dévoiler les connexions entre théories et mettre en exergue leur unité fondamentale. Réduire une théorie T2 à une théorie T1 revient à inférer, par le biais de principes ponts, les énoncés de celle-là à partir de ceux de celle-ci. Ces principes de liaison doivent assurer que les phénomènes expliqués par la théorie réduite le soient également dans un langage commun par la théorie en charge de la réduction.

6- Cette formulation, qui occupe une place de choix dans l'unification des explications s'attache à affiner des aspects essentiels du modèle déductif nomologique de Hempel (1992) en insistant sur la condition de systématisme des énoncés. Elle privilégie cependant les explications formées d'arguments déductivement établis. Ce style, qui repose sur une classification des arguments selon leur place dans les enchaînements des raisonnements, vise à produire des énoncés argumentatifs différents des énoncés nomologiques. Il diffère également du modèle explicatif proposé par Salmon dont l'objet est de caractériser la structure causale et les interactions caractéristiques d'un domaine donné. Pour Kitcher la causalité tire sa signification de la confirmation du caractère fructueux des schémas argumentatifs. Dans ce contexte, le progrès explicatif se produit suite à l'affinement de la systématisation et à l'incorporation dans la base argumentaire de schémas déclarés adéquats.

Dans cette analyse, l'unification recouvre l'aptitude de rendre compte d'une large classe de phénomènes à l'aide d'une grille d'analyse ordonnée par un petit nombre de concepts et d'hypothèses. Comme telle, elle se caractérise par un triple trait. D'abord, elle est inséparable de l'explication comme procédure guidée par la parcimonie en termes de principes et concepts théoriques. Ensuite, elle accorde une importance primordiale à la dynamique des théories dans le repérage de leurs différences des similitudes. A cet effet, elle prend en considération leurs divisions internes liées au langage comme aux propositions en les examinant sous le double registre de la compétition et du consensus. La diversité dans la définition des objets et du style d'analyse ne constitue pas un écueil à la confrontation des théories et à l'émergence d'accords en mesure de dissiper les fragmentations, de renforcer les concordances et aboutit, par l'intermédiaire d'inférences explicatives, à la consécration de constituants stables de théories englobantes. Enfin, l'unification participe au progrès explicatif : outre qu'elle permet l'extension du champ d'application du schéma de dérivation, elle fournit des critères d'arbitrage en cas de divergence et d'appui à la pertinence analytique des arguments.

«La science - affirme Kitcher - nous aide à avancer la compréhension de la nature en soulignant comment dériver la description de nombreux phénomènes et en utilisant encore et toujours les mêmes schémas de dérivation. Ce faisant, elle nous apprend comment réduire le nombre de types de faits que nous devons accepter comme ultimes (ou bruts)» (1989, p.432).

L'idéal d'unification consiste à forger, selon une argumentation interdépendante un ensemble d'énoncés cohérents et systématiques. La valeur des arguments est tributaire de leur capacité à instancier un schéma explicatif susceptible de donner une formulation nette au contenu des thèses et de former une base appropriée à la dérivation des énoncés. Pareille base doit satisfaire aux critères d'homogénéité, de rigueur et d'interdépendance pour servir dans les procédures d'unification. La réduction est par construction solidaire de l'unification tant il s'agit de développer la capacité explicative d'une théorie à partir d'un nombre réduit et varié d'arguments. Elle implique non seulement l'inclusion de la classe des phénomènes et du lot d'objets de la théorie réduite dans le domaine de la théorie réductrice mais aussi les schémas argumentatifs au moyen de la mise en relation des vocabulaires et des lois adéquates aux conditions d'inférence logique. Conçue comme vecteur de parcimonie au service de l'unification, la réduction implique le consensus sur les faits ultimes. La mécanique newtonienne en est un exemple typique. Elle représente une avancée en ce sens en ce qu'elle intègre des régularités issues de la loi de Kepler sur le mouvement des planètes autour du Soleil et la loi galiléenne de la chute des corps. Une autre illustration est donnée par la théorie de Maxwell qui procède à la jonction des forces électriques et magnétiques.

L'approche kitchérienne débouche sur la conclusion que les pratiques de consensus jouent un rôle prépondérant dans l'unification à travers les choix de langage, de jeu de questions maîtresses, des types d'explication, les schémas argumentatifs, des exemplifications et les critères d'autojustification et de contrôle. L'application de cette analyse à la macroéconomie est de nature à explorer les connexions entre la nouvelle économie classique et la nouvelle économie keynésienne sur la base de rattachement au schéma de dérivation par la discipline de l'équilibre. «La pratique du consensus -souligne Kitcher- est érotétiquement bien fondée. Les questions jugées pertinentes le sont en réalité du fait

de leur appartenance à son propre schéma» (2001, p.163). L'examen des rigidités et des imperfections par le nouveau consensus macroéconomique porte en effet sur des questions intrinsèquement significatives dans la mesure où il sollicite la référence à cette discipline. Dans le même temps, le privilège octroyé à la rationalité individuelle comme passage obligé à l'identification des configurations macroéconomiques, implique une unification par la réduction à la microéconomie qui conduit, d'une part, à l'appréhension des macro-variables dans les termes de l'analyse des comportements individuels et d'autre part, à inférer des propriétés au niveau supérieur à partir de celles des agents.

A en juger par le schéma de dérivation, les modèles DGSE du nouveau consensus macroéconomique porte l'empreinte de la discipline de l'équilibre telle qu'elle a été prônée par R. Lucas (1987)⁷ et instituée par la théorie des cycles réels (Kehoe T. et Prescott E., 1994). Cette discipline stipule que deux normes doivent commander la construction théorique en macroéconomie: le comportement optimisateur sous contrainte et l'apurement permanent des marchés⁸. Ces normes, qui doivent être placées à l'abri de toute mise à l'épreuve, sont tenues pour des postulats à valeur heuristique. L'équilibre, qu'elles impliquent, recouvre, au-delà de la compatibilité entre les plans d'offre et de demande des agents, la cohérence de décisions rationnellement formées dans un environnement de marchés à prix flexibles qui est dynamique et stochastique. Cette extension de la rationalité à la formation des prévisions participe d'une démarche qui conçoit l'équilibre sous la propriété essentielle d'un ajustement instantané des marchés présents et futurs sous l'effet d'anticipations rationnelles à un aléa exogène prés. Cette primauté de la rationalité individuelle conduit la discipline de l'équilibre à admettre que les prix se forment sur les marchés suite à l'interaction des décisions des agents sans s'interroger sur les procédures de cette formation à partir des données de technologie, de préférences et de ressources (Cartelier J., 2001). De ce fait, l'apurement des marchés autant que le comportement optimisateur sont des fictions qui servent d'instrument d'analyse prédictive au sein d'une structure de langage donnée. Cette conception implique que l'équilibre n'est pas un cas-limite auquel se mesurent les configurations empiriques de dysfonctionnement⁹, mais une hypothèse qui n'a aucun référent dans la réalité en ce qu'elle ne postule pas l'existence objective de marchés parfaits.

Ainsi définie, la discipline d'équilibre fournit le référentiel au sein duquel la macroéconomie doit formuler ses propositions théoriques. En procédant à un traitement des rigidités et des imperfections de marché selon la norme de rationalité optimisatrice, le nouveau consensus macroéconomique élargit le champ d'explication de cette discipline. Celle-ci a, dès lors, la vocation de saisir la déclinaison de l'équilibre des marchés sous

7- Figure centrale de la nouvelle économie classique, Lucas est largement considéré comme «l'architecte de la macroéconomie moderne» (Chari V., 1998). Son adoption systématique de l'hypothèse des anticipations rationnelles à l'encontre de celle des anticipations adaptatives, son analyse du cycle d'équilibre en termes d'impulsion et de propagation, la critique éponyme et sa proposition d'inefficacité de la politique économique systématique comme sa méthode des modèles sont autant d'ingrédients de l'unification de la macroéconomie..

8- Les principaux traits de cette méthode sont exposés in R. Lucas et T. Sargent (1979) (Miller P. (ed., 1994).

9- Pour une discussion des diverses conceptions d'équilibre qui éclairent le concept d'équilibre à anticipations rationnelles, on peut se reporter avec profit à P. Franc (1997).

deux figures: selon les hypothèses sur les agents, les biens et les prix, les marchés peuvent assurer la satisfaction de toutes les offres et les demandes ou se clôturer avec des disparités d'offre et de demande. L'apurement des transactions par les prix ou par les quantités décrit bel et bien des équilibres de marché où les résultats des actions des agents sont conformes à leurs anticipations de sorte qu'ils ne révisent pas les plans de leurs opérations sur les biens eu égard à leurs contraintes. Sur cette base, la nouvelle synthèse fait usage d'une démarche par différence qui consiste à spécifier les rigidités et les frictions de marché sur la base d'écarts à l'équilibre par ajustement immédiat des prix. Le concept de coût de menu, construit en vue de décrire les rigidités, est défini en rapport avec l'hypothèse de flexibilité des prix. Celle-ci constitue une référence qui permet d'expliquer la quasi-rationalité comme l'expression d'un écart vis-à-vis du comportement optimisateur en l'absence de coûts d'ajustement des prix. L'introduction du pouvoir de marché n'est également intelligible qu'en contraste avec l'hypothèse de *price taker* fondatrice de la concurrence parfaite: l'application du *mark up* en concurrence monopolistique implique que le rapport de marge du prix sur le coût marginal est une constante supérieure à l'unité en vertu de l'hypothèse de constance de l'élasticité de la demande adressée à chaque firme.

L'effet conjugué des imperfections concurrentielles et de rigidités ainsi définies est vu comme le reflet d'altérations de marché contraignantes à court terme; à long terme le marché retrouve sa force régulatrice. Cette inclusion des frictions en négatif par rapport à une économie parfaitement concurrentielle conduit à saisir les équilibres macroéconomiques comme déviations à l'optimum parétien associé au principe de *market clearing*. L'adhésion du nouveau consensus macroéconomique au premier théorème de bien-être conformément aux normes de la discipline de l'équilibre implique, d'une part, que la sous-optimalité est un corollaire des frictions de marché, et d'autre part, que l'efficacité peut être atteinte par une politique économique qui tient à atténuer l'impact de ces frictions. En analysant ainsi les frictions, la nouvelle synthèse adopte l'optique d'impulsion-propagation dans l'étude des fluctuations cycliques et de la politique économique. Cette autre filiation avec la théorie des cycles réels se manifeste dans l'examen de l'origine des chocs de nature réelle ou monétaire et de leur diffusion à travers les réactions optimales des agents à ces chocs. Les allocations des agents sont continuellement optimales de sorte que l'économie est à l'équilibre à court terme et à long terme. Le comportement macroéconomique est de ce fait nécessairement optimal au cours de l'ajustement vers l'état stationnaire. Le traitement des frictions dans ce cadre dissocie entre une composante de long terme, déterminée par les données structurelles, et une composante tributaire de la vitesse d'ajustement des variables. Les variables d'équilibre de long terme sont définies sous l'hypothèse de la pureté des ajustements concurrentiels et les cycles sont le résultat de fluctuations autour d'un sentier de croissance régi par un équilibre continu des marchés.

Le nouveau consensus associe ce schéma de dérivation à une démarche réductive qui consiste à ramener les enjeux de la problématique macroéconomique à ceux de la microéconomie. Au moyen de la fiction de l'agent représentatif, ce réquisit place les choix des agents comme préalable à la dérivation de la structure de l'économie et de sa dynamique cyclique incorporant ainsi les préceptes de la critique de Lucas¹⁰.

10- Cette critique, qui a imposé à la macroéconomie un défi lourd de conséquences, tient l'hypothèse de la stabilité des paramètres retenue par la tradition de l'économétrie structurelle, pour une faille

À cet égard, le modélisateur doit recourir à des normes d'analyse assises sur des fictions en considérant que le principe de maximisation de fonction- objectifs doit être appliqué comme si les agents s'y conforment dans leur processus décisionnel: «Souligner – affirme Lucas- que la théorie économique repose sur une vision superficielle du comportement individuel et social ne paraît pas pertinent. Je pense que c'est précisément cette superficialité qui confère à la théorie la puissante capacité qu'elle a à prédire les comportements humains sans savoir grand-chose sur les propriétés et les vies des individus dont on cherche à comprendre les décisions» (1987, p.247).

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 conséquences¹¹. Dotée de cette vocation, 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 décideur de la politique économique.

Sous cet angle, le nouveau consensus macroéconomique se rattache à l'approche par la fiction de la théorie physique du «comme si» dont la démarche se résume par deux procédures (Schaeffer J-M., 1999). D'une part, elle envisage des fictions dont l'objet est d'imaginer des configurations idéales, en dehors de considérations d'adéquation empirique, en vue d'opérer des prédictions quantifiées à partir du langage de la théorie (Cartwright N., 1983). D'autre part, elle se livre à des simulations destinées à identifier les possibilités de situations irréelles ou artificielles. Ces expériences de pensée permettent d'explorer les conséquences des fictions et d'imiter des comportements des économies et de s'interroger sur la validité de la théorie.

Sous le primat de l'agent représentatif sur le comportement agrégé, le nouveau consensus propose une grille explicative centrée, dans sa forme réduite, sur trois équations.

B- La structure englobante de l'équilibre général dynamique

En se situant dans la perspective ouverte par la nouvelle économie classique, la *New Synthesis*, offre une traduction formelle de son cadre d'analyse dans des modèles DSGE (*dynamic stochastic general equilibrium*) qui s'identifient comme des réécritures des fonctions de demande et d'offre globales à fondements microéconomiques sous les hypothèses de concurrence imparfaite et de rigidités. La structure de base de ces modèles, destinés à spécifier le comportement optimal des autorités monétaires, peut être définie à l'aide d'une version en termes de relations agrégées qui exhibe la représentation théorique d'ensemble. Cette version comprend une équation de demande qui s'écrit:

majeure de l'évaluation de politiques économiques alternatives.

11- En défense de l'irréalisme des hypothèses, C. Azariadis affirme, dans la lignée de Lucas, que «la physique moderne, en particulier la physique atomique repose sur des hypothèses concernant les particules qui sont étranges. La plus large part de la mécanique classique dérive de l'hypothèse selon laquelle les particules minimisent l'intégrale de leur énergie. On doute fort que les particules soient en mesure de minimiser quoi que ce soit. Un tel principe d'analyse s'avère cependant efficace: il est un instrument robuste qui permet d'établir des connaissances à partir de peu d'hypothèses» (Usabiaga Ibáñez C. (ed.), 2002, p. 43).

$$y_t = E_t y_{t+1} - \varphi [i_t - E_t \pi_{t+1}] + g_t \quad (1)$$

y_t et $E_t y_{t+1}$ sont respectivement l'écart de la production à la période t et à la période $t+1$, E_t est l'opérateur d'anticipations, $E_t \pi_{t+1}$ est l'anticipation d'inflation à la période $t+1$, i_t le taux d'intérêt nominal; g_t un aléa de demande qui obéit à un processus autorégressif d'ordre un:

$$g_t = \mu g_{t-1} + \widehat{g}_t \quad (2)$$

où $\mu \geq 0$ et g_t est de moyenne nulle et de variance finie.

Cette équation, inférée à partir de la maximisation de la valeur présente de la fonction d'utilité intertemporelle du ménage représentatif, exprime l'influence des anticipations des variables futures sur la demande courante à travers la dynamique du taux d'intérêt, de l'inflation, de l'écart de production et du choc.

Le taux d'intérêt réel, dont le paramètre φ mesure la substitution intertemporelle entre consommation et épargne, agit négativement sur la demande. L'écart de production agit, quant à lui, positivement sur cette variable : les ménages accroissent la consommation présente en prévision de la consommation future.

En itérant l'équation (1), on obtient cette expression qui montre que les anticipations de l'activité future affectent l'activité courante :

$$y_t = E_t \sum_{i=0}^{\infty} \{-\varphi [i_{t+i} - E_t \pi_{t+1+i}] + g_{t+i}\} \quad (1')$$

Bien que baptisée IS, l'équation de demande agrégée n'intègre pas l'investissement du fait de sa dérivation à partir d'une fonction d'utilité dont les arguments sont les consommations présentes et futures.

La fonction d'offre globale est donnée par :

$$\pi_t = \lambda y_t + \beta E_t \pi_{t+1} + u_t \quad (3)$$

π_t est l'inflation à la période t et u_t un terme de perturbation similaire à l'aléa de demande :

$$u_t = \rho u_{t-1} + \widehat{u}_t \quad (4)$$

avec $\rho \leq 1$

Cette relation, qui est également déduite de l'analyse des décisions de prix de la firme représentative, est une reformulation de la courbe de Phillips dans une optique prospective (*forward looking*) qui fait dépendre positivement l'inflation présente de l'inflation future, de la demande et du choc sur les coûts de production. En tant que mesure de la sensibilité de l'inflation à l'output gap, λ exprime la vitesse d'ajustement des prix à la variation de la demande. À intégrer l'équation (3) on obtient :

$$\pi_t = E_t \sum_{i=0}^{\infty} \beta^i [\lambda y_{t+i} + u_{t+i}] \quad (3')$$

L'inflation dépend ainsi de la demande présente et future mesurée par l'écart de production et les chocs.

Le comportement des autorités monétaires est décrit à partir d'un programme de décision dont la fonction objectif est donnée par :

$$\text{Min } \frac{1}{2} E_t \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t [\alpha y_{t+i}^2 + \pi_{t+1}^2] \right\} \quad (5)$$

Cette fonction de perte de bien-être social de forme quadratique considère que le produit désiré est égal au produit naturel et que l'inflation désirée est nulle. α mesure la pondération accordée aux déviations d'activité par rapport l'inflation.

Ainsi définies, les préférences de la Banque centrale impliquent que les variables objectif dépendent aussi bien de la politique monétaire actuelle que des anticipations quant à son évolution future. Le choix optimal du sentier de la variable instrument, le taux d'intérêt nominal, est déterminé sous les contraintes d'offre et de demandes agrégées. La solution analytique donne lieu à une règle de taux d'intérêt optimale où les anticipations d'inflation jouent un rôle déterminant :

$$i_t = \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha\varphi}\right) E_t \pi_{t+1} + \frac{1}{\varphi} g_t \quad (6)$$

La Banque centrale peut ainsi piloter les anticipations du secteur privé et ajuster, par conséquent, la demande en réponse aux tensions sur les prix. Dans ce contexte, la politique monétaire agit sur le taux d'intérêt réel et affecte, la lenteur des ajustements des prix aidant, l'état de l'économie. Une baisse du taux d'intérêt nominal conduit à une hausse de la demande des biens accompagnée d'une hausse de l'activité. L'importance de cette baisse dépend de l'importance relative des objectifs de la Banque centrale, de la sensibilité de la demande globale au taux d'intérêt réel, et de l'inflation à la demande.

De par la place dévolue à la fonction de réaction, cette formulation du comportement de la Banque centrale vise à appréhender les effets de la politique monétaire sur l'activité réelle dans un environnement dynamique de viscosité des prix. Comme telle, elle contient des présuppositions toutes tributaires de la dissociation entre le court terme et le long terme :

- i) Le produit naturel de long terme est déterminé exclusivement par les conditions d'offre en l'occurrence les préférences des agents, les techniques de production et les ressources initiales ;
- ii) L'arbitrage entre la variabilité de l'inflation et la variabilité de la production est opportun à court terme du fait du défaut d'ajustement par les prix. A long terme, la neutralité monétaire reprend ses droits ;
- iii) La politique monétaire est réactive en ce que la Banque centrale doit ajuster adéquatement son instrument en fonction de la conjoncture en vue de contenir les déviations vis-à-vis de l'équilibre de long terme.

C- L'exclusion de la monnaie : *Hamlet* sans le Prince de Danemark.

Les tenants du nouveau consensus macroéconomique soutiennent que leur approche tire son originalité de l'intégration de la monnaie dans un schéma d'équilibre général dynamique. La place qu'occupe le taux d'intérêt dans la détermination de l'activité et l'inférence des politiques monétaires optimales, tout comme le rôle des variables nominales sont considérés comme emblématiques des traits saillants de l'unification de la macroéconomie. Or, si l'on s'interroge sur la vision sous-jacente au nouveau consensus macroéconomique, force est de souligner qu'elle est de part en part marquée par l'approche réelle. Telle qu'elle est définie par Schumpeter, cette approche véhicule une vision qui accorde le primat aux biens : «L'analyse en termes réels se fonde sur ce principe : tous les phénomènes économiques sont susceptibles d'être décrits en termes de biens et de décisions les concernant et de relations entre eux».

(Schumpeter J., 1983, p. 389). Evacuant ainsi la monnaie, cette vision saisit les objets et les agents économiques en termes de relations d'échange définis dans l'espace d'un ensemble de biens donné *a priori*. Sous ces rapports, les biens, sont quelque soient leurs caractéristiques, identiques en tant qu'objets de transactions. Les agents sont repérés par leurs relations aux biens : les consommateurs sont définis par des fonctions d'utilité et les producteurs par des fonctions de production. Dans cette description, le marché est conçu comme un ensemble d'agents optimisateurs et d'opérations sur les biens dont la commensurabilité est établie par l'intermédiaire des prix.

A l'instar de la théorie des cycles réels, le nouveau consensus macroéconomique s'arc-boute à ces présupposés ontologiques en les dotant d'une dimension intertemporelle déroulant ainsi une problématique centrée sur l'allocation des ressources et les conditions d'équilibre. La conséquence de cette approche est que les relations de marché sont saisies en termes de prix relatifs. «La condition permissive de la théorie de la valeur -affirment C. Benetti et J. Cartelier- est la disqualification et l'élimination de la forme sous laquelle les grandeurs économiques se présentent, à savoir les unités de compte, et, au-delà l'évacuation de toute grandeur monétaire» (1995, p. 219). Sous cet angle, la monnaie ne peut être introduite que sous l'égide de l'approche réelle. La correspondance obligée entre cette approche et la discipline d'équilibre implique que les grandeurs réelles jouent un rôle essentiel : outre que les décisions individuelles sont commandées par ces variables, les marchés s'apurent par les prix relatifs indépendamment de la monnaie.

Cette prégnance de l'approche réelle est visible dans le statut du taux d'intérêt. Celui-ci possède les attributs d'une variable réelle aussi bien dans l'analyse du comportement du ménage représentatif qu'en tant qu'instrument de la politique monétaire. L'arbitrage intertemporel dont dérive l'équation de demande agrégée intègre l'impact du taux d'intérêt réel sur la substitution de la consommation en fonction de son coût d'opportunité. La condition d'optimalité correspondant à cet arbitrage est définie par une application de l'équation d'Euler où la prise en compte du taux d'inflation anticipé et du taux d'intérêt détermine le taux d'intérêt sous sa dimension réelle. C'est dans ce contexte qu'est appréhendé le canal de transmission de la politique monétaire. Le comportement optimal tient au choix de la séquence temporelle du taux d'intérêt nominal pour les variables objectif que sont l'activité et l'inflation sous l'hypothèse que les agents privés déterminent par leurs anticipations les politiques futures. Dans ce contexte, la politique monétaire

transite par la sensibilité de la demande globale au taux d'intérêt réel. Le principe de Taylor est révélateur de la place réduite dévolue à la monnaie. Selon M. Woodford (2003), artisan de ce principe, la règle de comportement de la Banque centrale doit satisfaire l'inégalité suivante :

$$i_t = \phi_\pi + \frac{1-\beta}{\lambda} \phi_y \geq 1 \quad (7)$$

ϕ_π et ϕ_y représentent des coefficients de réaction des autorités monétaires. On se rappelle que β et λ mesurent respectivement la sensibilité des agents à l'inflation et la fréquence d'ajustement des prix.

Une hausse d'un point de l'inflation s'accompagne d'une hausse de $\frac{1-\beta}{\lambda}$ de l'*output gap*. La Banque centrale doit réagir à l'écart d'inflation par une modification plus forte de son taux. En cas de tensions excessives sur les prix, une politique restrictive ralentit l'activité et entraîne le retour de l'inflation à sa cible. Si le relèvement du taux d'intérêt nominal est inférieur à la poussée d'inflation, la baisse du taux réel qui s'ensuit stimule la demande et accroît l'instabilité monétaire.

Un tel statut du taux d'intérêt semble répondre à une double préoccupation : d'une part, la formulation de l'équation IS sous l'égide de la norme du comportement optimisateur, et d'autre part, l'éviction de l'agrégat monétaire du rang de variable de contrôle exogène. Dans le schéma canonique IS/LM de l'ancienne synthèse, l'interdépendance entre les variables réelles et les variables monétaires est assurée par le truchement du taux d'intérêt. En tant que déterminant de l'investissement et de la demande de monnaie, le taux d'intérêt commande à la fois l'équilibre sur le marché des produits et sur le marché de la monnaie. Une hausse de la quantité monnaie en circulation induit une baisse du taux d'intérêt et un surcroît d'activité. Pour les tenants du nouveau consensus macroéconomique, cette analyse de l'interdépendance est sujette à discussion. Tel qu'il y apparaît, le taux d'intérêt possède un caractère dual : il est relié à la demande de monnaie comme variable nominale et à l'investissement comme variable réelle. Aussi, pour corriger cette incongruité, ils considèrent que la formation du taux d'intérêt obéit à des comportements réels à travers les anticipations d'inflation et le sentier de politique monétaire. L'équation LM n'est plus sollicitée dans ces conditions pour spécifier le comportement de la Banque centrale. L'action sur le taux d'intérêt nominal, qui est en même temps action sur le taux d'intérêt réel, entraîne l'élimination de l'offre de monnaie comme variable de contrôle. Ce *requiem* pour LM possède, selon la nouveau consensus macroéconomique, un double avantage :

- i) La description de la politique monétaire à l'aide d'une règle active qui n'appelle pas, à la différence de IS/LM, l'intermédiation du marché de la monnaie ;
- ii) La représentation du taux d'intérêt en termes réels permet d'assurer la jonction entre les comportements rationnels des agents et l'impact de la politique monétaire sur l'activité et les prix.

Cette prépondérance des grandeurs réelles n'affecte pas l'équilibre entre offre et demande de monnaie. Les conditions de cet équilibre s'écrivent :

$$m_t - p_t = k y_t - n i_t + v_t \quad (8)$$

m_t est la masse monétaire, p_t est le niveau des prix, y_t le revenu nominal, i_t le taux d'intérêt nominal et v_t une perturbation aléatoire. k et n sont des paramètres de la demande de monnaie.

Si l'aléa échappe à la connaissance de la Banque centrale, le taux d'intérêt s'impose comme instrument de politique monétaire qui assure l'ajustement face aux chocs. Sous cet angle, l'offre de monnaie n'est plus une cible intermédiaire fixée *a priori*. Elle fait figure d'une variable qui s'adapte à la politique monétaire par la règle du taux d'intérêt. Une telle endogénéité tient à la transmission des impulsions de la Banque centrale à travers les anticipations d'inflation. L'équilibre sur le marché monétaire devient :

$$m_t - p_t = k y_t - n(i_t - E_t \pi_{t+1}) + v_t \quad (9)$$

La Banque centrale module la base monétaire à la demande de monnaie. Il s'ensuit que les variables réelles déterminent le stock de monnaie¹² et que l'inflation ne dépend pas de la quantité de monnaie en circulation, mais des anticipations des agents. Dès lors, on est en droit de soupçonner que les variables monétaires ne jouent pas de rôle dans la détermination du cycle.

La disjonction entre le niveau des prix d'équilibre et la masse monétaire consécutive à l'introduction d'une règle de taux d'intérêt est représentative des conséquences de l'adoption de l'approche réelle. En considérant que les anticipations d'inflation et le taux d'intérêt sont reliés par la relation de Fisher, on a :

$$\pi_t = E_t \pi_{t+1} + r_t - i_t \quad (10)$$

L'inflation d'équilibre dépend de l'inflation anticipée et du taux d'intérêt réel d'équilibre ($r_t - i_t$) qui est déterminé par l'égalité entre la demande d'investissement et l'offre d'épargne et le taux d'intérêt nominal tel qu'il est fixé par les autorités monétaires. En supposant que le taux d'intérêt cible traduit les réactions de la Banque centrale, on a :

$$i_t = \bar{i}_t + \phi \pi_t \quad (11)$$

En substituant cette équation dans celle de l'inflation, il vient :

$$(1 + \phi) \pi_t = E_t \pi_{t+1} + r_t - \bar{i}_t \quad (12)$$

D'où l'on tire l'expression de l'inflation :

$$\pi_t = \frac{E_t \pi_{t+1}}{(1 + \phi)} + \frac{r_t - \bar{i}_t}{(1 + \phi)} \quad (13)$$

avec $0 < \frac{1}{(1 + \phi)} < 1$

12- Cette proposition rejoint celle développée par le modèle de R. King et C. Plosser (1984) qui est précisément une tentative d'intégration explicite de la monnaie dans l'explication du cycle en termes réels. Ce modèle attribue à la masse monétaire un rôle purement passif et à la demande de monnaie une détermination endogène. Cette endogénéité n'est cependant pas la conséquence d'un comportement réactif de la banque centrale par le biais du taux d'intérêt. Elle résulte de la prise en compte d'un secteur producteur de services monétaires de transaction (P-Y. Henin, 1989, p.553-54).

En exprimant cette relation dans une optique prospective, on obtient :

$$\pi_t = \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{1}{1+\phi} \right)^{j+1} E_t(r_{t+j} - i_{t+j}) \quad (13'')$$

La valeur moyenne de long terme autour de laquelle fluctue l'inflation d'équilibre est donnée par :

$$\bar{\pi} = \phi^{-1} (\bar{r} - \bar{i}) \quad (14)$$

Le contrôle de l'inflation n'appelle ni le recours à une variable représentative de la monnaie, ni l'intervention sur le marché monétaire (Woodford M. (2003), p. 49-51). La dynamique de l'inflation est tributaire des inflexions de la politique monétaire à travers la règle du taux d'intérêt et des comportements réels des offreurs et des demandeurs d'épargne. La relation entre offre de monnaie et niveau des prix ayant disparu, l'inflation n'est en rien reliée à la monnaie.

Cette exclusion de la monnaie témoigne avec éloquence de l'existence d'un rapport nécessaire entre l'adoption de l'approche réelle comme option d'analyse et les propositions subséquentes. Lorsque le nouveau consensus macroéconomique ne procède pas à une telle exclusion, il ne peut envisager la monnaie que dans l'espace des biens, *a fortiori* lorsqu'il s'agit d'en expliciter la place dans les choix individuels¹³. Ainsi, elle l'inclut dans le programme de décisions des agents à titre d'argument dans la fonction d'utilité intertemporelle (Woodford M., 2003, p. 102) :

$$E_0 \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u \left(C_t, \frac{M_t}{P_t}, \varepsilon_t \right) \right\} \quad (15)$$

C_t est un bien de consommation, M_t les encaisses nominales, P_t le niveau général des prix et ε_t un choc dans les préférences liées à la technique de transaction.

Cette modalité d'intégration place la monnaie, à côté des biens de consommation, faisant ainsi des encaisses réelles un bien dont la caractéristique est d'être un moyen de détention de la richesse. A ce titre, elle ne possède pas de rôle propre ainsi que le montre l'examen de la fonction d'utilité suivante :

$$U = U(C_{1t}, C_{2t}) \quad (16)$$

13- Le modèle de R. King et C. Plosser (1984) est exemplaire des contraintes qu'implique l'approche réelle quant au traitement de la monnaie. Celle-ci est caractérisée comme un bien intermédiaire produit par le secteur d'activité bancaire à l'aide du travail et du capital. De par ses services de transaction, elle intervient dans la production des biens de consommation et dans les contraintes de temps des ménages.

C_{1t} et C_{2t} sont les quantités de biens acquis au comptant et à crédit. L'agent définit ses choix intertemporels en déterminant les encaisses destinées à l'achat des biens de consommation et à la demande de titres rémunérés par des intérêts, la condition d'optimalité est donnée:

$$\frac{1}{P_t} U_2 (C_{1t}, C_{2t}) = \beta E_t \left\{ \frac{1}{P_{t+1}} U_1 (C_{1,t+1}, C_{2,t+1}) \right\} \quad (17)$$

P_t et C_{t+1} sont les prix des biens au comptant et à crédit et β un facteur d'actualisation associé à l'utilité présente.

Il apparaît bien que la monnaie n'est dotée d'aucune spécificité. D'une part, il est moyen de transfert de pouvoir d'achat comme tout autre bien susceptible d'être réserve de valeur. Pour autant, le taux d'intérêt n'apparaît pas dans la détermination des choix optimaux. D'autre part, comme la théorie de la valeur détermine les prix relatifs, la monnaie n'est pas une unité de compte nécessaire.

Privilégiant le terrain des fondements microéconomiques, le nouveau consensus macroéconomique se ramène, en définitive, à un enveloppement des rigidités et des imperfections concurrentielles, au sein d'une macroéconomie réelle dont le lien avec la monnaie est manifestement inessentiel¹⁴. Comme si on joue *Hamlet* sans le Prince de Danemark.

En définitive, l'unification par le nouveau consensus permet à la macroéconomie d'étendre la portée explicative de son schéma de dérivation à l'étude des rigidités, des imperfections de marché et de l'optimalité de la politique monétaire, et de renforcer ses critères de validité. Comme l'a montré le débat à l'occasion de la crise financière internationale, ce consensus n'a pas manifesté des signes de mauvaise santé. La critique des hypothèses d'anticipations rationnelles et d'efficience des marchés financiers s'est avérée, non seulement inadéquate, mais aussi contreproductive en ce qu'elle conduit les tenants du nouveau consensus macroéconomique à intégrer les frictions financières et à étendre son champ d'explication. L'unification se heurte néanmoins à une limite significative qui tient à l'élimination de la monnaie par suite du statut exorbitant de l'explication par l'équilibre. Cette limite est la conséquence de la part exorbitante octroyée au réquisit de micro-fondements. La décomposition des constituants du niveau supérieur, la macroéconomie, en objets du niveau inférieur de la microéconomie restreint les propriétés des équilibres à des résultantes d'actions individuelles afférentes exclusivement aux variables réelles. La question se pose alors de la validité de la réduction à l'œuvre. La portée explicative de celle-ci n'est *a priori* assurée que si les objets et la classe de phénomènes et la problématique de la microéconomie se confondent avec ceux de la macroéconomie. Si celle-ci possède une spécificité, elle ne pourrait être diluée moyennant des conditions auxiliaires consécutives à l'agent représentatif. Comme l'affirme Garfinkel (1981) à partir de la parabole du lapin et du renard, la réductibilité d'une discipline à une autre condamne à l'inanité les explications produites par la discipline réduite. La mort du lagomorphe peut faire l'objet d'une macro-explication, la forte pression de la population des renards comme elle se prête à une micro-explication, la pénétration du lapin dans l'espace du prédateur.

14- N. Wallace (2001) souligne bien cette lacune des modèles de politique monétaire centrés sur la neutralité qu'il oppose aux modèles qui visent à mettre en relief l'essentialité de la monnaie en traitant la question de son utilisation dans les transactions.

Références bibliographiques

- Benetti C. et Cartelier J. [1995], «L'économie comme science : une convention mal partagée», *L'économie est-elle une science dure ?*, A. D'Autume et J. Cartelier (eds), Economica, Paris.
- Blanchard O. [2008], «The State of Macro», *NBER Working Paper*, n°14259, august.
- Blanchard O. [2000], «What do We know about Macroeconomics that Fisher and Wicksell did not ?», *Quarterly Journal of Economics*, vol. 115, n°4, November, pp. 1375-1409.
- Bofinger P. Mayer E., Wollmershauser T. [2003], «The BMW Model : Simple Macroeconomics for Closed and Open Economies -A Requiem for the IS/LM-AS/AD and the Mundell-Fleming Model», *Wuerzburg Economics Working Paper*, mars.
- Cartelier J. [2001], «La coordination en déséquilibre, "loi de l'offre et de la demande" ou regulation monétaire», J. Cartelier et R. Frydman, *L'économie hors de l'équilibre*, Economica, Paris.
- Chari V. [1999], «Nobel Laureate Robert E. Lucas, Jr.: Architect of Modern Macroeconomics», *Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review*, spring, vol. 23, n°2, pp. 2-11.
- Clarida R., Gali J. et Gertler M. [1999], «The Science of Monetary Policy : A New Keynesian Perspective», *Journal of Economic Literature*, vol. 37, n°4, December, pp.1661-1707.
- Danthine J-P. [1998], «A la poursuite du Graal : le successeur d'IS-LM est-il identifié?», *L'actualité économique*, vol. 74, n°4, décembre.
- Garfinkel A. [1981], *forms of Explantation*, New Haven CT, Yale University.
- Goodfriend M. [2007], «How the World Achieved Consensus on Monetary Policy», *Journal of Economic Perspectives*, vol. 21, n°4.
- Goodfriend M. et King R. [1997], «The new neoclassical synthesis and the role of monetary policy», dans Bernanke (B.) et Rotemberg (J.) (eds), *NBER Macroeconomics Annual 1997*, The MIT Press, Cambridge, pp. 231-275.
- Hempel C. [1991], *Eléments d'épistémologie*, Armand Collin, Paris.
- Henin J-Y. [1989], «Une macroéconomie sans monnaie pour les années 90? Revue critique des travaux théoriques et empiriques sur les cycles réels». *Revue d'économie politique*, n°4, pp.532-596.
- Franc P. [1996], *Les anticipations rationnelles : analyse des théories contemporaines*, Librairie Droz, Genève-Paris.
- Kehoe T. et Prescott E. (1994). «Introduction to the Symposium : the Discipline of Applied General Equilibrium», *Economic Theory*, vol. 6, n°1, p.1-11.
- King R., C. Plosser et Rebello S. (1988), «Production, Growth and Business Cycles : I. The Basic Neoclassical Model», *Journal of Monetary Economics*, vol. 21, pp. 195-232.
- King R. et Plosser C. [1984], «Money, Credit and Prices in a Real Business Cycle», *American Economic Review*, vol. 74, n°3, june, pp. 363-380.
- Kitcher Ph. [2004], *El avance de la ciencia. Ciencia sin leyenda, objetividad sin ilusiones*, UNAM, México.

- Kitcher Ph. [1989], «Explanatory unification and the Causal Structure of the World», en: Kitcher Ph. et Salmon W., *Scientific Explanation. Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Minneapolis, University of Minnesota Press.
- Kydland F. Prescott E. [1982], «Time to Build and Aggregate Fluctuations», *Econometrica*, vol. 50, Novembre, pp. 1345-1270.
- Kydland F. et Prescott E. [1977], «Rules Rather Than Discretion : The Inconsistency of Optimal Plans», *Journal of Political Economy*, vol. 85, June, 473-492.
- Lucas R. [1982], *Studies in business cycles Theory*, MIT Press, Cambridge.
- Lucas R. [1980], «The Death of Keynesian Economics», *Issues and Ideas*, University of Chicago, winter, pp. 18-19
- Lucas R. et Sargent T. [1979] «After Keynesian Macroeconomics» in Miller (ed.), *The Rational Expectations Revolution Readings from the Front Line*, MIT Press, 1994.
- Mc Callum B. et Nelson E. [1999], «An Optimizing IS-LM Specification for Monetary Policy and Business Cycle Analysis», *Journal of Money, Credit and Banking*, 31(3), august, pp. 296-316.
- Mishkin F. [2007], «Consensos actuales en política monetaria : entre el arte y la ciencia», *Revista Cultura Económica*. Année XXV, n°70, 44-65.
- Nagel E. [1961], *The Structure of Science*, Londres, Routledge & Kegan Paul.
- Naish H. [1993], «Real Business Cycles in a Keynesian Macro Model», *Oxford Economic Papers*, vol. 45, n°4.
- Rupy S. [2013], *Pluralismes scientifiques, enjeux épistémologiques et métaphysiques*, Hermann, Paris.
- Romer D. [1993], «The New Keynesian Synthesis», *Journal of Economic Perspectives*, vol. 7, hiver.
- Schumpeter J. *Histoire de l'analyse économique*, 3 tomes, Gallimard, Paris.
- Taouil R. [2013], «Los modelos DSGE y el imperativo de los fundamentos microeconómicos», *Perspectivas de la macroeconomía y el espacio meso-institucional*, Jardón Urrieta, J.J., Taouil, R., Albreu, R. (eds), Mexico, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Universidad de Buenos Aires, Université Pierre Mendès France.
- Wallace N. [2001], «Whither Monetary Economics?», *International Economic Review*, vol. 42, n°4, pp. 847-869.
- Walliser B. [2011], *Comment raisonnent les économistes? Les fonctions des modèles*, Odile Jacob, Economie, Paris.
- Woodford, M. [2008], «Convergence in Macroeconomics : Elements of the New Synthesis», *American Economic Journal : Macroeconomics 2009*, vol. 1, n°1, janvier.
- Woodford, M. [2003], *Interest and Prices: Foundations of a theory of Monetary Policy*, Princeton University Press, Princeton.

+ L'auteur tient à remercier Jean Cartelier pour ses remarques et suggestions sans engager sa responsabilité.

L'AGRICULTURE DU FUTUR : UN CONDENSÉ DE DÉFIS SCIENTIFIQUES

Pr. Mohamed AIT KADI

*Membre Résident de l'Académie
Hassan II des Sciences et Techniques*



Résumé :

L'agriculture du futur doit relever trois défis : fournir en quantité et en qualité de quoi nourrir plus de neuf milliards de personnes à l'horizon 2050 tout en protégeant l'environnement et les ressources naturelles; participer à l'atténuation du changement climatique et s'y adapter et ; fournir les matières premières pour des usages énergétiques et chimiques ou pour de nouveaux matériaux en exploitant pleinement la biomasse.

La simultanéité de ces défis requiert des évolutions profondes dans la façon d'appréhender l'agriculture du futur. La seule connaissance de la sphère agricole ne suffit pas, il faut intégrer les dynamiques démographiques et d'urbanisation, les évolutions climatiques, la disponibilité de l'énergie, le développement de la bioéconomie et tous les changements contextuels c'est-à-dire toute la gamme des problèmes quantitatifs et qualitatifs actuels et futurs, les nouveaux domaines de préoccupation, les changements de priorités ainsi que les éventuels mécanismes socio-politiques d'intervention. La science et la technologie doivent plus que jamais contribuer à proposer des solutions pour répondre à ces évolutions.

Les mutations agricoles permanentes, la mondialisation des marchés, la modernisation des exploitations, les besoins de productivité et de traçabilité ou le respect de l'environnement sont aujourd'hui d'importants moteurs de l'innovation. Les deux dernières décennies ont

été porteuses de progrès scientifiques et technologiques exceptionnels en génomique structurale et fonctionnelle, en biotechnologies, en analyse de la diversité génétique et en modélisation du fonctionnement de la plante et du peuplement végétal dans leur environnement. Ces progrès sont le résultat de réelles synergies interdisciplinaires créant de nouvelles interfaces entre la biologie, la chimie, les mathématiques et la physique. Ils génèrent des connaissances et des techniques agronomiques nouvelles ainsi que de nouveaux produits alimentaires. De même, grâce à l'intégration des technologies de l'information et de la communication l'agriculture passe à une agriculture de précision voire à une agriculture numérique (agriculture 3.0).

Abstract:

The agriculture of the future faces three challenges: to provide in quantity and quality enough to feed more than nine billion people by 2050 while protecting the environment and natural resources; participate in climate change mitigation and adapt to its impacts; supply raw materials for energy and chemical uses or for new materials by making full use of biomass.

The simultaneity of these challenges requires profound changes in the way we approach the agriculture of the future. The only focus on the agricultural sphere is not sufficient, it is necessary to integrate the demographic and urbanization dynamics, the climatic evolutions, the availability of the energy, the development of the bioeconomy and all the contextual changes, i.e., the range of current and future quantitative and qualitative problems, new areas of concern, changes in priorities and possible socio-political intervention mechanisms. Science and technology must contribute more than ever to finding solutions to meet these evolutions.

Permanent agricultural changes, the globalization of markets, the modernization of farms, the need for productivity and traceability, and respect for the environment are today important drivers of innovation. Over the past two decades, outstanding scientific and technological advances have been made in structural and functional genomics, biotechnology, genetic diversity analysis, and modeling of plants and plants' functions in their environment. These advances are the result of real interdisciplinary synergies creating new interfaces between biology, chemistry, mathematics and physics. They generate new knowledge and agronomic techniques as well as new food products. Similarly, through the integration of information and communication technologies, agriculture switches to precision farming and even digital agriculture (agriculture 3.0).

1- Introduction : L'épopée de l'agriculture

Je voudrais introduire mon propos ce matin par cette question: Comment nourrir le monde? Elle n'est pas nouvelle. On peut même dire qu'elle a accompagné l'Homme dans toutes les étapes de son développement. La disponibilité et l'accès à la nourriture a été un facteur crucial qui a façonné l'émergence des civilisations humaines et l'épopée de l'agriculture à travers les âges.

Les contextes ont changé au fil des siècles et les motifs d'inquiétude aussi. Au XVIII^{ème} siècle, c'est la croissance démographique qui a servi d'indicateur d'alerte. Des voix ont commencé à s'élever pour s'inquiéter d'un possible décalage entre croissance démographique et disponibilités alimentaires. La plus célèbre est celle de Malthus. Malthus prédit mathématiquement que, sans frein, la population augmente de façon géométrique tandis que les ressources croissent de façon arithmétique. Il en conclut le caractère inévitable de catastrophes démographiques à moins de limiter la croissance de la population.

Presque un siècle après, le Club de Rome lance une nouvelle alarme en parrainant le rapport sur les «limites à la croissance» publié par une équipe du MIT en 1972. Ce rapport explore pour l'avenir plusieurs scénarios considérant certains déterminants comme la pénurie des matières premières, la hausse insupportable de la pollution.. Il conclut que «...si les tendances actuelles de la croissance de la population mondiale, de l'industrialisation, de la pollution, de la production alimentaire et de l'épuisement des ressources persistent alors les limites «physiques» à la croissance seront atteintes dans le courant d'un siècle. Le résultat le plus probable sera un déclin soudain et incontrôlable de la démographie, de la production alimentaire et des capacités industrielles» (Figure 1)

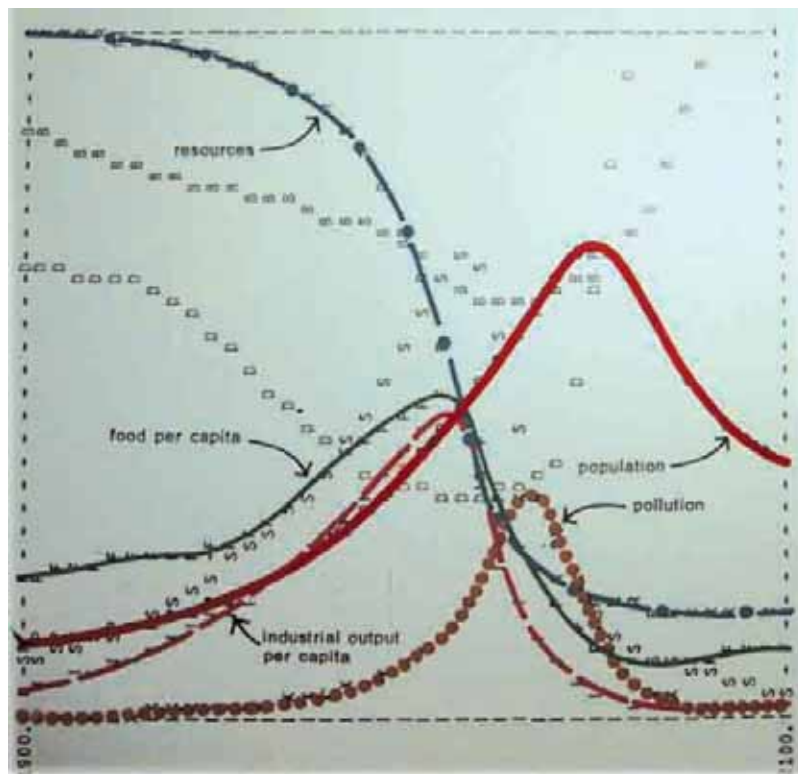


Fig.1 : Poster présentant les résultats du modèle exposé à la Smithsonian en 1972

En 2009, soit presque quarante ans après ce rapport, le chercheur suédois Johan Rockström, spécialiste des enjeux environnementaux mondiaux au Stockholm Resilience Centre, a remis à l'ordre du jour la question des limites de la planète (planetary boundaries). Dans un article il montre que les modèles actuels de développement de nos sociétés pourraient prochainement nous amener à dépasser des seuils d'exploitation pour un ensemble de ressources (la biodiversité, l'eau, les sols...) et/ou nous amener à dépasser des valeurs limites pour l'interférence sur des cycles naturels (de l'azote, du carbone, du phosphore...) conduisant potentiellement à des impacts majeurs sur le bien-être humain. L'enjeu global ainsi mis en lumière semble d'autant plus sérieux que ces ressources et ces cycles sont reliés entre eux au sein du système planétaire et que les effets de rétroaction de l'un sur l'autre pourraient provoquer des changements d'état de l'écosystème mondial plus rapides et plus imprévisibles que précédemment, voir inconnus à ce jour (Figure 2).

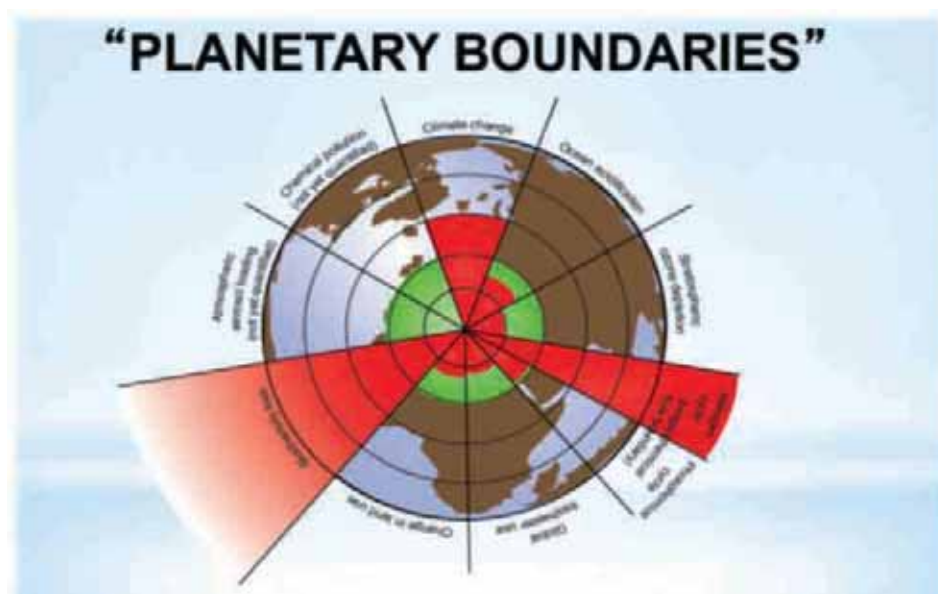


Fig. 2 : Planetary boundaries – Source : Rockström et al (2009)

Compte tenu de son importance pour les cycles de l'azote, du phosphore ou du carbone, mais aussi pour la biodiversité, l'eau et les sols, le secteur agricole joue un rôle central dans ces dynamiques. Alors, la trajectoire future de l'agriculture mondiale risque-t-elle de rencontrer les limites de la planète? La question malthusienne semble à nouveau posée.

La crise alimentaire qu'a connue le monde en 2007-2008, et à laquelle notre Académie a consacré sa session plénière solennelle en 2009, était, comme nous en avons discuté, le signe d'une situation alimentaire de la planète tendue, préoccupante et complexe. Les actes de cette session apportent des éclairages et des réflexions sur de nombreux aspects que je n'aborderai pas dans mon intervention. Ces actes peuvent donc être utilement consultés.

Par conséquent, de nouvelles inquiétudes se font jour. La production alimentaire est confrontée, dans un contexte de croissance démographique toujours soutenu (malgré son ralentissement), à une conjonction inédite de facteurs structurels qui pose de nouvelles questions pour la sécurité alimentaire mondiale. Alors, le XXI^{ème} siècle pourrait-il donner finalement raison à Malthus? Ou des progrès technologiques permettront-ils de dépasser, une fois encore, les contraintes naturelles et démographiques?

Oui, les progrès agronomiques et l'apport des technologies ont particulièrement aidé à contrer les peurs malthusiennes comme en témoigne l'évolution historique des agricultures du monde.

Les premiers systèmes de culture et d'élevage sont apparus à l'époque néolithique, il y a presque 10 000 ans, dans quelques régions peu nombreuses et relativement peu étendues de la planète. Ils étaient issus de l'auto-transformation de quelques-uns des systèmes de prédation très variés qui régnaient alors sur l'ensemble du monde habité. Ces premières formes d'agriculture étaient certainement pratiquées aux abords des habitations et sur des alluvions de décrue, c'est-à-dire sur des terres déjà fertilisées et n'exigeant pas de défrichement.

A partir de là, l'agriculture s'est répandue vers le monde. Puis la révolution agricole néolithique a donné naissance à des systèmes de céréaliculture pluviale à jachère, avec pâturage et élevage associés dans lesquels on utilisait la bêche et la houe, puis un instrument de culture attelée l'araire.

Dans les régions arides, des systèmes agraires hydrauliques de cultures de décrue ou de cultures irriguées se sont constitués vers la fin de l'époque néolithique en Mésopotamie, dans les vallées du Nil et de l'Indus, et dans les oasis et les vallées de l'empire Inca.

Des millénaires d'évolutions séparées, parfois entrecroisées ont ainsi produit toute une gamme de systèmes agraires fondamentalement différents et très inégalement performants, qui occupent les divers milieux exploitables de la planète.

L'évolution de l'agriculture s'est accélérée avec les grandes découvertes du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècles qui ont produit les systèmes motorisés, mécanisés, chimisés et spécialisés d'aujourd'hui. En 1840, le chimiste allemand Justus von Liebig suggérait que les plantes se nourrissaient de substances non organiques. Il a été ainsi à l'origine de la fertilisation minérale. Le procédé Haber-Bosh a permis la synthèse de l'ammoniac qui sert aujourd'hui à fabriquer plus de 500 millions de tonnes d'engrais azotés dont dépend pour une large part l'agriculture mondiale. La génétique classique a débuté avec les travaux de Mendel (1822-1884), qui expérimenta pendant 9 ans sur le Pois (*Pisum sativum*) pour confirmer ses théories de l'hérédité. L'invention des vaccins pour protéger les animaux et le développement des pesticides et des herbicides pour la protection des plantes et la lutte contre les adventices ont contribué à réduire les pertes de récoltes. L'amélioration génétique a permis d'obtenir des variétés nouvelles plus productives, plus efficaces dans l'utilisation de l'eau et des engrais et plus tolérantes aux stress biotiques et abiotiques (Figure 3).

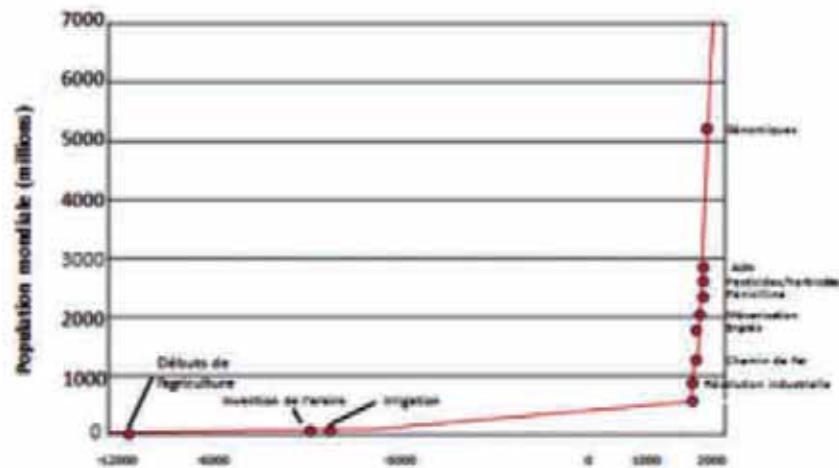


Fig. 3 : Agriculture et découvertes scientifiques et technologiques

(Source : adapté de Fogel R.W., The escape from hunger and premature death (2004))

Ainsi, au XX^{ème} siècle les gains de productivité provenant de la révolution agricole (motorisation, mécanisation, fertilisation, sélection, spécialisation) ont été si énormes qu'ils ont entraîné une baisse importante des prix réels de la plupart des denrées agricoles et que le rapport de productivité du travail entre l'agriculture manuelle la moins productive du monde et l'agriculture motorisée et mécanisée la plus productive a cinquantuplé, passant de 1 contre 10 au début du siècle précédent à environ 1 contre 500 aujourd'hui.

Potentiellement, aujourd'hui, nous avons la technologie pour nourrir la population mondiale. Et pourtant nous n'y arrivons pas! Puisque environ 800 millions d'êtres humains sont actuellement sous alimentés de façon chronique. Ce chiffre représente une diminution de plus de 200 millions de personnes depuis le début des années 90 qui est due essentiellement aux changements intervenus dans les pays les plus peuplés notamment la Chine et l'Inde. En Afrique, pratiquement une personne sur cinq souffre de la faim. Près de 2 milliards de personnes présentent de graves carences en fer, en iode en vitamine A ou autres minéraux et vitamines.

C'est dire que les problèmes alimentaires et nutritionnels ne sont pas seulement scientifiques ou technologiques ils sont au premier chef politiques, économiques et sociétaux. Les travaux d'Amartya Sen (prix Nobel d'économie en 1998) et ceux d'Alex Waal ont mis en avant les inégalités sociales et l'extension de la pauvreté qui limitent la capacité des populations déshéritées à accéder à l'alimentation, qu'il s'agisse de leur capacité à produire suffisamment pour satisfaire leurs besoins ou qu'il s'agisse de leurs revenus pour accéder aux marchés.

En même temps, l'évolution des régimes alimentaires a conduit à l'apparition d'un autre problème de santé publique majeur celui de l'obésité. On estime, selon l'OMS, à environ 2 milliards le nombre d'adultes obèses ou en surpoids.

Nous sommes donc face à une équation agricole future qui est complexe dans un contexte exigeant !

2- La complexité de l'équation agricole du futur dans un contexte exigeant

Demande	Offre
1. Démographie & urbanisation 2. Amélioration des revenus 3. Evolution des régimes alimentaires 4. Santé et Nutrition 5. Empreinte écologique 6. Bioéconomie	1. Ressources naturelles de base (eau, sols, biodiversité) 2. Aléas/Changement climatiques 3. La productivité 4. Services environnementaux 5. Coûts de l'énergie, des intrants et du transport 6. Agro-industrie et distribution 7. Fonctionnement des marchés internationaux

Cette équation montre que l'agriculture du futur doit relever un triple défi : (1) fournir en quantité et en qualité de quoi nourrir 9 milliards d'habitants à l'horizon 2050 tout en protégeant l'environnement et les ressources naturelles, (2) participer à la lutte contre le changement climatique et s'y adapter ; et (3) fournir les matières premières pour des usages énergétiques, chimiques ou des matériaux en exploitant pleinement la biomasse.

La simultanéité de ces défis requiert des évolutions profondes dans notre façon d'appréhender l'agriculture du futur. La seule connaissance de la sphère agricole ne suffit pas, il faut intégrer les dynamiques d'urbanisation, les évolutions climatiques, la disponibilité de l'énergie, le développement de la bioéconomie et tous les changements contextuels c'est-à-dire toute la gamme des problèmes quantitatifs et qualitatifs actuels et futurs, les nouveaux domaines de préoccupation, les changements de priorités ainsi que les éventuels mécanismes socio-politiques d'intervention. Ces évolutions doivent, à mon avis, s'effectuer au moins sur 3 fronts :

Le premier front est relatif au système Agriculture-Nutrition et Santé. Nous devons construire une capacité de compréhension et de modélisation de la sécurité alimentaire et nutritionnelle en prenant en compte les multiples composantes et intervenants du système alimentaire. Il ne suffit plus de considérer uniquement les étapes qui vont de « la matière première » dans le champ (végétale ou animale) au produit fini dans notre assiette, il faut faire évoluer les systèmes pour traiter la question de la santé et de la nutrition (déficience et obésité) en veillant aux bilans environnemental et sociétal des modes de production et de consommation (Figure 4).



Fig.4 : Le système agro-alimentaire

Le second front est celui d'une agriculture climato-intelligente. L'agriculture subit le changement climatique (nature des sols modifiée, disponibilité en eau bouleversée, arrivée de nouveaux agresseurs, etc..) avec un impact local sur les récoltes et un impact global sur la carte agricole mondiale et le commerce agricole international. Mais l'agriculture est aussi responsable du changement climatique. D'après le GIEC, le secteur des terres (agriculture, foresterie et autres affectations des terres - AFAT) contribue à 24% des émissions de gaz à effet de serre. Mais, l'agriculture est (peut-être la seule activité humaine) capable non seulement de réduire ses émissions de gaz à effet de serre, mais également à fixer du carbone dans le sol ou la biomasse et contribuer à la sobriété d'autres secteurs (énergie, transports, construction) en permettant la substitution de produits conventionnels par des produits issus de la biomasse agricole ou forestière.

Le concept d'agriculture climato-intelligente vise à optimiser simultanément les dimensions adaptation, atténuation et sécurité alimentaire. Les trois termes de l'équation sont parfois en équilibre, mais pas toujours et il faudra faire des choix. Ces choix ne concernent pas que les pratiques agricoles mais également les filières de production, les habitudes de consommation, les politiques publiques et les instruments économiques. C'est dire que le champ des connaissances nécessaires pour analyser les relations entre l'agriculture et le changement climatique est vaste, allant de la gouvernance internationale ou locale à la biologie et au génome en passant par les pratiques des acteurs.

Le troisième front concerne la bioéconomie. Parmi les politiques de développement durable, la bioéconomie est considérée comme une clé des perspectives à long terme de la croissance économique. Définie dans son acception la plus large comme l'ensemble des activités économiques, d'innovation, de développement et de recherche liées à la production et à l'utilisation de produits et de procédés biologiques, la bioéconomie recouvre la production et la transformation de la biomasse en une gamme de produits pour l'alimentation humaine et animale, ainsi que pour des usages chimiques et énergétiques et pour la fabrication de produits biosourcés (la chimie, l'énergie et les matériaux sont particulièrement en première ligne). Aujourd'hui, 45 pays ont déjà fait le pari de la bioéconomie et affichent leur stratégie scientifique et technologique pour faciliter la prise de conscience et la mise en œuvre. Dans le contexte de la bioéconomie l'agriculture du futur aura à dépasser la dualité des usages alimentaires et non alimentaires pour prendre en compte les concurrences mais aussi les complémentarités entre les systèmes alimentaire, énergétique, chimique.. utilisateurs de biomasse.

J'en viens maintenant à la deuxième partie du titre annoncé de mon intervention «un condensé de défis scientifiques».

3- Un condensé de défis scientifiques

On attend donc de l'agriculture du futur qu'elle produise plus et mieux. La science et la technologie doivent, plus que jamais, contribuer à proposer des solutions pour répondre à ces attentes. Les mutations agricoles permanentes, la mondialisation des marchés, la modernisation des exploitations, les besoins de productivité et de traçabilité ou le respect de l'environnement sont aujourd'hui d'importants moteurs de l'innovation.

Les défis scientifiques et technologiques couvrent un spectre très large allant de l'amélioration de la fertilité des sols, la gestion intégrée de l'eau, l'agriculture de précision, l'agriculture numérique, les agroéquipements (dont la robotique agricole) à la génétique et les biotechnologies. Je me propose de vous en présenter un panorama non exhaustif focalisant non seulement sur quelques avancées originales mais aussi sur les besoins en connaissances.

1. Améliorer la fertilité des sols et atténuer le changement climatique

Les sols se trouvent à la croisée des enjeux globaux de sécurité alimentaire d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à ce changement. 24% des sols sont dégradés à des degrés divers, dont près de la moitié des sols agricoles.

L'amélioration de la qualité des sols dans une optique d'accroissement de leur fertilité et de leur capacité à produire de la biomasse est donc nécessaire. La Commission mondiale sur l'économie et le climat a indiqué dans son rapport publié en 2014 que rendre seulement 12% des terres dégradées à la production agricole permettrait de nourrir 200 millions de personnes de plus sans recourir à la déforestation ni brûler de précieuses forêts.

Un exemple de réalisation dans ce domaine est la carte de fertilité des sols établie par l'INRA-Maroc. Elle permet une fertilisation raisonnée. Cet outil est mis à la disposition des agriculteurs sur internet. Ce savoir-faire est aussi mis à la disposition de pays africains – 5 pays en profitent déjà dans le cadre de l'engagement du Maroc dans la coopération Sud-Sud engagée par le Maroc. L'OCP a construit un complexe de fabrication d'engrais dédié spécialement à l'Afrique.

Les matières organiques des sols contribuent positivement à l'atténuation du changement climatique en stockant durablement le carbone permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole et forestier. Elles contribuent également à l'adaptation au changement climatique en protégeant les sols de l'érosion, en améliorant leur structure et leur capacité de rétention de l'eau. L'agriculture de conservation (zero labour ou semis direct), est une pratique agronomique qui permet de restituer la matière organique aux sols et améliorer les rendements. Elle a été longuement testée par l'INRA-Maroc avec des résultats probants. Elle connaît un développement rapide notamment en Amérique du Nord, en Amérique du Sud et en Australie.

Notre Académie organise demain, et à juste titre, un colloque sur les sols car les besoins de connaissances sont très importants, je citerai par exemple et sans anticiper les débats de ce colloque :

- Le besoin d'une meilleure connaissance des cycles biogéochimiques associés à l'effet de serre et, plus particulièrement, de l'évolution des stocks de carbone organique du sol à différentes échelles de temps et d'espace, en interaction avec l'état de la végétation et la disponibilité des sols en eau, azote et phosphore.
- Un autre domaine très important où l'on doit progresser dans la connaissance est celui de la biologie des sols. L'immensité de la biodiversité des sols et la complexité des interactions entre organismes et avec leurs habitats sont encore peu connues en dépit des progrès majeurs au cours des dernières années. Ces progrès ont été rendus possibles par la révolution technologique des approches «omiques» qui permet l'exploration exhaustive et à haut débit du métagénome des sols.

A. La maîtrise de l'eau

«Pour nourrir il faut produire, et pour produire, il faut de l'eau». Il n'est pas possible d'organiser le futur de l'agriculture sous contrainte du changement climatique sans une maîtrise de la gestion de l'eau. La finitude de la ressource en eau mondiale n'est plus une question, c'est une contrainte avérée qu'il faut désormais mettre en regard des défis de l'agriculture. L'amélioration de l'efficacité et de la valorisation de l'eau en agriculture et la réduction des pollutions diffuses d'origine agricole sont désormais des impératifs techniques incontournables. Cela nécessite la mise au point de technologies économes en eau et le développement de méthodes nouvelles pour informer les processus de décision et de gestion de l'eau (Figure 5)



Fig. 5 : exemple d'utilisation de la télédétection spatiale pour cartographier l'évapotranspiration et la prédiction des rendements

B. L'agriculture de précision

L'agriculture de précision apporte, justement, une réponse à l'utilisation parcimonieuse des ressources de base (sols et eaux) et des intrants (semences, engrais, produits phytosanitaires..) et par voie de conséquence elle répond aux enjeux du développement durable. A travers le développement de logiciels d'aide à la décision basés sur les données issus de capteurs (et leurs supports qui peuvent être les machines agricoles ou, depuis peu, les drones) et de systèmes de géolocalisation (GPS par exemple) les utilisateurs de machines agricoles peuvent apporter «la bonne dose, au bon endroit, au bon moment» en tenant compte des caractéristiques parcellaires et des variations intra-parcellaires, du climat et du développement des cultures (Figure 6). Les équipements s'accompagnent d'un important développement des nouvelles technologies et de l'électronique embarquée améliorant l'efficacité du matériel. La mesure, le diagnostic et la décision peuvent être réalisés en temps réel lors d'une opération culturale (modulation d'une dose d'herbicide en fonction de la présence de mauvaises herbes) ou en temps différé à travers, par exemple l'analyse d'images satellites pour construire une carte de préconisation d'un apport d'eau ou de fertilisant..) L'élevage de précision est également en nette progression.



Fig. 6 : L'agriculture de précision {la bonne dose, au bon endroit, au bon moment}

C. L'agriculture numérique

Une extension de ce concept d'agriculture de précision est l'agriculture numérique. Comme toute l'économie, l'agriculture entre dans l'ère du numérique. Elle s'approprie les outils du numérique qui, déployés par et pour d'autres secteurs de l'économie numérique (finance, téléphonie, commerce,...) créent un nouveau gisement de données, le «Big Data» agricole, et rend possible la création de nouvelles connaissances, de nouveaux services et outils d'aide à la décision qui améliorent la précision et la pertinence des interventions ou des choix stratégiques des professionnels de l'agriculture. Les innovations technologiques et organisationnelles de «l'e-agriculture» bouleverseront la production agricole proprement dite, l'ensemble des produits et services à l'agriculture, voire les relations entre acteurs. Par ailleurs, ce domaine constitue un marché émergent significatif pour des PME et start-up (nous en avons des exemples marocains). De même de nombreuses multinationales de l'agrofourniture se positionnent aujourd'hui sur ce marché des services d'e-agriculture. L'époque de la mécanisation a permis aux exploitations agricoles de passer du stade artisanal au stade industriel, grâce à l'intégration des technologies de l'information et de la communication l'agriculture passe à une agriculture numérique (agriculture 3.0).

D. La robotique agricole

La robotique est, avec les capteurs, une voie technologique de rupture qui va guider les changements des systèmes et des pratiques agricoles dans le futur. Il ne s'agira certainement pas simplement de robotiser des systèmes de production existants mais plutôt de créer de nouveaux systèmes de production.

La robotique agricole embrasse des situations très diverses. Les robots de traite, fixes, et maintenant les robots d'affouragement ou d'intervention sous serre (qui évoluent dans des milieux clos et structurés) sont déjà bien implantés. Les robots autonomes pour accomplir différents types de tâches (pulvérisation, récolte...) demeurent encore au stade du développement même si des progrès ont été réalisés ces dernières années en termes de mobilité autonome dans des milieux ouverts.

E. Génétique et biotechnologies

Les deux dernières décennies ont été aussi porteuses de progrès scientifiques et technologiques exceptionnels en génomique structurale et fonctionnelle, en biotechnologies, en analyse de la diversité génétique, en modélisation du fonctionnement de la plante et du peuplement végétal dans leur environnement. Ces progrès sont le résultat de réelles synergies interdisciplinaires créant de nouvelles interfaces entre la biologie, la chimie, les mathématiques et la physique. Ils génèrent des connaissances et des techniques agronomiques nouvelles ainsi que de nouveaux produits. Sur le plan scientifique, le numérique prolonge et amplifie cette révolution.

Les objectifs de l'amélioration et de la sélection végétale peuvent être illustrés par l'exemple du riz (qui connaît des avancées tangibles) Ils concernent les caractères (résistance aux maladies et la réduction des pesticides, la tolérance à la sécheresse

ou à la chaleur) l'adéquation de la qualité aux besoins nutritionnels (biofortification) et l'efficience (utilisation de l'eau, fixation de l'azote, la photosynthèse (riz C4) ...) (Figure 6) Les ressources génétiques demeurent une clé de ces recherches : leur conservation, leur caractérisation et leur utilisation exigent un renforcement des infrastructures de recherche.

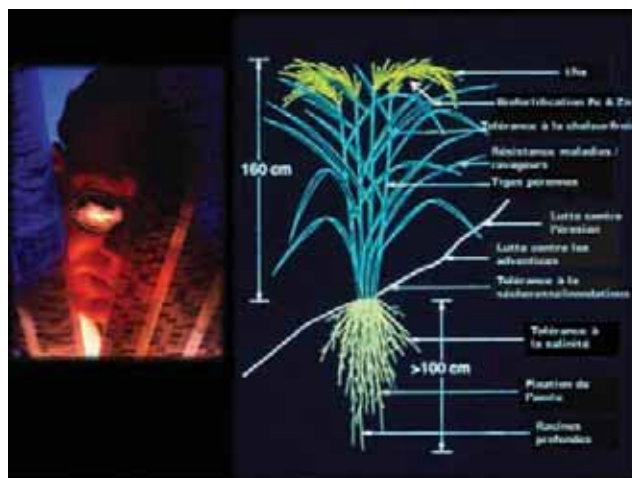


Fig. 6 : Amélioration génétique du riz

Dans le domaine de l'élevage on recherche la robustesse des animaux à travers l'analyse des interactions «génétique – environnement et pratiques d'élevage» dans un objectif d'adaptation aux conditions locales.

Je voudrais, à titre illustratif, vous présenter 3 réalisations phare de l'INRA Maroc dans ces domaines. Elles concernent :

- a. **L'arganier** : Un programme d'amélioration génétique d'envergure a été lancé (notre Académie y contribue). Il a permis à ce jour l'identification génétique et moléculaire et la sélection de plus de 300 génotypes d'arganiers performants et productifs et l'installation des premiers parc à bois dans la perspective de développement de l'arganiculture dans le cadre du Plan Maroc Vert. Une grande prouesse technique a été la réussite de l'enracinement (Figure 7).



Fig.7 : Régénération par organogénèse et enracinement de l'arganier (source INRA/MAROC)

b. L'olivier: L'étude du Polymorphisme de l'ADN cytoplasmique dans la collection mondiale de Marrakech (600 variétés) a permis la caractérisation génétique des variétés d'olivier dans le circum méditerranéen. Elle a mis en évidence 3 pools génétiques et la présence de la lignée maternelle (originaires de l'Est de la Méditerranée) chez la majorité des variétés de la collection (83%) (Figure 8)

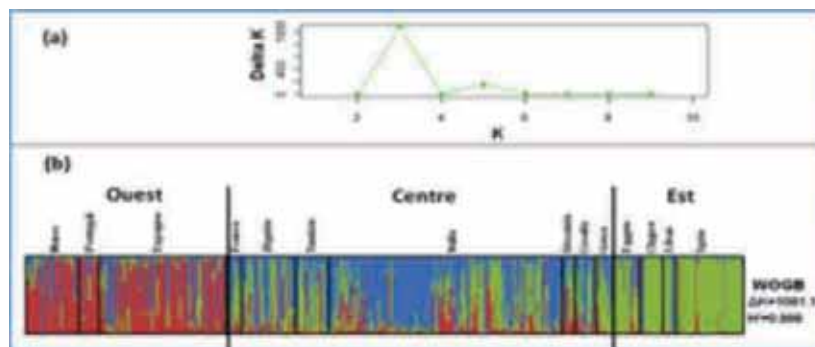


Fig. 8 : Polymorphisme de l'ADN cytoplasmique dans la collection mondiale de Marrakech -
Source (INRA/MAROC)

c. Les petits ruminants (ovins et caprins) : Dans le cadre du Consortium International de Recherche dénommé NextGen («Next generation methods to preserve farm animal biodiversity by optimizing present and future breeding options») L'INRA/Maroc a séquençé les génomes complets (≈ 3 milliards de paires de nucléotides) d'un échantillon d'ovins et de caprins représentant la grande variabilité environnementale et raciale présente au Maroc. Ce séquençage a été effectué à une profondeur très importante générant une base de données colossale et inégalée, faisant du Maroc le pays où les ovins et les caprins sont les plus connus et les mieux caractérisés génétiquement à l'échelle mondiale. Une fois validés fonctionnellement, les gènes potentiellement impliqués dans la production ou dans l'adaptation à l'environnement devraient être intégrés dans les schémas d'amélioration via les techniques de sélection assistée par marqueurs génétiques afin d'améliorer la production zootechnique dans des régions où l'élevage est jusqu'à présent difficile et marqué par une faible productivité (Figure 9)

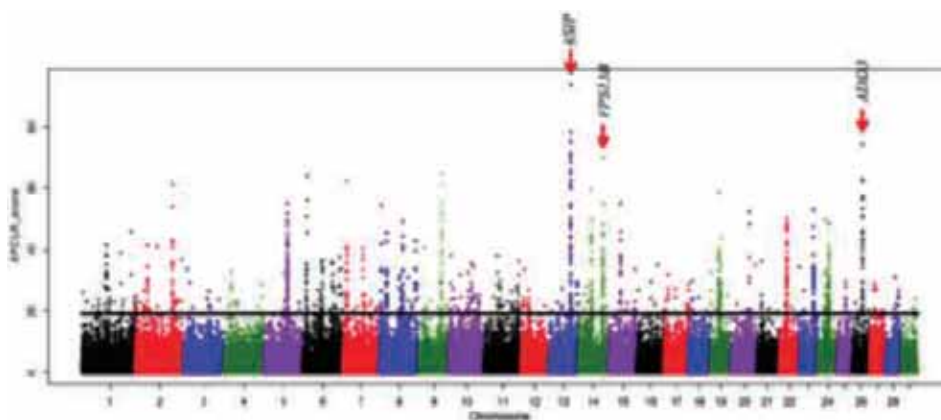


Fig. 9 : Signatures de sélection le long du génome chez la race Draa par rapport aux autres populations (Black & Northern)

(Source : Benjelloun et al. 2015. Front. Genet.)

4- Conclusion

Je ne saurais donc terminer sans souligner que la recherche agronomique nationale est appelée à consolider son rôle vital en tant que facteur clé d'anticipation stratégique, d'accumulation du progrès technologique et d'appropriation de celui-ci par les agriculteurs et les opérateurs du système agroalimentaire. Elle ne doit plus être considérée comme une activité d'appoint et de support du développement agricole et rural mais comme un choix stratégique contribuant par son contenu et ses implications à la consolidation de la sécurité alimentaire et nutritionnelle de notre pays. Cela suppose des investissements dans la recherche agronomique à la hauteur des ambitions, des ressources humaines qualifiées et motivées et un engagement volontariste dans des partenariats régionaux et internationaux permettant le saut considérable dans l'avance technologique auquel aspire le Maroc.

Je vous remercie de votre attention.

Références:

- Ait-Kadi, M., "Impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire", Acts of the International Meeting on Adapting to Climate Change in Morocco, pp95-108, Royal Institute for Strategic Studies, Rabat, 16 October, 2009.
- Ait-Kadi, M. "Les Politiques de l'Eau et la Sécurité Alimentaire au Maroc à l'Aube du 21^{ème} Siècle" – Exposé Introductif, Publications de l'Académie du Royaume du Maroc, Session d'Automne 2000, pp33-75, Rabat, 20-22 November, 2000.
- Ait-Kadi, M. «La crise alimentaire mondiale 2007-2008», Bulletin de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques N°5, 2009.

- Bournigal J-M et al, «30 projets pour une agriculture compétitive et respectueuse de l'environnement» #agriculture innovation2025, octobre 2015.
- Carlsson, G. & all «Closing the Gaps», Report of the Commission on Climate Change and Development, SWMIDC, 2009.
- Donella H. Meadows et al «The limits to Growth», Universe Books, New York, 1972.
- Evans, A. The Feeding of the Nine Billion: Global Food Security for the 21st Century. Chatham House Report. January 2009. [http://www.chathamhouse.org.uk/files/13179_r0109food.pdf].
- Foley, J. A & all, «Solutions for a cultivated planet», Analysis, Nature, Vol 478, 20 October, 2011.
- Foresight, «The future of food and farming – Challenges and choices for global sustainability», Executive Summary, UK GO-Science, 2011.
- Gulbenkian Think Tank on Water and the future of Humanity “Water and the future of humanity – Revisiting water security», Springer, 2014.
- INRA & CIRAD, «Agrimonde - Scenarios and challenges for feeding the world in 2050», Summary Report, December 2009.
- Johan Rockström et al «A safe operating space for humanity» Nature, Vol 461, 2009.
- Kropff M. et al «Food for all – sustainable nutrition security» Wageningen UR 2013.
- Leridon, H & De Marsily, G «Démographie, Climat et Alimentation Mondiale», Académie des Sciences, Institut de France, RST N°32, 2011.
- Mazoyer M. et al «Histoire des agricultures du monde – du néolithique à la crise contemporaine» Editions du Seuil, 2002.
- Molden, D. «Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture», IWMI, 2007 Nelson G.C. & all “Food Security, Farming and Climate Change to 2050 – Scenarios, results, policy options”, International Food Policy Research Institute, 2010.
- Smith, P. & all «Competition for land» pp 2941-2958, Philosophical Transactions of The Royal Society, Vol 365, N° 1554, September, 2010.
- Torquebiau E. «Changement climatique et agricultures du monde» Editions Quae, 2015.
- Von Braun. J. «The Rise in Food and Agricultural Prices – Implications for Morocco» Royal Institute of Strategic Studies (IRES), Rabat, March, 2008.

Séance VI :
L'ÉTHIQUE EN SCIENCE

LA PROTECTION DES DONNÉES À CARACTÈRE PERSONNEL FACE À LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE : LE CAS DU MAROC

Pr. Saïd IHRAÏ

*Président de la Commission Nationale
de Contrôle de la Protection des Données
à Caractère Personnel - CNDP -*



Introduction :

L'objectif de cette intervention est de tenter d'analyser les rapports qui s'établissent entre la science définie comme étant «un ensemble cohérent de connaissances relatives à certaines catégories de faits, d'objets ou de phénomènes obéissant à des lois (de la nature) et vérifiées par des méthodes expérimentales» et l'éthique. Cette définition, comme celle de l'éthique est tirée du dictionnaire Larousse.

Le concept d'éthique, quant à lui, constitue un ensemble de valeurs et principes guidant des comportements sociaux et professionnels et inspirant des règles déontologiques tirées de principes moraux, religieux et juridiques». Les concepts d'éthique se présentent souvent sous forme de codes de bonne conduite, de codes et déontologie et de codes de bonnes pratiques.

Le numérique est «une représentation d'informations à traiter, stocker, reproduire, archivées au moyen de chiffres ¹.

Le développement de la science ou plutôt des sciences a généré dans toute l'histoire de l'humanité des transformations économiques, sociales et culturelles.

En rapport avec notre propos, il s'agira essentiellement des transformations dans le domaine des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC).

1- Scherer (Eric) : La révolution numérique, Glossaire, Paris, Dalloz, 2009 p.141.

Après l'époque industrielle, l'humanité est entrée dans l'ère des NTIC, communément appelée l'ère numérique. Ce qui caractérise cette nouvelle ère, c'est le développement sans précédent de nouvelles technologies qui ont la particularité d'être de plus en plus intrusives dans la vie privée des personnes. Selon un rapport rendu public récemment, l'impact de ces nouvelles technologies se fera sentir d'ici 2025, dans les secteurs suivants: celui de l'Internet mobiles, celui des objets connectés à Internet, de la robotique avancée, celui des nanomatériaux, celui du Cloud computing et celui du séquençage du génome humain et dans bien d'autres domaines ².

Cette accélération du rythme du développement de ces nouvelles technologies et de la recherche scientifique en général, paraît très difficile à maîtriser. D'un côté les NTIC facilitent la vie des personnes en améliorant leurs conditions de vie, leur manières de communiquer, de se nourrir de se mouvoir. De l'autre, elles réduisent leurs espaces de liberté, leurs vies privées et l'exercice de leurs droits fondamentaux.

Le danger vient du fait que si les données personnelles constituent une source considérable de revenus pour les entreprises qui travaillent dans ce secteur ; certaines estimations, en effet, évaluent les profits dégagés par cette activité comme étant égaux à ceux générés par l'exploitation de gisements d'hydrocarbures partout dans le monde. Un véritable trésor, en somme. Le traitement de ces données peut en revanche, selon certains observateurs avisés «engendrer des erreurs massives et donc de mauvaises décisions d'une ampleur catastrophique».

C'est donc à l'éthique et à la loi qu'incombe le devoir de contenir la poussée exercée par toutes ces transformations et d'encadrer l'ensemble de ces évolutions. C'est aussi à l'éthique et à la loi qu'est assignée la tâche de contenir les appétits suscités par la détention et la vente de plusieurs milliards de données personnelles dont la valeur est estimée pour certaines entreprises à plus de 6000 milliards de dollars US. Il revient aussi à l'éthique et à la loi d'atténuer les effets de la surveillance de masse exercée sur les citoyens.

A ce propos, il y a lieu de rappeler que la loi marocaine 09/08, dans un effort de conciliation entre la science, l'éthique et la loi, a inscrit dans son article 1er que «l'informatique est au service du citoyen» et elle ajoute que «l'informatique ne doit pas porter atteinte à l'identité, aux droits et libertés collectives et individuelles de l'homme. Elle ne doit pas constituer un moyen de divulguer des secrets de la vie privée des citoyens» ³.

Il sera procédé brièvement à l'analyse des rapports qu'entretiennent la science de l'informatique et des algorithmes avec l'Ethique dans ses dimensions morale, déontologique et juridique à travers la loi 09-08 portant création d'une Autorité de contrôle de la protection des données à caractère personnel et de la vie privée au Maroc. Cette analyse portera donc, dans une première partie sur la dimension éthique du dispositif légal au Maroc, une 2^{ème} sera réservée à la mise en œuvre des dispositions éthiques et légales dans ce domaine et enfin dans la dernière partie nous essaierons d'établir un bilan d'étape de l'action de la CNDP.

2- Cf le Monde du 14/10/2015.

3- Royaume du Maroc, Direction de l'Imprimerie officielle : Protection des droits civiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel, 2010, 1ère ed., Documents juridiques marocains, Secrétariat général du Gouvernement, 41p.

I. Les fondements éthiques du dispositif légal au Maroc

Le terme légal est pris dans un sens large. Il inclut à la fois la loi 09-08 du 18 février 2009, mais aussi l'article 24 de la Constitution marocaine de 2011 ainsi que les engagements internationaux du Maroc. A cet égard, il y a lieu de garder à l'esprit le fait que le préambule de la constitution ci-dessus-citée, dispose clairement que ces derniers priment «sur le droit interne du pays».

En relation avec notre propos, il faudrait signaler que le Maroc est en train de finaliser son adhésion à la Convention 108 du Conseil de l'Europe de 1981 et à son Protocole Additionnel de 2001. Ces instruments juridiques sont considérés comme étant les principaux standards internationaux en matière de protection des données à caractère personnel et de la vie privée. De ce fait et en vertu du préambule de la constitution de 2011, ces standards l'emportent, en cas d'antinomie, sur le droit interne.

La stratégie nationale pour la société de l'information et de l'économie numérique, Maroc-Numeric 2013, développe les actions à mener dans le domaine de la confiance numérique. Il s'agit, entre autre, des actions qui concernent la protection des données à caractère personnel, d'une part, et la mise en place d'une Commission Nationale de Contrôle de la protection de ces données, d'autre part. Deux initiatives avaient été lancées : mettre à niveau le cadre législatif et mettre en place les structures organisationnelles appropriées.

Concernant la synthèse des actions à mener dans le domaine de la confiance numérique, les actions 42 et 48 concernent la protection des données personnelles (OP) et la mise en place de la Commission Nationale du Contrôle de la Protection des Données à Caractère Personnel (CNOP)

La loi 09/08 s'est fixé trois objectifs :

- Faciliter l'insertion du Maroc dans la mondialisation et accompagner les opérateurs économiques en vue de leur intégration dans l'économie de la société numérique ;
- Protégée la vie privée et les DP des individus, protection que viendra consacrée la constitution du 1^{er} juillet 2011, dans son article 24 ;
- Permettre la «colocalisation» des entreprises européennes au Maroc, encourager l'afflux des investissements étrangers et la création d'emplois (100000 emplois prévus pour 2014). L'offshoring sera le septième secteur retenu par le Plan de développement industriel Emergence.

Les enjeux sont donc énormes.

Nous examinerons ici l'inscription dans la loi 09/08 des droits des citoyens par la proclamation des droits de la personne concernée (A), avant d'exposer les obligations des responsables de traitement de DP (B) et la protection accordée aux transferts internationaux de DP (C).

4- Et pour clore le débat sur la valeur juridique du préambule qui, depuis de longues années, anime les discussions entre les constitutionnalistes. La Constitution marocaine de 2011 précise que le préambule de la Constitution «fait partie intégrante de la présente Constitution.»

A. La protection des données personnelles par la proclamation des droits de la personne concernée (Loi 09-08)

Six dispositions juridiques, toutes inspirées de principes éthiques, garantissent les droits des personnes concernées par le traitement de leurs données personnelles.

La première stipule la nécessité de veiller à ce que les données personnelles soient traitées loyalement, licitement et qu'elles soient exactes, pertinentes et non excessives ;

La seconde impose le respect de l'obligation d'avoir le consentement préalable de la personne concernée, «consentement qui doit être libre, clair et non équivoque» ;

La troisième consacre le droit à l'information de la personne concernée lors de la collecte des données personnelles, droit qui suppose le respect de la finalité du traitement, la révélation de l'origine des données recueillies et de leur destinataire, et l'identification du responsable du traitement etc. ;

La quatrième prévoit le droit d'accès de la personne concernée aux informations collectées;

La cinquième, le droit de rectification qui implique : l'actualisation des données personnelles, leur rectification, le cas échéant et l'effacement ou le verrouillage du traitement non conforme à la loi, etc.

La sixième garantit le droit d'opposition au traitement des données personnelles : Opposition à toute utilisation à des fins de prospection commerciale; Interdiction de la prospection directe auprès d'un destinataire sans le consentement de la personne concernée; obligation d'indiquer les coordonnées de l'instance à laquelle la personne concernée peut transmettre son refus de continuer à recevoir les appels au moyen d'automates, de télécopieurs ou de courriers électroniques.

B. La protection des données personnelles par les obligations mises à la charge du responsable du traitement

Par ailleurs, la protection des personnes concernées repose sur les obligations imposées par la loi aux responsables de traitement de données personnelles. Tout d'abord, le responsable doit déclarer à la CNDP tout traitement qu'il met en œuvre. Si les données collectées sont réputées «sensibles», il doit de plus obtenir l'autorisation de la Commission.

Notons que la CNDP a la capacité de transformer une déclaration en une demande d'autorisation «... lorsque le traitement envisagé présente des dangers manifestes pour le respect et la protection de la vie privée et des libertés et droits fondamentaux» de la personne concernée (art. 20 de la loi).

D'autre part, sur le responsable de traitement pèse une obligation, directement tirée des principes moraux et éthiques, de confidentialité et de sécurité. Pour se faire, les traitements doivent faire l'objet de mesures techniques appropriées et de mesures de sécurité efficaces.

Le responsable de traitement mais aussi toute personne agissant pour son compte ou pour le sous-traitant, est tenu au respect du secret professionnel. Cette obligation continue de peser sur toutes les personnes ayant participé au traitement des données personnelles, même après avoir cessé d'exercer leurs fonctions.

C. La Protection des données par l'encadrement des transferts des données personnelles

Les transferts de DP vers des Etats n'assurant pas une protection «suffisante» des données personnelles est interdit. Le caractère suffisant s'apprécie selon l'article 43 de la loi 09/08 «notamment en fonction des dispositions législatives en vigueur dans cet Etat, des mesures de sécurité des données personnelles qui y sont appliquées, de la finalité du traitement et de sa durée, de l'origine et de la destination des données traitées».

La CNDP apprécie, selon ces critères, le caractère «suffisant» de la protection assurée par le pays destinataire. La liste des pays reconnus comme assurant une protection suffisante a été établie par la Commission et comporte : les Etats membres de l'UE, les Etats membres de l'Espace Economique Européen (Islande, Norvège, Liechtenstein) et les 11 pays reconnus par l'UE comme assurant une protection adéquate : Andorre, Argentine, Australie, Canada, Suisse etc.

Par ailleurs, la CNDP peut, par décision expresse et motivée, autoriser le transfert des données personnelles lorsqu'il est fait recours par les Responsables de traitement aux clauses contractuelles Type ou aux Règles contraignantes d'entreprises (Binding Corporate Rules, -BCR-).

Enfin, par dérogation au principe de l'interdiction de transfert, le Responsable du traitement peut transférer des données personnelles vers un Etat réputé n'assurant pas une protection «suffisante» des données personnelles «si la personne concernée a consenti expressément à leur transfert, si le transfert est nécessaire à la préservation de l'intérêt public, à la sauvegarde de la vie de la personne concernée etc. (article 44 de la loi) et si l'obligation de transférer découle d'un accord bilatéral ou multilatéral auquel le Maroc est partie».

La confiance numérique se trouve aussi renforcée par la qualité du contrôle de la protection des données personnelles.

II. La mise en œuvre du dispositif légal au Maroc

La CNDP a procédé à la mise en œuvre effective des dispositions légales et réglementaires inscrites dans la loi 09/08. Cette autorité est dotée de pouvoirs importants.

A. Les pouvoirs de l'Autorité de contrôle de la protection

La CNDP dispose tout d'abord d'un pouvoir consultatif par le biais de demandes d'avis, émanant du gouvernement ou du Parlement, sur toutes les questions concernant les données personnelles.

Par ailleurs la Commission est chargée de la mise en œuvre des dispositions relatives aux sanctions. Elle reçoit les plaintes provenant des personnes concernées. Elle est dotée à cet effet par le législateur de larges pouvoirs d'investigation et d'enquête. Elle prononce des mesures à caractère disciplinaire et met en œuvre les procédures de sanctions pénales dissuasives prévues au chapitre VII de la loi (articles 51 à 66).

La CNDP veille aussi à l'application effective des dispositions légales et réglementaires.

B. La mise en œuvre effective des dispositions légales et réglementaires

La CNDP s'attache à atténuer les effets de la «défiance numérique».

Ces effets découlent de l'inexécution des décisions de la CNDP, du non-respect des engagements internationaux en matière de protection des données personnelles, de l'insuffisance des ressources humaines et de la complexité des procédures d'engagement des ressources financières.

Par ailleurs, la Commission invite les responsables de traitement à se mettre en conformité avec la loi. Le délai de mise en conformité a expiré le 14-11-2012 pour les traitements entrepris avant Février 2009.

La CNDP propose aussi des mesures visant le renforcement de la confiance numérique par l'introduction d'amendements à la loi, par la mise en œuvre effective des droits de la personne concernée, le respect par les responsables du traitement de leurs obligations légales.

Le recrutement des ressources humaines suffisantes et l'allègement des procédures d'engagement des ressources financières se sont avérés absolument nécessaires à la consolidation de son indépendance statutaire.

C. Consolider l'indépendance de la CNDP

Toute Autorité de contrôle de la protection des données personnelles, se doit, pour être crédible au plan interne et international, d'être indépendante. Son indépendance est appréciée à l'aune de treize critères et standards internationaux. L'institution doit être créée par la loi, ce qui garantit son indépendance. La nomination de ses membres par le parlement, l'exercice sans aucune entrave de leurs compétences, la durée de leur mandat, ainsi que les conditions relatives à la fin de leurs mandats et les immunités dont ils jouissent durant l'exercice de leurs fonctions, doivent aussi être fixées par la loi. Leur rémunération ne doit pas provenir d'un organe politique. L'exercice d'autres fonctions par les membres et l'existence de conflits d'intérêt sont sanctionnés par la loi.

Par ailleurs, l'Autorité de protection des données personnelles a l'obligation de publier un rapport annuel.

Notons que cinq seulement parmi ces critères, la création de l'institution, la durée du mandat des membres, les conditions de fin du mandat, l'interdiction d'exercer d'autres fonctions et l'interdiction du conflit d'intérêts, sont partagés par l'ensemble des Autorités de protection des OP.

La CNDP recommande un certain nombre d'amendements à la loi susceptibles d'accroître son indépendance à l'égard des pouvoirs publics. L'octroi à l'institution du statut d'une Autorité administrative indépendante et spécialisée dotée de la personnalité morale serait une mesure essentielle à la garantie de cette indépendance. La présentation du rapport annuel de ses activités⁵ devant le parlement, pourrait aussi y contribuer. Des mesures

5- La CNDP a, depuis sa création, publié deux rapports d'activité, correspondants à l'année 2013 et 2014. Le rapport de 2015 est en voie de préparation.

relatives à la gestion de la Commission telles, l'instauration du contrôle financier a posteriori, la possibilité de recruter les ressources humaines par contrat et l'allègement, voire la suppression sur le long terme de la procédure « d'homologation » conforteraient incontestablement l'indépendance de la CNDP.

En attendant l'amélioration du cadre juridique dans lequel s'inscrivent les activités de la CNDP, celle-ci peut se prévaloir, depuis son installation en août 2010, d'un bilan parfaitement honorable en matière de protection des DP.

III. Bilan des activités de la CNDP 2009- 2015

Dès le lancement de ses activités, la CNDP s'est fixée un certain nombre d'objectifs afin de protéger les données personnelles des citoyens. Il lui fallait sensibiliser l'opinion publique à l'importance de la protection des données personnelles et faire connaître la loi, se doter d'une doctrine propre dans les domaines où la loi ne se prononce pas, moderniser les processus de décision et, pour plus de transparence et comme le prévoit la loi, constituer le Registre national des traitements de données personnelles. Elle se devait aussi de développer au plan interne et international une large coopération institutionnelle.

La CNDP conçoit la protection des données personnelles comme un projet national qui exige une concertation permanente avec les groupes professionnels, les grandes entreprises publiques et privées, la société civile, les médias, etc.

Rappelons que la loi 09/08 est promulguée en 2009, et que la CNDP n'est installée qu'en août 2010. En juillet 2011, la protection de la vie privée devient une norme constitutionnelle. Mais, déjà, à peine quatre mois après son installation, début 2011, alors que la Commission n'a pas encore achevé de se mettre en place, de disposer d'un siège et de recruter ses ressources humaines, etc., elle lance ses premières opérations de sensibilisation au profit des opérateurs téléphoniques⁶. Au cours des années suivantes, en effet, la CNDP choisit de donner la priorité à la sensibilisation du plus large public, simples citoyens, opérateurs économiques, responsables de traitements, etc., à la nécessité de protéger les données personnelles et à respecter la loi.

A partir de 2014 la CNDP entame son régime de croisière ; non seulement elle poursuit sa politique de sensibilisation en lançant, notamment, sa première campagne par spots audiovisuels, mais elle assure aussi une veille technologique et assure l'encadrement des traitements⁷.

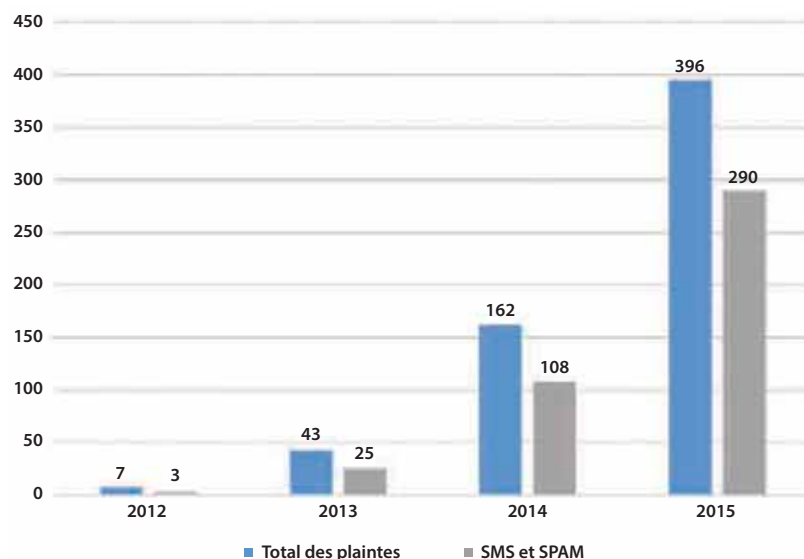
La CNDP reçoit les plaintes⁸, lance les contrôles et met en branle les sanctions contre les contrevenants. Ainsi, au cours l'année 2014, se déroulent les premiers contrôles sur sites Web et sur place : trois cents contrôles ont été effectués et neuf mises en demeure ont été prononcées. Depuis juillet 2015, sept dossiers ont été présentés au Procureur du Roi. Début 2016, les agents de la Commission ont procédé aux premières saisies de matériel.

6- La CNDP a, depuis sa création, participé ou organisé plus de 70 opérations de sensibilisation.

7- 24 délibérations doctrinales, 4000 notifications, des dizaines de demandes d'avis, etc.

8- Plus de 600 jusqu'à aujourd'hui.

Tableau : évolution du nombre de plainte pour violation des DP



Non seulement de simples individus ont fait l'objet de contrôle suite à des plaintes, mais aussi un certain nombre de secteurs d'activité ont été contrôlés, parmi lesquelles on compte le tourisme, l'hôtellerie et la restauration et la grande distribution, les sociétés de service, le transport, les professions libérales (avocats), les écoles et l'offshoring. Ces contrôles se sont déroulés dans dix villes (Casa, Rabat, Mohammedia, Settlat, Meknès, Benslimane, Skhirat, Agadir, Bouznika, Marrakech) et ont porté sur les activités suivantes: la vidéosurveillance, la prospection commerciale, les données biométriques, les bases de données importées et la gestion des dossiers médicaux

Par ailleurs, la CNDP a indéniablement acquis rapidement une certaine notoriété internationale en développant une large coopération avec les organismes similaires et en participant dans les instances extérieures les plus diverses à la réflexion sur l'amélioration du contrôle de la protection des données personnelles dans un monde en constante et rapide évolution technologique.

C'est ainsi que la Commission adhère, fin 2010, à l'Association francophone des Autorités de contrôle de la protection des données personnelles - AFAPDP- et obtenait fin 2011 son accréditation auprès de la Conférence internationale des Autorités de protection et des Commissaires à la protection des données personnelles et à la vie privée - ICDPPC-, dont la 38^{ème} conférence de l'ICDPPC se déroulera d'ailleurs à Marrakech en octobre 2016.

Par ailleurs, la CNDP a contribué à l'adhésion du Maroc à la Convention 108 du Conseil de l'Europe, comme il a été relevé plus haut, et participé en avril 2015 à Berlin à la réunion du Groupe de travail international sur la protection des données dans les télécommunications -IWGDPT-

En effet, la protection des données personnelles est une problématique mondiale qui nécessite une action concertée et coordonnée, un échange d'expérience avec les autres Autorités. La coopération internationale permet de consolider la position du Maroc sur le plan international dans le domaine de la protection des données personnelles et de la vie privée.

Conclusion

Je voudrais, avant de conclure mon intervention, rappeler les points suivants :

1. L'Ethique est absolument indispensable dans le domaine du numérique comme dans les autres domaines de la Science, dans la mesure où les enjeux financiers et économiques sont énormes. Le Big data constitué par la collecte et le traitement de plusieurs milliards, d'informations et de données personnelles, fait peser d'une part, d'énormes risques sur les économies des Etats et sur les libertés des citoyens, mais recèle, des promesses inimaginables d'améliorations de la vie des citoyens, et du développement de la Recherche Scientifique et de l'innovation, d'autre part.
2. Un groupe d'entreprises internationales ramassent en dehors de tout contrôle, à travers les moteurs de recherche, les réseaux sociaux et d'autres moyens d'action, les données personnelles de plusieurs centaines de millions de personnes.

En dehors d'une Convention internationale en la matière, Convention en cours d'élaboration, le rôle de protecteur des données personnelles des citoyens revient aux Etats lesquels, en dehors de ceux de l'UE et des USA, se trouvent démunis face au savoir-faire et aux appétits des grandes sociétés du numérique. Les grandes entreprises américaines demeurent les maîtres de la science numérique dans le monde. Un observateur averti de la révolution numérique écrit à ce sujet «un algorithme peut reconstruire les valeurs variables cachées et prendre des décisions sur ces valeurs. Cette façon de faire peut être contraire à l'éthique ou même se révéler illégales».

3. A l'heure de la surveillance de masse et de la domination du monde numérique par les GAFA (les quatre grandes entreprises américaines, Google, Apple, Facebook, Amazon), la question qui vient à l'esprit peut se décliner ainsi : comment protéger la vie privée et les données personnelles des citoyens dans le monde ? Comment prémunir ces derniers contre les appétits de ces entreprises face au Big data et à la surveillance de masse des Etats ?
4. Chaque Etat y apporte sa réponse dans sa loi nationale, loi ordinaire ou Constitution, en attendant l'adoption par les Nations Unies d'une Convention Internationale dont les dispositions seraient contraignantes pour tous les Etats. Les Nations Unies viennent d'adopter récemment une simple résolution soumettant les droits numériques aux mêmes conditions de protection que celles réservées aux droits de l'homme actuellement.

L'Organisation a même procédé à la nomination d'un Superviseur International des données personnelles et de la vie privée.

Ceci nous ramène au lien qui existe entre l’Ethique et la loi. Le passage d’une règle morale et déontologique puisée dans l’Ethique, à une norme de droit positif contraignante, est salutaire à cet égard et révèle la relation étroite qui existe entre l’Ethique et la règle juridique.

5. En exigeant l’installation de «serveurs» abritant les données les plus sensibles pour la sécurité de l’Etat et la vie privée des citoyens sur le territoire national, les Etats, ont décidé d’un commun accord, d’étendre leurs contrôles aux traitements des données personnelles de leurs citoyens. Ils s’imposent et imposent aux entreprises publiques et privées nationales et internationales le recours à des règles éthiques et légales, visant à promouvoir les techniques et les valeurs scientifiques les plus protectrices de la vie privée et des données à caractère personnel.

RAPPORT D'ACTIVITÉ
2015 - 2016

RAPPORT D'ACTIVITÉS 2015-2016

Pr. Omar FASSI-FEHRI

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



Royaume du Maroc
Académie Hassan II des Sciences et Techniques



Session plénière solennelle 2016
Rapport d'activités SP 2015- SP 2016

Actions réalisées par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques durant l'année 2015 dans le cadre de ses missions telles que fixées par la Loi l'instituant.



Mission I - Promotion de la recherche scientifique et technologique et financement de projets de recherche

Activité I.1 : Réunions des organes directeurs du 15/2/2015 au 15/2/2016

<i>Organe directeur</i>		<i>Nombre de réunions</i>
		<i>2015-2016</i>
Conseil d'Académie		6
Commission des Travaux		5
Réunion commune Directeurs de Collèges, Commission des travaux, Conseil d'Académie		1
Collèges Scientifiques	Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique	9
	Sciences Physiques et Chimiques	6
	Sciences et Techniques du Vivant	10
	Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer	5
	Etudes Stratégiques et Développement Economiques	0
	Sciences de la Modélisation et de l'Information	1

Activités I.2 : Organisation des sessions ordinaires thématiques

<i>Thèmes traités</i>	<i>Date</i>
Modélisation et prospective économique	28 mars 2015
L' Accident Vasculaire Cérébral (AVC)	28 avril 2015
Promotion et développement de la recherche scientifique	18 mai 2015
Les maladies génétiques au Maroc	19 mai 2015
Variabilité génomique du chêne-liège et multiplication clonale par embryogenèse somatique	29 mai 2015
Rencontre sur l' aéronautique	17 septembre 2015
Présentation du rapport sur l' évaluation du programme d'appui à la recherche	21 septembre 2015
Hommage au Pr. Alexander Grothendieck	09 novembre 2015
Enseignement des Sciences	17 décembre 2015
Adoption du projet de programme de la session plénière solennelle 2016	05 janvier 2016

Activité I.3 : Préparation de la session plénière solennelle 2016 qui coïncide avec le 10^{ème} anniversaire de l' installation de l' Académie.

- *Thème général de la session plénière 2016 :*
«La Science dans tous ses états»
- *Adoption du programme du «10^{ème} anniversaire»*

**Membres de la Commission Préparatoire
validée par la Commission des Travaux**

Pr. Omar FASSI-FEHRI

Pr. Catherine BRECHIGNAC

Pr. Mostapha BOUSMINA

Pr. Taïeb CHKILI

Pr. Ali BOUKHARI

Mr. Mohamed SMANI

Activité I.4 : Préparation du programme de la commémoration du 10^{ème} anniversaire de l'Académie (1/2)

Projet de manifestations scientifiques retenues			
Lieu	Date	Thème	Coordonnateur
Fès – Université Euro-Méditerranéenne	11-13 Janvier 2016	L'Industrie Automobile (Rencontre préparatoire) – Réalisée	M. Bousmina
Rabat- ENS	19 Février 2016	Restauration de la fertilité des sols : un défi mondial, une nécessité pour le Maroc	A. Sasson, A. Filali-Maltouf
Dakhla - Wilaya	29 Février 2016	Environnement et développement dans les provinces sahariennes	A. El Hassani, A. Sasson
Fès – Faculté de Médecine de Fès	8 Mars 2016	L'eau et le développement	A. El Hassani
Marrakech – Université Cadi Ayyad	28 Mars 2016	Les sciences de l'Univers	O. Fassi-Fehri
Rabat – Faculté des Sciences de l'éducation	20 Avril 2016	L'enseignement des sciences Humaines et sociales dans les formations scientifiques et technologiques	A. Boukhari
Tanger - Université	22 Avril 2016	Conditions du développement industriel	N. El Aoufi
Tanger – FST et ENSA de Tanger	22, 23 Avril 2016	Les formations technologiques	M. Bennouna
Rabat - Académie	16-18 Mai 2016	Rencontre Africaine	M. Bousmina
Rabat - Académie	Avril – Mai 2016	L'industrie automobile	M. Bousmina
Rabat – Faculté des Sciences	26-28 Mai 2016	Les Doctorales : Journées des Doctorants CPM2016	E. H. Saïdi
Marrakech – Université Cadi Ayyad	1 et 2 Juin 2016	Transition touristique et développement territorial en Méditerranée	M. Berriane
Jorf Lasfar à l'OCP	12 Juillet 2016	De la recherche à l'industrialisation : quel éclairage permet d'apporter l'échelle de mesure des niveaux de maturité des technologies (TRLs)	M. Smani

Activité I.4 : Préparation du programme de la commémoration du 10^{ème} anniversaire de l'Académie (2/2)

Cycle de Conférences retenues			
Lieu	Date	Titre de la Conférence	Conférencier
Rabat	14 mars 2016	«Climat : y voir clair pour agir»	Pr. Sébastien BALIBAR
Marrakech	28 mars 2016	«Trous noirs gloutons»	Pr. Françoise Combes
Casablanca	11 avril 2016	«Les Big Data et l'Industrie»	Pr. Emmanuel Bacry
Rabat	11 avril 2016	«Ce que nous devons à Einstein»	Pr. Serge Haroche
Rabat	27 avril 2016	«Les grandes avancées de la génétique au profit des patients»	Pr. Arnold Munnich
Rabat	10 mai 2016	« »	Pr. Yves Lévy
Rabat	Octobre 2016	«les terres rares et métaux stratégiques»
.....	«Demain le climat»	Pr. Anny Casenave

Activité I.5 : Projets de recherche soutenus dans le cadre de l'appel d'offres 2007-2008

Projet	Coordonnateur du projet & son institution	Montant total accordé (DH)	Montant versé (DH)
1- Valorisation des ressources végétales marocaines : Exploitation des fibres végétales dans le domaine des composites fonctionnels	Hamid KADDAMI U. Cadi Ayyad	1 623 800	1 623 800
2- Synthèse par voie catalytique homogène et hétérogène du biodiésel à partir d'huiles végétales usagées	Mohammed KACIMI U. Mohammed V-Agdal	1 301 475	1 301 475
3- Patrimoine géologique et géodiversité du Maroc : L' exemple de la région de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër	Abdelfatah TAHIRI U. Mohammed V-Agdal / Institut scientifique	600 584	600 584
4- Conception et construction d' une station pilote innovante pour le traitement des eaux usées pour les petites agglomérations et complexes touristiques en zones côtières (RALBI)	Omar ASSOBHEI U. Chouaib Doukkali	1 305 000	1 305 000
5- Prospection de sites pour les futurs "Extremely Large Telescopes (ELT)"	Zouhair BENKHALDOUN U. Cadi Ayyad	410 000	410 000
6- Nanocomposites polymères à base d' argile marocaine et mise au point des nanomatériaux fonctionnels	El Mokhtar ESSASSI/Mostapha BOUSMINA INANOTECH/MAScIR	21 736 000	10 072 000
7- Contribution au développement à l' échelle internationale de la production de l' énergie par la voie de la fusion contrôlée (Programme ITER) & Applications des Technologies plasmas	Denoun SAIFAOU U. Hassan II-Ain Chock	230 000	160 000
8- Réseau Théorie des Systèmes	Abdelhaq EL JAI U. de Perpignan Partenaire au Maroc : Larbi AFIFI U. Hassan II-Ain Chock	1 825 000	1 825 000

Activité I.5 : Projets de recherche soutenus dans le cadre de l'appel d'offres 2007-2008 (Suite 1)

Projet	Coordonnateur du projet & son institution	Montant total accordé (DH)	Montant versé (DH)
9- Mathématiques et leurs applications	Youssef OUKNINE U. Cadi Ayyad Abdelmalek AZIZI U. Mohammed Premier	1 890 000	1 890 000
10- Etude génomique et immunologique de la tuberculose dans la population marocaine (2008-2012)	Rajae ELAOUAD Ministère de la santé / Institut National d' Hygiène	4 303 912	4 303 912
11- Etude de l' efficacité de la consommation de l' huile d' argan sur le profil lipidique et les statuts anti-oxydant et hormonal et détermination de l' effet hydratant de la peau chez les femmes ménopausées	Zoubida CHARROUF Association Ibn Al Baytar / U. Mohammed V-Agdal	384 000	384 000
12- Epidémiologie prospective de l' accident vasculaire cérébral ischémique ; rôle des affections cardiaques, des facteurs nutritionnels, biologiques et génétiques	My El Mostafa EL ALAOUI FARIS U. Mohammed V-Souissi	4 069,005	4 069,005
13- COHORTE ESPOIR MAROC : Etude et Suivi des Polyarthrites Indifférenciées Récentes	Najja HAJJAJ-HASSOUNI U. Mohammed V-Souissi,	250 000	250 000
14- Etude de la variabilité génomique du chêne liège (<i>Quercus suber L.</i>) et multiplication clonale par embryogénèse somatique	Ahmed LAMARTI U. Abdelmalek Essaâdi	2 499 500	2 499 500
15- Caractérisation génétique et moléculaire et multiplication par microbouturage d' arganiers adaptés à des conditions éco-climatiques extrêmes	Abdelkarim FILALI-MALTOUF U. Mohammed V-Agdal	2 389 340	949 387

Activité I.5 : Projets de recherche soutenus dans le cadre de l'appel d'offres 2007-2008 (Suite 2)

Projet	Coordonnateur du projet & son institution	Montant total accordé (DH)	Montant versé (DH)
16- Systèmes territoriaux et articulation du local et du régional	Mohamed BERRIANE U. Mohammed V-Agdal	804 000	804 000
17- Economie de la Propriété Intellectuelle au Maroc & Comparaison aux Autres Pays Emergents	Ahmed DRIOUCHI U. Al Akhawayn	524 650	524 650
Totaux		46 146 266	32 972 313

Activité I.5 : Retombées des projets de recherche soutenus dans le cadre de l'appel d'offres 2007-2008

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations			
Chercheurs / Médecins	Post doctorants	Étudiants		Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés/sous presse		Conférences et communications orales	Brevets	08 Distinctions/Prix	
386	10	Doctorat	182	75	94	129	Directement associés aux projets	195	264 Internationales	02	110 Manifestations scientifiques organisées	
		Eleve ingénieur	31								28 Collaborations nationales & internationales	
		Master	137				Associés aux thèmes des projets	257	73 Nationales		05 Financement de nouveaux projets	
		Licence	60								06 Partenariats avec le secteur public/privé	
		Total	410				Total	452	337		01 Construction de station pilote de traitement des eaux usées	

Activité I.6: Projets de recherche soutenus dans le cadre de l'appel d'offres 2010-2011

Projet	Coordonnateur du projet & son institution	Montant total accordé (DH)	Montant versé (DH)
1- Systèmes solaires passifs de rafraîchissement des bâtiments	Brahim BENHAMOU U. Cadi Ayyad	3 000 000	1 672 679
2- Combustion des schistes bitumineux en lit fluidisé	Abdelmounaim BOUHAFID U. Cadi Ayyad	1 608 700	1 292 047
3- Extraction par solvant de la matière organique des schistes bitumineux – Etude et valorisation des huiles produites	Hassan HANNACHE U. Hassan II-Mohammedia	2 999 000	800 000
4- Contribution au développement et à la réalisation des cellules photovoltaïques organiques	Mohammed ADDOU U. Abdelmalek Essaâd	3 008 000	2 409 000
5- Impact des changements globaux sur les vertébrés semi-aquatiques le long d'un gradient méditerranéen à pré-saharien	Tahar SLIMANI U. Cadi Ayyad	2 293 200	1 890 811
6- Recherche pluridisciplinaire sur les géomatériaux et les géosites volcaniques du Maroc: Nécessité de leur valorisation et de leur exploitation dans les perspectives d'un développement durable	Iz-eddine EL AMRANI U. Mohammed V-Agdal	2 500 000	800 000
7- Le patrimoine géologique des provinces sahariennes et régions limitrophes (Bas Dra, Ifni)	Omar SADDIQI U. Hassan II-Ain Chock	1 700 000	668 700
8- Méthodes mathématiques et outils de modélisation et simulation pour le cancer	Abdelghani BELLOUQUID U. Cadi Ayyad	1 499 500	851 743
9- Approximation et sous espaces invariants	Omar EL-FALLAH U. Mohammed V-Agdal	1 333 000	461 000
10- Étude épidémiologique et génétique des leucémies myéloïdes aiguës	Sellama NADIFI U. Hassan II-Ain Chock	1 058 000	998 000
11- Valorisation et gestion économique intégrée de l'eau d'irrigation au niveau du bassin versant	Mohammed Rachid DOUKKALI Institut Agronomique et Vétérinaire	2 999 800	800 000
12- Made in Morocco : Industrialisation et développement	Noureddine EL AOUI U. Mohammed V-Agdal	1 587 000	1 117 000
Totaux		25 586 200	13 760 981

Activité I.6 Retombées des projets de recherche soutenus dans le cadre de l'appel d'offres 2010-2011

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations		
Chercheurs / Médecins	Post doctorants	Étudiants		Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés/ sous presse		Conférences et communications orales	Brevets	
179	02	Doctorat	85	07	04	39	Directement associés aux projets	49	92 Internationales	0	46 Manifestations scientifiques organisées
		Eleve ingénieur	06				Associés aux thèmes des projets	12	42 Nationales		10 Collaborations internationales
		Master	43				Total	61	134		05 Partenariats avec le secteur privé
		Licence	05								
		Total	139								

Activité I.7 : Projets de recherche soutenus dans le cadre de la collaboration internationale

Projet	Coordonnateur du projet & son institution	Montant total accordé (DH)	Montant versé (DH)
1- Nanocomposites écologiques à partir de ressources naturelles espagnoles et marocaines	Mohammed LAHCINI U. Cadi Ayyad	1 151 750 (100 000 Euros)	1 151 750
2- Sélection et utilisation de microorganismes rhizosphériques pour l'optimisation de la mycorhization de l'olivier au Maroc	Abdelkarim FILALI-MALTOUF U. Mohammed V-Agdal	1 113 050 (100 000 Euros)	1 113 050
3- Mise au point et production de biofertilisants bactériens pour l'inoculation et l'amélioration de la productivité des légumineuses alimentaires au Maroc	Jamal AURAG U. Mohammed V-Agdal	3 841 600 DH	3 211 200
Totaux		6 106 400	5 476 000

Activité I.7: Retombées des projets de recherche soutenus dans le cadre de la coopération internationale

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations		
Chercheurs	Post doctorants	Étudiants		Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés/ sous presse	Conférences et communications orales	Brevets		
36	01	Doctorat	20	04	02	17	Directement associés aux projets	13	15 Internationales	0	02 Manifestations scientifiques organisées
		Master	18				Associés aux thèmes des projets	0	02 Nationales		
		Licence	02				Total	13	17		
		Total	40								

Retombées de l'ensemble des projets de recherche soutenus par l'Académie

Personnel impliqué				Diplômes obtenus		Production scientifique et technologique			Autres réalisations			
Chercheurs / Médecins	Post doctorants	Étudiants		Autre personnel	Doctorat	Master	Articles publiés/sous presse	Conférences et communications orales	Brevets	158 Manifestations scientifiques organisées		
601	13	Doctorants	287	86	100	185	Directement associés aux projets	257	371 Internationales	02	08 Distinctions/ Prix	
		Élèves ingénieurs	37								38 Collaborations nationales & internationales	
		Master	198				Associés aux thèmes des projets	269	117 Nationales		11 Partenariats avec le secteur public/privé	
		Licence	67								05 Financements de nouveaux projets	
		Total	589				Total	526	488		Emergence et développement de secteurs méconnus à l' échelle nationale	

Activité 1.8 : Edition du rapport sur l'évaluation du programme d'appui à la recherche scientifique

Membres du Comité chargé de la rédaction du rapport

Pr. Mostapha BOUSMINA, Président
Pr. Mohamed AITKADI
Pr. Ali BOUKHARI
Pr. Taïeb CHKILI
Pr. Noureddine El AOUI
Pr. Driss OUAZAR
Mr. Abdelkader YACHOU, Administration de l'Académie

Faits saillants du rapport

- Evaluation de l'expérience de l'Académie en matière d'appui à la recherche S&T:
 - Analyse des retombées scientifiques et socioéconomiques des projets soutenus;
 - Rencontre avec les chefs de projets sur leurs sites: perceptions des chercheurs, difficultés rencontrées, pistes de solutions et propositions d'amélioration;
 - Visite de laboratoires: infrastructure, personnel, etc.
- Positionnement stratégique de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.
- Etablissement d'un Benchmark international.
- Formulation de propositions de recommandations destinées à améliorer ce programme:
 - Architecture et caractéristiques de l'appel d'offres: type de projets à financer, durée et montant à allouer;
 - Modalités et processus de soumission et d'examen des demandes de financement, de sélection des projets à financer et de leur suivi.

Activités I.9 : Soutien aux manifestations scientifiques (1/3)

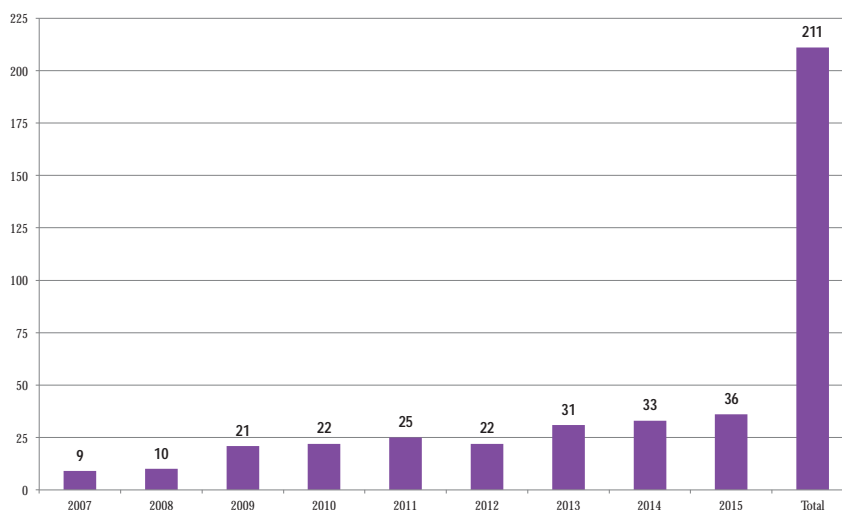
<i>Thème de la manifestation</i>	<i>Date et lieu</i>	<i>Nombre de doctorants soutenus</i>
Premières journées «Jeunes Chercheurs en Géosciences»	20-21 mars 2015, Casablanca	10
Réunion annuelle Maroco-Hispano-Portugaise de la Commission Pétrologie-Géochimie-Géochronologie des Roches Ignées et Métamorphiques	23-27 mars 2015, Casablanca	2
8 ^{ème} édition des rencontres nationales d'électrochimie	26-27 mars 2015, Rabat	30
10 ^{ème} édition du festival du film scientifique	24-28 mars 2015, Marrakech	Contribution financière
International Conference on Electrical and Information Technologies	25-27 mars 2015, Marrakech	Contribution financière
International Conference on the frontiers of polymers and advanced materials	30 mars-02 avril 2015, Marrakech	3
Colloque International sur le thème «Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations associées»	02-04 avril 2015, Agadir	6
Symposium International «The plant Kingdom : Source of drugs, nutraceuticals and cosmetics»	07-10 avril 2015, Marrakech	5
Ecole CIMPA « Géométrie différentielle et algèbres non associatives»	13-24 avril 2015, Marrakech	Contribution financière
12 ^{ème} Congrès de Mécanique	21-24 avril 2015, Casablanca	Contribution financière

Activités I.9 : Soutien aux manifestations scientifiques (2/3)

<i>Thème de la manifestation</i>	<i>Date et lieu</i>	<i>Nombre de doctorants soutenus</i>
Mediterranean Conference on Information and Communication Technology	07-09 mai 2015, Saidia	5
Conférence Internationale : «Codes, Cryptologie et Sécurité de l'Information»	26-28 mai 2015, Rabat	3
Ecole CIMPA «Théorie des Nombres et Applications»	18-29 mai 2015, Oujda	Contribution financière
2 ^{ème} édition du Workshop international sur «Smart cities : villes intelligentes, enjeux économiques et environnementaux»	30 mai 2015, Agadir	10
Journées Doctorales (Centre de Physique Mathématique)	11-13 juin, Rabat	30
8 ^{ème} International Symposium on Inorganic Phosphate Materials	13-17 septembre 2015, Agadir	Contribution financière
The Rise of Animal Life : Cambrian and Ordovician biodeversification events. Promoting geological heritage : challenges and issues»	05-10 octobre 2015, Marrakech	2
Ecole Mathématique Africaine	12-13 octobre 2015, Marrakech	Contribution financière
Colloque International sur « Application des Technologies Géospatiales en Géosciences»	21-22 octobre, Taza	20
Colloque sur le thème «Eau, recyclage et valorisation des déchets»	28-29 octobre 2015, Fès	10
Symposium sur les Nanotechnologies : Recherche, Innovation et Enjeux Economiques	28-29 octobre 2015, Casablanca	4
3 ^{ème} Conférence Euro-méditerranéenne sur : les matériaux et les énergies renouvelables	02-06 novembre 2015, Marrakech	3
Conférence Internationale en Mathématiques Appliquées (CIMAS)	10-12 novembre 2015, Safi	10
Journées Internationales Jeunes Chercheurs en Chimie Thérapeutique	10-20 novembre 2013,	Contribution

Activités I.9: Soutien aux manifestations scientifiques (3/3)

<i>Thème de la manifestation</i>	<i>Date et lieu</i>	<i>Nombre de doctorants soutenus</i>
16 ^{ème} édition du festival d'astronomie	19-27 novembre 2015, Marrakech	Contribution financière
2 ^{èmes} Journées d'Econométrie de la Finance	18-19 décembre 2015, Rabat	Contribution financière
8 ^{ème} Rencontre des Jeunes Chercheurs en Physiques	23-24 décembre 2015, Casablanca	Contribution financière
1 ^{er} Symposium International sur les Mathématiques Computationnelles et les Sciences de l'Ingénieur	03-06 mars 2016, Errachidia	20
Journée de culture scientifique au lycée	12 mars 2016, Ait Baha	Contribution financière
Colloque International de Géométrie Différentielle	11-15 avril 2016, Fès	5
1 ^{er} Congrès International des Etudes sur l'Eau et l'Environnement	21-22 avril 2016	10
7 ^{ème} Festival des Sciences à Tanger	25-29 avril 2016, Tanger	Contribution financière
Conférence Internationale de Probabilités et Statistiques	25-28 avril 2016, Marrakech	6
10 ^{ème} Congrès Francophone de Génie des Procédés	27-29 avril 2015, Safi	5
1 ^{er} Symposium International sur les Matériaux Diélectriques et Application	04-06 mai 2016, Kénitra	3
International Conference on Electrical and Information Technologies	04-07 mai 2016, Tanger	3
Ecole CIMPA «Modélisation, Analyses Mathématiques et Numériques pour les Problèmes aux Dérivées Partielles»	09-21 mai 2016, Nador	2

Évolution du nombre de manifestations scientifiques soutenues par l'Académie depuis 2007.

Activité I.10 : Lancement d'un nouvel appel d'offres

Thématiques retenues (session ordinaire du 5 juin 2015)
Sciences du Climat
Big Data
Physique statistique
Sciences des matériaux

Activité I.10 : Autres actions de promotion de la recherche scientifique

Action	Résultat
Documents sur l'état de la recherche dans les différentes disciplines	Elaboration d'un livre blanc sur les différents risques naturels qu'encourt le Maroc
Formation à la rédaction et la communication scientifiques	Organisation des formations de formateurs (22-26 juin 2015) pour la rédaction et la communication scientifiques en collaboration avec l'Inter Academy Medical Panel.
Concours général des sciences et techniques (Allocations d'excellence)	Pour la sixième année consécutive, des allocations d'excellence (édition 2015) attribuées aux lauréats du concours général en sciences et techniques, organisé pour les meilleurs bacheliers des disciplines scientifiques et techniques, dans le cadre de la convention de partenariat signée avec le Ministère de l'Education Nationale.
Reconfiguration du site internet de l'Académie	Le site internet de l'Académie www.academiesciences.ma a été repensé et reconfiguré de façon à répondre mieux et rapidement aux consultants du site.
Prix de thèse aux jeunes diplômés en sciences économiques	L'Académie continue d'apporter son appui à l'Association marocaine de sciences économiques en accordant des prix de thèse aux jeunes diplômés en sciences économiques. Résultat : éditions d'ouvrages sur l'économie marocaine
Soutien à l'édition	L'Académie apporte, suite à une évaluation, un soutien financier à l'édition d'ouvrages ou de monographies scientifiques écrits par les membres de l'Académie et par les chercheurs nationaux.

Activités I.11 : Soutien aux manifestations scientifiques en 2015-2016

<i>Nombre de demandes reçues</i>	<i>Nombre de manifestations soutenues</i>	<i>Nombre de doctorants soutenus</i>	<i>Nombre de contribution financière</i>	<i>Budget total alloué</i>
49	37	199	13	275 080 DH

Mission II - Contribution à la définition des politiques de la recherche scientifique et technologique

«En matière de politique nationale de recherche scientifique et technique : l'Académie a pour mission d'émettre des recommandations sur les priorités et sur les moyens susceptibles d'assurer la réalisation des objectifs nationaux en matière de recherche.» (Loi, Art. 2)



Activité : Participation de l'Académie aux travaux d'instances nationales

- Commission Nationale de Coordination de l'Enseignement Supérieur (CNACES)
- Conseil Supérieur de l'Education, de la Formation et de la Recherche Scientifique (CSEFRS)
- Conseil d'Administration du CNRST



Mission III - Développement de l'enseignement des sciences et promotion de la culture scientifique

L'Académie est chargée de :

- *proposer aux autorités concernées les voies et les moyens capables de développer l'esprit scientifique au sein de la société marocaine,*
- *entreprendre des actions de diffusion de la science par des colloques, des manifestations scientifiques, des publications et par la création des bibliothèques scientifiques (Loi, art. 2)*

Activité III.1 : Développement de l'enseignement des sciences

Activités

Participation de l'Académie aux travaux de la Commission mise en place par le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation professionnelle, pour le pilotage et le suivi de la question de l'enseignement des sciences et des technologies, et à l'orientation des élèves vers ces filières.

Organisation de la journée sur «l'enseignement des sciences» en collaboration avec le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle. Objectif : mise en œuvre de la stratégie 2015_2030 visant à initier une dynamique de promotion de l'enseignement des sciences fondée sur le questionnement et sur l'investigation constitutifs des disciplines scientifiques, la démystification des sciences dures en dotant les élèves de connaissances scientifiques tout en les encourageant à se poser des questions et à formuler des réponses et en revalorisant l'atelier de sciences à celui de leçon de sciences.

Participation aux activités du consortium «African European Mediterranean Academies for Science Education» (AEMASE) regroupant une dizaine de pays : la France, l'Allemagne, la Hongrie, l'Italie, le Royaume-Uni, l'Egypte, le Maroc, le Sénégal, le Soudan, et l'Afrique du Sud. L'objectif de ce consortium est l'élaboration d'un projet pour rendre l'enseignement des sciences et les carrières scientifiques plus attractives pour les jeunes.

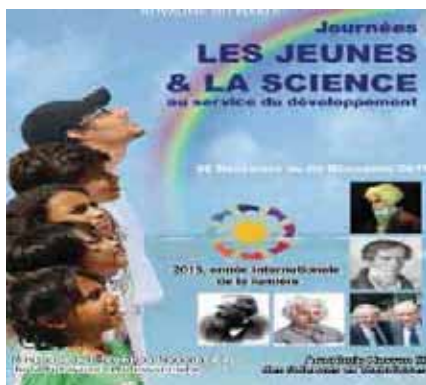
Lancement de la convention «Sciences au lycée» initiée par l'Académie et qui lie l'Université Ibn Tofail de Kénitra, l'Académie régionale de l'Education et de la Formation du Gharb Charda Beni Hassan et l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Préparation du rapport préliminaire d'évaluation des clubs scientifiques.

Activité III.2 : 10^{ème} édition des journées « les jeunes et la science au service du développement » (1/2)

L'Académie a organisé du 26 novembre au 04 décembre 2015, la 10^{ème} édition des journées «les jeunes et la science au service du développement» en partenariat avec le Ministère de l'Education Nationale et la Formation Professionnelle. La thématique principale retenue pour cette édition est «la lumière».

La cérémonie de lancement de cette édition a coïncidé avec l'ouverture du premier salon national de la créativité des jeunes.



Salon national de la créativité des jeunes.

Surface d'exposition	2000 m ²
Exposants	76 projets/300 projets déposés
Espaces d'exposition	(Créativité, Technologie, Robotique et Startups-jeunes)
Visiteurs	3430 personnes
Conférences, ateliers et expositions	6 conférences, 6 ateliers et 2 expositions
Prix	8 prix attribués

Activité III.2 : 10^{ème} édition des journées « les jeunes et la science au service du développement » (2/2)

Activités : Conférences, rencontres, ateliers etc.

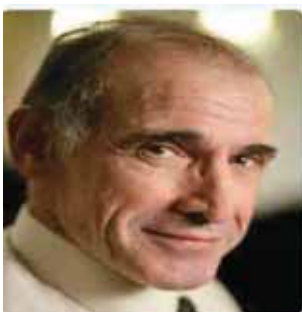
Activité	Nombre
Conférences	84
Rencontres et Ateliers	41
Expositions	9
Visites et excursions	3
Films documentaires	2
Compétitions scientifiques et concours	13
Total des activités	152

Activité III.3 : Organisation d'un cycle de conférences (1/3)

« L'Académie est chargée d'assurer une communication de haut niveau entre la communauté scientifique nationale et l'élite scientifique mondiale » (Loi, art.2)

«La médecine du futur»

Pr. Pierre TAMBOURIN, le 23 mars 2015



«L' aventure des nombres»

Pr. Gilles GODEFROY, le 24 mars 2015



Activité III.3 : Organisation d'un cycle de conférences (2/3)

« L'Académie est chargée d'assurer une communication de haut niveau entre la communauté scientifique nationale et l'élite scientifique mondiale » (Loi, art.2)

«De la matière à la vie : chimie? Chimie!»

Pr. Jean Marie LEHN (Prix Nobel), le 01 avril 2015



«Les défis du photovoltaïque»

Pr. Bernard DREVILLON, le 13 avril 2015

**Activité III.3 : Organisation d'un cycle de conférences (3/3)**

« L'Académie est chargée d'assurer une communication de haut niveau entre la communauté scientifique nationale et l'élite scientifique mondiale » (Loi, art.2)

«L' Univers a-t-il connu un instant zéro?»

Pr. Etienne KLEIN, le 18 mai 2015



«Les politiques énergétiques à la veille de la Conférence de Paris sur le Climat (COP21)»

Pr. Jean Marie CHEVALIER, le 21 septembre 2015



«Pourquoi l' objectif de 2 degrés appartient hélas au passé»

Pr. Jacques TREINER, le 28 septembre 2015



Activité III.4: Publications de l'Académie durant 2015-2016

- *Actes de la session plénière 2015,*
- *Bulletin d'information de l'Académie (N° 17 et 18),*
- *La Lettre de l'Académie (N° 25 et 26),*
- *Volume 5 n°1 et 2 du Journal scientifique de l'Académie :*
«Frontiers in Science and Engineering»,
- *Conférences éditées,*
- *Rapports édités (sciences médicales, synthèse de session plénière),*



Activité III.5: Bibliothèque de l'Académie



- *Réception et traitement de documents achetés par l'Académie et/ou reçus en dons par des personnes, des institutions nationales et internationales.*
- *Réception d'un Don composé de plusieurs documents précieux (sur supports papier et électronique) offert par Mr Marcelo de Sousa Vasconcelos, membre associé de l'Académie Hassan II.*
- *Visite de plusieurs personnalités et délégations d'institutions nationales et internationales.* (Secrétaire générale de l'Académie des Sciences du Portugal, Président de l'Académie des Sciences Colombienne, Ministre délégué auprès du Ministre de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et la Formation des Cadres, Délégation de l'Académie des Sciences Chinoise.....)

Mission IV - Coopération, partenariat et présence de l'Académie à l'échelle internationale



Activité IV.1 : Coopération bilatérale

- Dans le cadre du renforcement des liens de coopération bilatérale, l'Académie procède à la signature de conventions de coopération

		
Signature d'une Convention entre l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et l'Académie Tunisienne des Sciences, des Lettres et des Arts.	Tunis, le 16 novembre 2015	
Signature d'une convention avec l'Académie des Sciences de Colombie	Rabat, mai 2015	

Activité IV.2 : Coopération multilatérale

<i>Manifestation</i>	<i>Date</i>	<i>Lieu</i>	<i>Participant</i>
Réunion conjointe des instances des 3 réseaux mondiaux des Académies des Sciences	28-30 mai 2015	Delhi - Inde	Pr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel de l'Académie
Réunion du Comité Exécutif du NASAC			Pr. Mostapa Bousmina, Chancelier de l'Académie

Activité IV.3 : Participation de l'Académie aux rencontres et manifestations scientifiques nationales et internationales

<i>Manifestation scientifique</i>	<i>Lieu</i>	<i>Date</i>
Séminaire sur l'Industrie Automobile : Véhicule du futur	Fès	12-13 janvier 2015
Colloque en Hommage au Pr. Abdellatif Berbich	Rabat	03-04 février 2015
Séminaire sur «Les technologies au service des recherches sur le patrimoine culturel de la Méditerranée occidentale, de sa protection et de sa valorisation»	Rabat	2 mars 2015
Conférence sur "Les liens entre la formation, la recherche et la société"	Casablanca	16 avril 2015
Clôture de l'Année Internationale de Cristallographie	Rabat	22 avril 2015
Premier Forum Africain de la Santé	Rabat	22 mai 2015
Formation des formateurs en rédaction et communication scientifiques	Dakar	22-26 juin 2015
Rencontre sur l'aéronautique	Rabat	17 septembre 2015
Rencontre Galien-Ibn Sina	Rabat	02 octobre 2015
Préparation de la réunion FAST DEV	Rabat	19 octobre 2015
Colloque International sur «Nanotechnologies : recherche, innovation et enjeux économiques»	Casablanca	28 octobre 2015
60 ^{ème} Anniversaire des Accords de la Celle Saint Cloud	Paris	10 novembre 2015
Formation des formateurs en rédaction et communication scientifiques	Rabat	30 /11-04/12 2015
3 ^{ème} Rencontre Internationale de Dakhla	Dakhla	03-04 décembre 2015
48 ^{ème} Session de l'Académie du Royaume du Maroc	Rabat	08-11 décembre 2015

Activité IV.4 : Visites à l'Académie

- Dans le cadre du renforcement des liens de coopération entre l'Académie et les différents partenaires et institutions scientifiques, l'Académie reçoit la visite de responsables, de personnalités et des délégations scientifiques, appartenant à différentes institutions nationales ou étrangères. Au cours de l'année 2015-2016, l'Académie a reçu la visite de :

<i>Délégation</i>	<i>Date</i>
<i>Secrétaire perpétuel de l'Académie du Royaume</i>	<i>03 juin 2015</i>
<i>Secrétaire générale de l'Académie des Sciences du Portugal</i>	<i>14 octobre 2015</i>
<i>Président de l'Académie Colombienne des Sciences</i>	<i>17 octobre 2015</i>
<i>Ministre délégué auprès du Ministre de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et la Formation des Cadres</i>	<i>26 octobre 2015</i>
<i>Délégation de l'Académie des Sciences de Chine</i>	<i>24 novembre 2015</i>

V- Organisation administrative de l'Académie



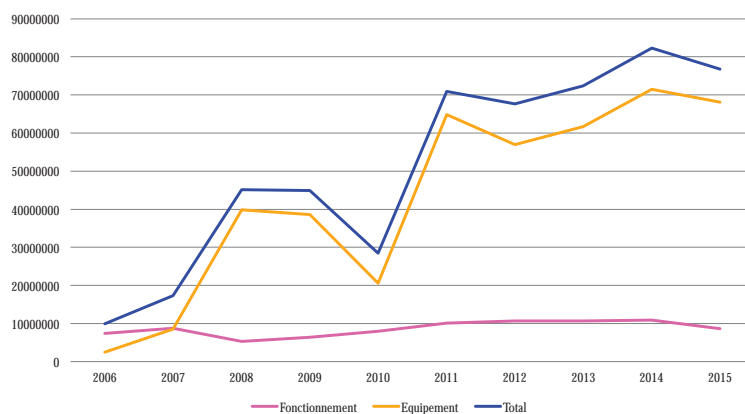
V.1.- Les ressources humaines

- *Le nombre du personnel de l'Académie s'élève aujourd'hui à 30 personnes dont 15 cadres supérieurs (docteurs d'Etat ou ingénieurs). Il est composé du personnel statutaire, du personnel détaché, du personnel mis à disposition et de contractuels. Ce personnel est chargé de différentes tâches et activités de l'Académies au sein des différents organes directeurs et administratifs de l'Académie .*

V.2. Budget de l'Académie en Dirhams

<i>Dépenses</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>
Fonctionnement	6 374 613,60	7 949 527,04	10 149 426,29	10 700 000,00	10 700 000,00	10 884 000,00	8 667 067,47
Equipement	38 562 434,96	20 526 429,31	64 829 628,31	56 961 159,13	61 672 166,02	71 447 329,79	68102 317,92
TOTAL	44 937 048,56	28 475 956,35	70 979 090,60	67 661 159,13	72 372 166, 02	82 331 329,79	76 769 385,39
Coût de la Session plénière	1 062 229,86	1 260 354,35	1 263 087,48	1 880 388,36	2 483 090,31	2 673 881,12	2345 932,48
Coût Journée d' étude	13 800,60	-	-	195 572,00	30 000, 00	119 287,40	-
Coût des Sessions ordinaires	58 403,00	132 808,44	31 680,00	132 462,00	99 385, 00	149 998,00	-
Conventions de recherche	7 359 290,00	3 474 828,37	15 929 237,99	2 409 500,00	990 400,00	6 046 111,00	5150945,00
Soutien aux manifestations scientifiques	271 051,91	99 000,00	457 501,40	111 047,40	249 367,19	309 868,22	275 080,00

V.3. Evolution du budget de l'Académie depuis son installation



Conclusion

*L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques essaye donc inlassablement de s'acquitter de sa mission en donnant à la science et à la recherche scientifique une place majeure dans l'échelle des valeurs nationales, en proposant aux autorités concernées les voies et les moyens capables de développer l'esprit scientifique au sein de la société marocaine, en assurant une communication de haut niveau entre la communauté scientifique nationale et l'élite scientifique mondiale et en tendant toujours vers l'objectif qui lui a été défini par Sa Majesté le Roi Mohammed VI – que Dieu Le Glorifie –, le 18 mai 2006, celui de **«servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale» dont elle a fait sa devise.***

Merci pour votre attention

COMPTE RENDU DE LA SESSION PLÉNIÈRE SOLENNELLE 2016

La session plénière solennelle 2016 de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, s'est tenue à Rabat, les 16, 17 et 18 février 2016 sous le thème scientifique général «**La science dans tous ses états**». Les travaux de cette session sont synthétisés dans le présent compte rendu.

Mardi 16 février 2016 (après-midi) **Séance interne des collèges de l'Académie**

Le mardi 16 février 2016, de 14h à 16h, les six collèges scientifiques de l'Académie se sont réunis séparément, dans des locaux de l'Académie du Royaume à Rabat, pour passer en revue le bilan des activités de l'année 2015 et discuter leur plan d'action pour l'année 2016.

Cérémonie d'ouverture

- Allocution du Secrétaire Perpetuel
- Signature d'une convention entre le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et l'Association Recherche et Développement du Maroc
- Conférence inaugurale : D'où venons-nous...? Une nouvelle histoire de la famille humaine à la lumière des nouvelles découvertes

A 16h30, dans la grande salle de Conférences, s'est tenue la cérémonie d'ouverture solennelle de la session plénière solennelle 2016 de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques en présence de plusieurs personnalités invitées dont plusieurs Conseillers de Sa Majesté le Roi et plusieurs Ministres de Gouvernement marocain; étaient également présents plusieurs représentants des médias (presse écrite, radios et chaînes de télévision).

Au début de la cérémonie d'ouverture, l'Académie a procédé à l'élection de Pr. Sellama Nadifi comme Directeur des séances, en remplacement du Pr. Tijani Bounahmidi dont le mandat est venu à expiration. Ensuite, la parole fut donnée au Secrétaire perpétuel de l'Académie pour prononcer le Discours d'ouverture et souhaiter la bienvenue aux participants. Dans son discours, le Secrétaire perpétuel a rappelé que la tenue de cette session plénière solennelle coïncide avec la commémoration du 10^{ème} anniversaire de l'installation solennelle de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu Le protège. Il a fait remarquer également que la tenue de cette session plénière solennelle constitue l'évènement central d'un programme d'ensemble constitué par des manifestations scientifiques qui se dérouleront tout au long de l'année 2016 dans plusieurs régions du Royaume, chacune sur un thème particulier.

Il a remercié toutes les éminentes personnalités scientifiques venant du Maroc et de l'étranger (notamment de France, USA, Espagne, Chili, Mexique, Canada, Sénégal, Tunisie) pour présenter des communications et participer aux débats en liaison avec le thème général de la session «**La science dans tous ses états**».

Concernant le déroulement des travaux de cette session, Monsieur le Secrétaire perpétuel a indiqué que la session plénière solennelle de cette année ambitionne d'apporter une contribution et un éclairage sur la science dans tous ses états notamment dans quelques disciplines phares comme la paléanthropologie, les sciences de la matière, les sciences du vivant, les sciences de l'ingénieur, les sciences économiques et les sciences agricoles. L'objectif de cette session est de débattre des grandes avancées scientifiques marquant notre époque, et d'avoir une idée sur les attentes, les progrès, les défis et l'avenir de la science contemporaine; et aussi de préciser les meilleures approches pour une pleine intégration de la science aux larges besoins de la société, notamment, en matière de développement humain, en vue de renforcer l'intégration de notre pays dans l'économie et la société du savoir. Toutefois, les découvertes scientifiques peuvent aussi être des sources de craintes et de risques et peuvent soulever aussi des interrogations sur le plan éthique. Pour ces raisons le programme de cette session intègre un panel qui abordera et traitera la question de l'éthique en science.

A la fin de cette allocution de bienvenue et de présentation du thème général de la session, il a été procédé à la signature d'une convention entre le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation Professionnelle, l'Association Recherche et Développement du Maroc et l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Par la suite, l'Académie a poursuivi ses travaux par une conférence inaugurale sur le thème «*D'où venons-nous...? Une nouvelle histoire de la famille humaine à la lumière des nouvelles découvertes*», présentée par le Pr. Michel Brunet, Professeur au Collège de France.

La discussion de cette conférence a été reportée à la fin de la séance plénière du lendemain matin par Mme le Directeur des séances.

Mercredi 17 février 2016 (matin, première partie) **Séance plénière I : Sciences de la matière**

Au début de cette séance, le Secrétaire perpétuel a demandé au public présent d'observer une minute de silence et de réciter la Fatiha à la mémoire du défunt le Pr Abdelghnai Belloukid, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, décédé le 31 août 2015. La première partie de la matinée du mercredi 17 février 2016 fut consacrée aux sciences de la matière, au cours de laquelle trois exposés pléniers furent présentés, respectivement par :

- Pr. Catherine Bréchnac, Membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences de France, sur «Les défis de la physique»,
- Pr. Marc Fontecave, Professeur au Collège de France, sur «*Chimie et biologie: quelles nouvelles frontières?*»,
- Pr. Nadia El kissi, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Les matériaux du futur et les promesses de la nature*».

Une discussion a suivi ces exposés et la conférence inaugurale, animée principalement par le Pr. Sellama Nadifi, Directeur des séances.

Mercredi 17 février 2016 (matin, deuxième partie)
Séance plénière II : Sciences et Techniques du vivant

Après la pause, la deuxième partie de la matinée du mercredi 17 février 2016 fut consacrée aux sciences et techniques du vivant, au cours de laquelle trois exposés pléniers furent représentés, respectivement par :

- Pr. Philippe Kourilsky, Professeur au collège de France, sur «*De la diversité des gènes à la complexité du vivant*»,
- Mr. Philippe Horvath (Senior Scientist, Dupont Nutrition and Health, France), sur «*CRISPR/cas9 : du système immunitaire bactérien à l'outil révolutionnaire d'ingénierie des génomes*»,
- Pr. Alain Prochiantz, Administrateur général du Collège de France, sur «*La physiologie cérébrale comme embryogenèse silencieuse*».

Une discussion a suivi ces exposés, dirigée par le Pr. Sellama Nadifi, Directeur des séances.

Mercredi 17 février 2016 (après-midi, première partie)
Séance plénière III : Mathématiques et Sciences de l'Univers

La première partie de l'après-midi du mercredi 16 février 2016 fut consacré à la séance plénière III sur le thème «**Mathématiques et Sciences de l'Univers**», au cours de laquelle trois exposés ont été programmés dont deux furent présentés, respectivement, par :

- Pr. Gilles Godefroy, Directeur de Recherche au CNRS - France, sur «*Les Mathématiques : des idées simples au service de tous*»,
- Pr. El Maati Ouhabaz, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Une excursion dans le monde des équations aux dérivées partielles*».

L'exposé de Pr. Jean-Michel Alimi, Observatoire de Paris Meudon, France, sur «La question des origines : bilan et perspectives d'une discipline en ébullition, l'Astronomie-Astrophysique», a été transmis aux services de l'Académie pour être publié dans les actes de la session plénière.

Une discussion a suivi ces exposés, dirigée par le Pr. Sellama Nadifi, Directeur des séances.

Mercredi 17 février 2016 (après-midi, deuxième partie)
Séance plénière IV : Nouvelles technologies, énergie et environnement

La deuxième partie de l'après-midi du mercredi 17 février 2016 fut consacrée à la séance plénière IV sur le thème «**Nouvelles technologies, énergie et environnement**», au cours de laquelle trois exposés furent présentés, respectivement, par :

- Pr. Enrique Soria Lascorz (CIEMAT, Espagne), sur «*Wind energy one of the most competitive renewable energy*»,
- Pr. Rachid Yazami, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Nanyang Technology University, Singapour, sur «*Mesure de l'entropie pour la science et la technologie des batteries*»,
- Pr. Philippe Tanguy, membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Vice-président R&D-Total, sur «*Co-opération et co-innovation : quel rôle pour la recherche publique*».

Une discussion a suivi ces interventions, dirigée par le Pr. Sellama Nadifi, Directeur des séances.

Jeudi 18 février 2016 (matin, première partie)

Séance plénière V : Economie et agriculture

La première partie de la matinée du jeudi 18 février 2016 fut consacré à la séance plénière V consacrée au thème «**Economie et agriculture**», au cours de laquelle trois exposés furent présentés, respectivement, par :

- Pr. Jean Cartelier, Professeur à l'Université Paris-Ouest, France, sur «*L'état des sciences économiques : vers une disparition de la théorie économique*»,
- Pr. Redouane Taouil, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*Le nouveau consensus macroéconomique : l'unification par la discipline de l'équilibre*»,
- Pr. Mohamed Aït Kadi, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, sur «*L'agriculture du futur : un condensé de défis scientifiques*».

Une discussion a suivi ces exposés, dirigée par le Pr. Sellama Nadifi, Directeur des séances.

Jeudi 18 février 2016 (matin, deuxième partie)

Séance plénière VI : Panel sur «L'éthique en sciences»

La deuxième partie de la matinée du jeudi 18 février 2016 fut consacrée au panel sur le thème «**L'éthique en sciences**», modéré et animé par le **Pr. Taïeb Chkili, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques**, et a donné lieu à cinq interventions présentées par :

- Pr. Malik Ghallab, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Technique,
- Pr. Juan Carlos Castilla, membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques,
- Mr. Abdellah Mokssit, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques,
- Pr. Farid Hakkou, Professeur à l'Université Hassan II, Faculté de Médecine et de Pharmacie,
- Pr. Saïd Ihraï, Président de la Commission nationale de contrôle de protection des données à caractère personnel (CNDP).

Une discussion a suivi ces interventions, dirigée par le Pr. Sellama Nadifi, Directeur des séances.

Jeudi 18 février 2016 (après-midi)
Séance interne de l'Académie
Présentation du rapport d'activité 2015-2016
Renouvellement des instances de l'Académie
&
Clôture de la Session

La première partie de la séance du jeudi 18 février 2016 après-midi a été consacrée à la présentation et à la discussion du rapport d'activité de l'Académie durant l'année 2015-2016.

Au début de cette séance, la parole fut donnée au Secrétaire perpétuel de l'Académie pour présenter le rapport d'activité 2015-2016.

Dans ce rapport, ont été présentées les actions menées par l'Académie au cours de l'année écoulée conformément aux missions que le Dahir de sa création lui confère. Les actions réalisées durant l'année 2015-2016 concernent les missions suivantes :

- *promotion, développement et financement de la recherche scientifique et technologique. Les actions menées sont :*
 - l'organisation des réunions des organes directeurs de l'Académie (Conseil d'Académie (6 réunions), Commission des Travaux (5 réunions), Collèges scientifiques (32 réunions);
 - l'organisation des sessions ordinaires thématiques (accident vasculaire cérébral, maladies génétiques au Maroc, promotion et développement de la recherche scientifique au Maroc, enseignement des sciences, aéronautique au Maroc....);
 - la préparation de la session plénière 2016 et du programme de la commémoration du 10^{ème} anniversaire de l'installation de l'Académie;
 - le suivi du financement des projets dans le cadre de l'appel d'offres 2010-2011;
 - le suivi du financement des projets dans le cadre de coopérations internationales;
 - l'édition du rapport sur l'expérience de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques en matière d'appui à la recherche scientifique et technique;
 - la définition des thèmes prioritaires pour le nouvel appel d'offre;
 - Le soutien aux manifestations scientifiques organisées par les chercheurs marocains (36 manifestations soutenues pour un montant de 275 000 dirhams);
 - L'élaboration des documents sur l'état de la recherche dans les différentes disciplines (sciences médicales et de la santé, sciences physiques..);
 - Action de formation en rédaction et communication scientifiques;
 - l'attribution des allocations d'excellence (édition 2015) aux lauréats du concours général en sciences et techniques;
 - l'appui à l'Association marocaine de sciences économiques par l'organisation d'une école académique ouverte aux étudiants doctorants en sciences économiques et par l'octroi des prix de thèse aux jeunes diplômés en sciences économiques;
 - la participation de l'Académie à manifestations scientifiques au Maroc et à l'étranger.

- *définition des politiques nationales de la recherche scientifique et technologique par :*
 - Organisation et participation à des rencontres consacrées à la recherche scientifiques et technologique;
 - Participation de l'Académie aux travaux d'instances nationales (CSEFRS, CNACES, CA du CNRST...).
- *développement de l'enseignement des sciences et promotion de la culture scientifique par :*
 - Participation de l'Académie aux travaux de la Commission mise en place par le Ministère de l'Education Nationale et de la Formation professionnelle, pour le pilotage et le suivi de la question de l'enseignement des sciences et des technologies, et à l'orientation des élèves vers ces filières,
 - Préparation du rapport préliminaire d'évaluation des clubs scientifiques,
 - Participation de l'Académie au consortium AEMASE H2020 (African-European-Mediterranean Academies for Science in Education – Horizon 2020) pour la promotion de l'enseignement des sciences,
 - Organisation de 10^{ème} édition des journées «les jeunes et la science au service du développement»,
 - Contribution à l'organisation du premier salon national de la créativité des jeunes,
 - l'organisation d'un cycle de conférences,
 - la diffusion des publications de l'Académie (Actes de la session plénière 2015, Bulletin d'information de l'Académie (N°17 et 18), Lettre de l'Académie (N°25 et 26) et Volume 5 (1 et 2) du Journal de l'Académie « Frontiers in Science and Engineering »).
- *promotion de la coopération scientifique et du renforcement de la présence de l'Académie sur le plan international par :*
 - la signature d'une convention de coopération avec l'Académie des Sciences, des Lettres et des Arts de la Tunisie ;
 - La signature d'une convention de coopération avec l'Académie des Sciences de Colombie,
 - Intensification des relations de coopération avec les pays de l'Afrique,
 - Réunion des 3 réseaux mondiaux des Académies des Sciences (IAP, IAC, IAmP),
 - Réunion du Comité Exécutif du NASAC.
- *état synthétique du budget de l'Académie*

Après cette présentation, l'Académie a poursuivi ses travaux et chaque ancien directeur des collèges a présenté les résultats de l'élection du directeur et du co-directeur, suite à la réunion des collèges scientifiques qui a eu lieu le mardi 16 février 2016 avant la séance d'ouverture de la session plénière. Ces résultats sont les suivants :

- **Collège des Sciences et techniques du vivant**
 - Directeur : Albert Sasson (reconduit)
 - co-directeur : Mme Sellama Nadifi (reconduite)
- **Collège des Sciences et Techniques de l'environnement, de la terre et de la mer**
 - Directeur : Mr. Ahmed El Hassani (reconduit)
 - co-directeur : Mr. Driss Ouazar (reconduit)
- **Collège des Sciences physiques et chimiques**
 - Directeur : Mme. Rajae Cherkaoui El Mourseli (reconduite)
 - co-directeur : Mr. Essassi El Mokhtar (reconduit)
- **Collège des Sciences de la modélisation et de l'information**
 - Directeur : Mr. Youssef Ouknine (reconduit)
 - co-directeur : Mr. Maati Ouhabaz (élu)
- **Collège des Ingénierie, Transfert et Innovation technologiques**
 - Directeur : Mr Tijani Bounahmedi (élu)
 - co-directeur : Mr Ali Boukhari (élu)
- **Collège des Etudes stratégiques et Développement économique**
 - Directeur : Mr. Mohamed Berriane (reconduit)
 - co-directeur : Mr. Khalid Sekkat (reconduit)

Après, la parole a été donnée au Secrétaire perpétuel qui a demandé de compléter les instances de l'Académie par l'élection de nouveaux membres du Conseil de l'Académie et de la Commission des travaux. Ces élections ont abouti aux résultats suivants :

Membres du Conseil d'Académie :

- Mr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel,
- Mr. Mostapha Bousmina, Chancelier,
- Mme. Rajae Cherkaoui El Mourseli,
- Mr. Tijani Bounahmedi,
- Mr. Youssef Ouknine.

Membres de la Commission des travaux :

- Mr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel,
- Mr. Mostapha Bousmina, Chancelier,
- Mme Sellama Nadifi,
- Mr. Albert Sasson,
- Mr. Malik Ghellab,
- Mr. Ahmed El Hassani,
- Mr. Driss Aboutajeddine.

Après cette présentation, les académiciens purent entamer une large discussion sur le rapport d'activité 2015-2016 qui a permis de dégager les remarques et recommandations suivantes :

- Les livrables des projets de recherche soutenus par l'Académie montrent qu'il y a très peu de dépôts de brevets et qu'il est nécessaire d'encourager la valorisation des résultats de recherche;
- Les thèmes prioritaires du nouvel appel d'offre, retenus lors de la session ordinaire du 5 juin 2015, sont limitatifs. Toutefois, l'Académie doit pouvoir toujours envisager le financement d'un projet de recherche pertinent et de qualité;
- L'octroi des bourses aux doctorants, dans le cadre des projets de recherche soutenus par l'Académie, peut être résolu en faisant appel à l'appui du CNRST, suite à la nouvelle circulaire concernant le financement des doctorants;
- Renforcer le rayonnement de l'Académie sur le plan international;
- Inviter les étudiants doctorants à assister et à participer aux travaux de certaines activités de l'Académie;
- Réfléchir sur la mise en place d'une structure pour stimuler la recherche médicale au Maroc;
- Enfin, se féliciter de la réussite de la session plénière solennelle 2016.

Suite à cette discussion, le Secrétaire perpétuel a pris la parole pour apporter les précisions supplémentaires suivantes :

- Réfléchir ensemble pour améliorer le travail de l'Académie;
- Demander aux directeurs des collèges scientifiques de transmettre à l'Académie le bilan des principales activités des collèges durant la première décennie de l'installation de l'Académie, en vue de préparer le document sur le bilan d'étape (2006-2016) des activités de l'Académie, ainsi que les propositions concernant les activités prévues en 2016;
- Préparer dès maintenant la réunion avec les Académie africaines des sciences prévue les 16, 17 et 18 mai 2016;
- Enfin, se féliciter de la réussite de la session plénière solennelle 2016.

A la fin de cette séance, Monsieur le Secrétaire perpétuel a dégagé les principales conclusions tirées de cette session, en insistant sur sa richesse scientifique et sur la qualité des invités, des interventions et débats; il a également exprimé ses vifs remerciements à ses confrères et consœurs, à tout le personnel de l'Académie, aux interprètes ainsi que ses félicitations pour la réussite de cette session.

La clôture des travaux est intervenue à l'issue de cette séance, au cours de laquelle l'ensemble des académiciens ont adopté un message de loyauté, de gratitude et de déférence adressé à Sa Majesté le Roi Mohammed VI – que Dieu L'assiste et Le protège – pour Sa bienveillante sollicitude, Ses précieux encouragements et Sa Protection Tutélaire dont s'enorgueillit l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, ainsi que pour la Haute Sollicitude dont Il entoure l'ensemble de la communauté scientifique du Maroc.

LISTE DES PARTICIPANTS

LISTE DES PARTICIPANTS à la session plénière (16-18 février 2016)

Membres de l'Académie

Prénom et NOM	Qualité/Profession	Collège
Driss ABOUTAJDINE	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	SMI
Daoud AIT-KADI	Membre résident Professeur, Université Laval, Canada	SMI
Mohamed AIT-KADI	Membre résident, Professeur, IAV Hassan II, Rabat	STETM
Ismail AKALAY	Membre correspondant, MANAGEM (ONA)	ITIT
Omar ASSOBBEI	Membre résident Professeur, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès	STETM
Abdelghani BELLOUQUID	Membre correspondant Professeur, Université Cadi Ayyad, Marrakech	SMI
Rachid BENMOKHTAR BENABDELLAH	Membre résident Professeur	ESDE
Abdelilah BENYOUSSEF	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	SPC
Mohamed BERRIANE	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	ESDE
Jean-Jacques BONNET	Membre associé, Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse, France	SPC
Ali BOUKHARI	Membre résident, Professeur, Université Ibn Tofail de Kénitra	ITIT

Collèges (abréviations) :

- SPC : Sciences Physique et Chimiques
- STV : Sciences et Techniques du Vivant
- SMI : Sciences de la Modélisation et de l'Information
- ESDE : Etudes Stratégique et Développement Economique
- ITIT : Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique
- STETM : Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer

Prénom et NOM	Qualité/Profession	Collège
Tijani BOUNAHMIDI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	ITIT
Mostapha BOUSMINA	Membre résident, Professeur, Chancelier Académie Hassan II des Sciences et Techniques	SPC
Catherine BRECHIGNAC	Membre associé, Professeur, Académie des Sciences, France	SPC
Juan Carlos CASTILLA ZENOBÍ	Membre associé, Professeur, Catholic University Chili	STETM
Rajaa CHERKAOUÍ EL MOURSLI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	SPC
Taïeb CHKILI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	
Rajae EL AOUD	Membre résident, Professeur, Institut National d'Hygiène Rabat	STV
Noureddine EL AOUI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	ESTE
Ahmed EL HASSANI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	STETM
Abdelhaq EL JAI	Membre résident, Professeur, Université Perpignan, France	SMI
Nadia EL KISSI	Membre correspondant, Directeur de Recherche - CNRS – France	
Abdeljabbar EL MANIRA	Membre correspondant, Professeur, Karolinska Institute, Suède	STV
El Mokhtar ESSASSI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	SPC
Omar FASSI-FEHRI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat Secrétaire Perpétuel, Académie Hassan II des Sciences et Techniques	SPC
Abdelkrim FILALI MALTOUF	Membre correspondant, Professeur, Université Mohammed V de Rabat	STV
Francisco GARCIA GARCIA	Membre associé	STV
Malik GHALLAB	Membre résident Directeur de recherche -LASS – Toulouse, France	SMI

Prénom et NOM	Qualité/Profession	Collège
Claude GRISCELLI	Membre associé Professeur, Université René Descartes – France	STV
El Hassan BELARBI HAFTALLAOUI	Membre correspondant, Professeur, Université d’Almeria, Espagne	STV
Mohamed KABBAJ	Membre résident Université Euro-Méditerranéenne de Fès	ESDE
Abderrahim MAAZOUZ	Membre résident Professeur – INSA, Lyon - France	ITIT
Carlos MARTINEZ ALONSO	Membre associé, Professeur, CSIC – Madrid, Espagne	STV
Abdallah MOKSSIT	Membre correspondant Direction de la Météologie Nationale, Casablanca	STETM
Sellama NADIFI	Membre résident, Professeur, Université Hassan II de Casablanca	STV
Ahmadou Lamine NDIAYE	Membre associé, Académie des Sciences et Techniques du Sénégal	STV
Driss OUAZAR	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	STETM
El Maati OUHABAZ	Membre correspondant, Professeur, Université de Bordeaux, France	SMI
Youssef OUKNINE	Membre résident, Professeur, Université Cadi Ayyad Marrakech	SMI
El Hassan SAIDI	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	SPC
Albert SASSON	Membre résident Professeur	STV
Abdelaziz SEFIANI	Membre résident, Professeur, Institut National d’Hygiène Rabat	STV
Khalid SEKKAT	Membre résident, Professeur, Université Libre de Bruxelles, Belgique	ESDE
Wafa SKALLI	Membre correspondant, Professeur, ENSAM, Paris	ITIT
Mohamed SMANI	Membre correspondant, R&D Maroc	ITIT

Prénom et NOM	Qualité/Profession	Collège
Philippe A. TANGUY	Membre associé, Professeur, Ecole Polytechnique, Montréal, Canada	ITIT
Redouane TAOUIL	Membre correspondant, Professeur, Centre de Recherche en Économie de Grenoble, France	ESDE
Philippe TAQUET	Membre associé, Professeur, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France	STETM
Rachid YAZAMI	Membre correspondant, Professeur, Nanyang Technological University - Singapour.	SPC
André ZAOUI	Membre associé, Professeur, Ecole Polytechnique, France	SPC
Mahfoud ZIYAD	Membre résident Professeur, Université Mohammed V de Rabat	ITIT

LISTE DES INVITÉS

ayant présenté une communication

Prénom et NOM	Affiliation
Michel BRUNET	Collège de France, France
Jean CARTELIER	Université Paris-Ouest, EconomiX, France
Marc FONTECAVE	Collège de France, France
Gilles GODEFROY	Directeur de Recherche CNRS, France
Farid HAKKOU	Université Hassan II, Faculté de Médecine et de Pharmacie
Philippe HORVATH	Senior Scientist, DuPont Nutrition and Health, France
Säïd IHRAÏ	Commission nationale de contrôle de protection des données à caractère personnel (CNDP)
Philippe KOURILSKY	Collège de France, France
Alain PROCHIA NTZ	Administrateur Général du Collège de France, France
Enrique SORIA LASCORZ	CIEMAT, Espagne



2016 ááñud áá°Sod ááef°G 10hód° ' ÚcDf°ññG 10f°U

Photo des participants à la Session Plénière Solennelle 2016

- تعزيز إشعاع الأكاديمية على المستوى الدولي وأواصر التعاون العلمي والتقني مع البلدان الإفريقية،

- دعوة الطلبة الدكاترة للحضور والمساهمة في أشغال بعض أنشطة الأكاديمية،

- التفكير في وضع بنية وطنية لتشجيع وتحفيز البحث الطبي في المغرب.

في ختام هذه المناقشة، تناول الكلمة أمين السر الدائم، لإضافة المعلومات والتوضيحات التالية:

- التفكير الجماعي والتعاون التشاركي لتحسين عمل الأكاديمية،

- دعوة مديري الهيئات العلمية أن يحيلوا على الأكاديمية حصيلة الأنشطة الرئيسية للهيئات العلمية خلال العشر سنوات الأولى للأكاديمية بغاية إعداد الوثيقة بشن التقرير المرحلي (2006-2016)، فضلا عن المقترحات للأنشطة المزمع القيام بها خلال سنة 2016،

- تحضير بداية من الآن للاجتماع الذي سينعقد مع ممثلي أكاديميات العلوم الإفريقية أيام 17 و 18 ماي 2016.

أخيرا نهئى أنفسنا على نجاح الدورة الرسمية العامة لسنة 2016.

عند نهاية هذه الجلسة، أعطيت الكلمة من جديد إلى السيد أمين السر الدائم حيث تطرق لأهم النتائج التي تم استخلاصها من هذه الدورة، وأكد على جودة وغناء المداخلات والمناقشات، كما جدد تشكراته لجميع المساهمين في هذه الدورة وخصوصا للشخصيات التي تقدمت بعروض أو مداخلات في الموضوع العلمي العام لهذه الدورة. كما تقدم بتشكراته إلى كافة أعضاء الأكاديمية، وإلى كل العاملين بها، وإلى طاقم الترجمة وهنئهم على إنجاح أشغال هذه الدورة.

بعد ذلك أعلنت مديرة الجلسات عن اختتام أشغال هذه الدورة بعد المصادقة على نص برقية الولاء والإخلاص المرفوعة إلى السدة العالية بالله صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله والمشفوعة بمشاعر التقدير والعرفان، وبعبارات الشكر والامتنان.

بعد ذلك، أعطيت الكلمة لأمين السر الدائم لتقديم نتائج انتخاب أعضاء مجلس الأكاديمية، وأعضاء لجنة الأعمال، التي أسفرت على النتائج التالية:

• أعضاء مجلس الأكاديمية :

- السيد عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم،
- السيد مصطفى بوسمينه، نائب أمين السر الدائم،
- السيدة رجاء الشرقاوي مرسلي،
- السيد تيجاني بونحميدي،
- السيد يوسف أوكنين.

• أعضاء لجنة الأعمال :

- السيد عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم،
- السيد مصطفى بوسمينه، نائب أمين السر الدائم،
- السيدة سلامة الناضيفي،
- السيد ألبر ساسون،
- السيد مالك غلاب،
- السيد أحمد الحسني
- السيد ادريس أبو تاج الدين.

بعد تقديم هذه النتائج، جرت مناقشة واسعة بين الأكاديميين حول تقرير أشغال الأكاديمية للسنة المنتهية، أسفرت على عدة ملاحظات وتوصيات يمكن تلخيصها في ما يلي:

- تبين نتائج ومخرجات مشاريع البحث المدعمة من طرف الأكاديمية أن هناك عدد قليل جدا من تسجيل براءات الاختراع، حيث أصبح من الضروري تشجيع تثمين نتائج هذه البحوث،
- إن المواضيع ذات الأولوية المتعلقة بطلب العروض الجديد التي تم اعتمادها من طرف الأكاديمية في دورتها العادية ليوم 05 يونيو 2015 تظل محدودة. رغم ذلك، يمكن للأكاديمية أن تدرس إمكانية تمويل أي مشروع البحث وثيق الصلة وذات جودة،
- يمكن إيجاد الحل لمنح الدكتوراة التي تعطى للطلبة في سياق مشاريع البحث المدعومة من طرف الأكاديمية عن طريق المركز الوطني للبحث العلمي والتقني استنادا على المذكرة الوزارية الجديدة المتعلقة بتمويل طلبة الدكتوراه التي توجد في طور الإنجاز،

- التوقيع على معاهدة التعاون مع أكاديمية العلوم لكولومبيا،
 - تقوية علاقة التعاون مع أكاديميات العلوم الإفريقية،
 - المشاركة في اجتماعات الشبكات العالمية الثلاثة لأكاديميات العلوم،
 - حضور اجتماع الهيئة التنفيذية لشبكة أكاديميات العلوم الإفريقية NASAC.
 - زيارة بعض أعضاء هيئة علوم وتقنيات البحر، والأرض والماء والبيئة لأكاديمية العلوم الفرنسية وأكاديمية العلوم البرتغالية،
 - إعداد تنظيم اجتماع اللجنة التنفيذية للشبكة الإفريقية لأكاديميات العلوم بالرباط،
- بعد تقديم هذا التقرير، واصلت الأكاديمية أشغالها حيث قدم فيها كل مدير سابق للهيئات العلمية نتائج انتخاب مدير ونائب مدير كل هيئة التي تم خلال اجتماع الهيئات العلمية الذي انعقد يوم 16 فبراير 2016 قبل الجلسة الافتتاحية. هذه النتائج هي كالتالي:

• هيئة علوم وتقنيات الأحياء

- المدير: إعادة انتخاب السيد ألبير ساسون
- نائبة المدير: إعادة انتخاب السيدة سلامة الناضيفي

• هيئة علوم وتقنيات البيئة والأرض والبحر

- المدير: إعادة انتخاب السيد أحمد الحسني
- نائب المدير: إعادة انتخاب السيد إدريس وزار.

• هيئة علوم الفيزياء والكيمياء

- المدير: إعادة انتخاب السيدة رجاء الشرقاوي مرسلتي
- نائب المدير: إعادة انتخاب السيد مختار الساسي

• هيئة علوم التنظير والإعلام

- المدير: إعادة انتخاب السيد يوسف أوكنين
- نائب المدير: انتخاب السيد معطي أوهاباز

• هيئة علوم الهندسة، الإبداع والنقل التكنولوجي

- المدير: انتخاب السيد تيجاني بونحميدي
- نائب المدير: انتخاب السيد علي البخاري

• هيئة الدراسات الإستراتيجية والتنمية الاقتصادية

- المدير: إعادة انتخاب السيد محمد بريان
- نائب المدير: إعادة انتخاب السيد خالد السقاط.

- دعم الجمعية المغربية للعلوم الاقتصادية لتنظيم المدرسة الأكاديمية حول موضوع «النمذجة ومستقبلية الاقتصاد» مفتوحة لطلاب الدكتوراه في الاقتصاد، ومنح جائزة لأحسن أطروحة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية.

• المساهمة في تحديد السياسة الوطنية للبحث العلمي والتقني من خلال:

- المشاركة وتنظيم اللقاءات المخصصة للبحث العلمي والتكنولوجي،
- مساهمة الأكاديمية في أشغال الهيئات الوطنية (المجلس الأعلى للتربية والتكوين والبحث العلمي، اللجنة الوطنية لتنسيق التعليم العالي، المجلس الإداري للمركز الوطني للبحث العلمي والتقني...)

• تطوير تدريس العلوم والنهوض بالثقافة العلمية من خلال:

- المشاركة في أشغال اللجنة التي أنشأتها وزارة التربية الوطنية والتكوين المهني لقيادة وتتبع مسألة تدريس العلوم والتكنولوجيات، وتوجيه التلاميذ نحو هذه المسالك،

- إعداد التقرير الأولي حول تقييم النوادي العلمية،

- تنظيم ورشة حول التكوين في النشر والتواصل العلمي الهادف إلى تنمية المنشورات العلمية،

- المشاركة في المجموعة الأكاديمية الإفريقية - الأوروبية - المتوسطية للنهوض بتدريس العلوم،

- تنظيم الدورة العاشرة لأيام «الشباب والعلم في خدمة التنمية»،

- المساهمة في تنظيم المعرض الوطني الأول لإبداع الشباب،

- تنظيم حلقة المحاضرات، والمساهمة في تنظيم الندوات، واللقاءات والأيام الدراسية....

- نشر منشورات الأكاديمية (وقائع جلسات الدورة الرسمية 2015، النشرة العلمية رقم 17 و 18، رسالة الأكاديمية رقم 25 و 26 و المجلد 5 (1 و 2) من مجلة الأكاديمية «حدود في العلوم والهندسة».

• النهوض بالتعاون العلمي وتعزيز حضور الأكاديمية على مستوى الدولي من خلال:

- التوقيع على معاهدة الإطار للتعاون والشراكة مع أكاديمية العلوم والآداب والفنون لتونس،

الأكاديمية خلال السنة المنتهية وذلك في سياق تفعيل المهام الرئيسية للأكاديمية المنصوص عليها في الظهير الشريف المحدث لها. واصلت الأكاديمية، خلال سنة 2014-2015، إنجاز أعمالها وأنشطتها المتعلقة بالمهام التالية:

• النهوض وتنمية وتمويل البحث العلمي والتكنولوجي من خلال:

- تنظيم اجتماعات الأجهزة المشرفة على إدارة أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات (مجلس الأكاديمية (6 اجتماعات)، لجنة الأعمال (5 اجتماعات)، الهيئات العلمية (32 اجتماع))،
- تنظيم الدورات العادية الموضوعاتية للأكاديمية (السكة الدماغية، الأمراض الجينية، النهوض وتنمية البحث العلمي في المغرب، تدريس العلوم، صناعة الطيران في المغرب ...)،
- إعداد وتهيئ الدورة الرسمية العامة لسنة 2016 وبرنامج الاحتفاء بالذكرى العاشرة لتنصيب الأكاديمية،
- متابعة تمويل مشاريع البحث المدعمة من طرف الأكاديمية في إطار طلب العروض 2010-2011،
- متابعة تمويل مشاريع البحث المدعمة في إطار التعاون الدولي،
- تقييم برنامج دعم مشاريع البحث العلمي،
- إصدار ونشر التقرير حول تجربة أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات بخصوص دعم مشاريع البحث العلمي والتقني،
- تحديد المواضيع ذات الأسبقية بالنسبة لطلب العروض الجديد،
- دعم التظاهرات العلمية التي تنظمها المجوعة العلمية الوطنية (دعم 36 تظاهرة علمية بمقدار 275000 درهم)،
- إعداد تقارير حول واقع البحث العلمي في مختلف الميادين العلمية (العلوم الطبية والصحة، علوم الفيزياء...)،
- تقديم منح التميز للفائزين في المباراة الوطنية في العلوم والتقنيات التي شارك فيها المتفوقون الأولون الحاصلين على شهادة البكالوريا لسنة 2015 في المسالك العلمية والتقنية،
- مساهمة الأكاديمية في التظاهرات العلمية داخل وخارج الوطن،

بعد نهاية هذه العروض تم فتح مناقشة عامة سيرتها الأستاذة سلامة الناضيفي مديرة الجلسات.

الخميس 09 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 18 فبراير 2016 صباحا (الجزء الثاني)
الجلسة العامة الخامسة حول «الأخلاقيات في العلم»

بعد الجزء الأول من الجلسة العامة الخامسة، تابعت الأكاديمية أشغال جلساتها في جزئها الثاني بعقد مائدة مستديرة، تميزت بالاستماع إلى خمس مداخلات حول موضوع «الأخلاقيات في العلم» قدمت من طرف كل من :

- الأستاذ مالك غلاب، عضو مقيم بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات؛
- الأستاذ كارلوس كاستيا، عضو مقيم بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات؛
- الأستاذ عد الله مقسط، عضو مراسل بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات؛
- الأستاذ فريد حكو، أستاذ بكلية الطب والصيدلة بجامعة الحسن الثاني بالدار البيضاء؛
- الأستاذ سعيد أهراي، رئيس اللجنة الوطنية لمراقبة حماية المعطيات ذات الطابع الشخصي.

بعد تقديم هذه المداخلات، جرت مناقشة سيرت من طرف الأستاذ الطيب الشكيلي، عضو مقيم بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات.

الخميس 09 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 18 فبراير 2016 زوالا

الجلسة المغلقة

تقديم ومناقشة أعمال ونشاط الأكاديمية خلال السنة المنتهية

تجديد أجهزة الأكاديمية

و

الجلسة الختامية

بعد زوال يوم الخميس 09 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 18 فبراير 2016، واصلت الأكاديمية أشغالها في جلسة مغلقة، خصصت لتقديم ومناقشة التقرير السنوي لعمل وأنشطة الأكاديمية خلال سنة 2014-2015. في بداية هذه الجلسة، أعطيت الكلمة لأمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات لتقديم التقرير عن عمل وأنشطة

- الأستاذ المعطي أوهباز، عضو مراسل بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «رحلة في عالم المعادلات للمشتقات الجزئية».

بعد هذه العروض حصلت مناقشة عامة سيرتها الأستاذة سلامة الناضيفي مديرة الجلسات.

الأربعاء 08 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 17 فبراير 2016 زوالا الجلسة العامة الرابعة حول «التكنولوجيات الجديدة، الطاقة والبيئة»

بعد فترة الاستراحة عقدت الأكاديمية جلستها الرابعة حول موضوع «التكنولوجيات الجديدة، الطاقة والبيئة» حيث تم خلالها الاستماع إلى ثلاثة عروض قدمت من طرف:

- الأستاذ إنريكي سوريا لاسكورز (CIEMAT، إسبانيا)، حول «الطاقة الريحية من الطاقات المتجددة الأكثر تنافسية»؛
- الأستاذ رشيد يزمي، عضو مراسل بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «القياسات الجسيمة لعلوم وتكنولوجيات البطاريات»؛
- الأستاذ فيليب طانكي، عضو مشارك بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «التعاون والتشارك في الابتكار : أي دور للبحث العلمي».

بعد نهاية هذه العروض تم فتح مناقشة عامة أدارتها الأستاذة سلامة الناضيفي مديرة الجلسات.

الخميس 09 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 18 فبراير 2016 صباحا (الجزء الأول) الجلسة العامة الخامسة حول «الاقتصاد والفلاحة»

استأنفت أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات أشغال دورتها الرسمية يوم الخميس 18 فبراير 2016 صباحا بانعقاد الجلسة العامة الخامسة التي خصصت في جزئها الأول لموضوع «الاقتصاد والفلاحة» تم خلالها الاستماع إلى ثلاثة عروض قدمت من طرف:

- الأستاذ جون كارتولي، جامعة باريس الغربية، حول «حالة العلوم الاقتصادية : نحو اختفاء النظرية الاقتصادية»؛
- الأستاذ رضوان الطويل، عضو مراسل بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «التوافق الجديد الماكرواقتصادي: التوحيد عن طريق نظام التوازن»؛
- الأستاذ محمد آيت قاضي، عضو مقيم بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، حول «فلاحة المستقبل: تحديات علمية بكثافة».

• الأستاذ مارك فونتكاف (كوليج دو فرانس، فرنسا) حول «الكيمياء وعلم الحياة أي حدود؟»؛

• الأستاذة نادية الكيسي، عضوة مراسلة بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات حول «مواد المستقبل ووعود الطبيعة».

بعد هذه العروض فتح باب المناقشة سيرتها الأستاذة سلامة الناضيفي مديرة الجلسات.

الأربعاء 08 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 17 فبراير 2016 صباحا الجلسة العامة الثانية حول «علوم وتقنيات الأحياء»

بعد الاستراحة، تابعت الأكاديمية أشغالها بانعقاد الجلسة العامة الثانية حول موضوع «علوم وتقنيات الأحياء»، والتي تم خلالها الاستماع إلى ثلاثة عروض قدمها كل من :

• الأستاذ فيليب كوريلسكي (كوليج دو فرانس، فرنسا) حول «من التنوع الجيني إلى تعقد الأحياء»؛

• السيد فيليب هورفات (عالم رئيسي، قنطرة التغذية والصحة، فرنسا) حول «من منظومة المناعة الجرثومية إلى الأداة الثورية للهندسة الجينية»؛

• الأستاذ ألآن بروشيانتز (المدير العام لكوليج دو فرانس) حول «فيزيولوجية الدماغ كخلق جنيني صامت».

بعد نهاية هذه العروض نظمت مناقشة عامة سيرتها الأستاذة سلامة الناضيفي مديرة الجلسات.

الأربعاء 08 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 17 فبراير 2016 زوالا الجلسة العامة الثالثة حول «الرياضيات وعلوم الكون»

خصص الجزء الأول من زوال يوم الأربعاء 08 جمادى الأولى 1437 الموافق ل 17 فبراير 2016 للجلسة العامة الثالثة حول موضوع «الرياضيات وعلوم الكون»، حيث تم خلالها الاستماع إلى ثلاثة عروض علمية قدمت من طرف:

• الأستاذ جيل كوديفروي، مدير البحث بالمركز الوطني للبحث العلمي بفرنسا، حول «الرياضيات أفكار بسيطة في خدمة الجميع»؛

• الأستاذ جون ميشيل أليمي، مرصد باريس مودون، فرنسا، حول «مسألة الأصل : حصيلة وآفاق علوم الفلك والفيزياء والفيزياء الفلكية في غليان»؛

وبخصوص سير أشغال هذه الدورة، أشار الأستاذ عمر الفاسي الفهري بأن الدورة العامة الرسمية لهذه السنة تسعى إلى تقديم مساهمة وتسليط الضوء حول العلم وتجلياته العديدة ولاسيما في ما يخص بعض الحقول الأساسية العلمية كعلوم المادة، وعلوم الهندسة، وعلوم الحياة، وعلوم الأرض، والعلوم الزراعية، وعلوم الاقتصاد. كما أضاف أن الهدف المتوخى من هذه الدورة الرسمية هو مناقشة التطورات العلمية والتقدم الهائل للعلم الذي يميز عصرنا، وتكوين فكرة حول الانتظارات المتوقعة، والتطور، والتحديات المستقبلية، وأيضا تحديد أنجع السبل للاندماج الكامل للعلم مع حاجيات المجتمع ولاسيما فيما يتعلق بالتنمية البشرية، وذلك بالنسبة لبلادنا سعيا لتعزيز انخراطها في اقتصاد ومجتمع المعرفة. كما يجب التذكير أن الاكتشافات العلمية يمكن لها أن تكون مصدر عدد من المخاوف وأن تثير كثيرا من التساؤلات على مستوى الأخلاق. لهذه الأسباب يتضمن برنامج هذه الدورة على جلسة مخصصة لمسألة الأخلاقيات في العلم.

مباشرة بعد نهاية الكلمة الافتتاحية وتقديم برنامج الدورة، تم التوقيع على اتفاقية شراكة بين أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، ووزارة التربية الوطنية والتكوين المهني، والجمعية المغربية للبحث والتنمية، وقعت من طرف الأستاذ عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، والسيد رشيد بن المختار وزير التربية الوطنية والتكوين المهني، والسيد أحمد ناقوش رئيس الجمعية المغربية للبحث والتنمية.

بعد ذلك تابعت الأكاديمية أشغالها بالاستماع إلى المحاضرة الافتتاحية حول موضوع «من أين أتينا...؟ التاريخ الجديد للبشرية على ضوء الاكتشافات الجديدة» التي ألقاها الأستاذ ميشيل بروني، أستاذ بكوليج دو فرانس بفرنسا. عند نهاية المحاضرة تم إرجاء المناقشة إلى يوم الغد صباحا.

الأربعاء 08 جمادى الأولى 1437 الموافق لـ 17 فبراير 2016 صباحا الجلسة العامة الأولى حول «علوم المادة»

في بداية الجلسة العامة المنعقدة صباح يوم الأربعاء 17 فبراير 2016، طلب أمين السر الدائم من الحاضرين الوقوف دقيقة صمت ترحما على روح الفقيد عبد الغني بلوقيد، عضو مراسل بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، الذي وافته المنية يوم 31 غشت 2015. بعد ذلك تابعت الأكاديمية أشغالها بدراسة الموضوع حول «علوم المادة»، والتي تم خلالها الاستماع إلى ثلاثة عروض قدمها كل من:

- الأستاذة كاترين بريشنيك، عضوة مشاركة بأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، وأمينة السر الدائمة لأكاديمية العلوم الفرنسية حول موضوع «تحديات الفيزياء»؛

انعقدت الدورة الرسمية العامة لسنة 2016 لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات بقاعة المحاضرات بمقر أكاديمية المملكة بالرباط أيام الثلاثاء 07 والأربعاء 08 والخميس 09 جمادى الأولى 1437 هجرية، الموافق لـ 16 و 17 و 18 فبراير 2016 ميلادية، حول الموضوع العلمي العام «العلم وتجلياته العديدة».

الثلاثاء 07 جمادى الأولى 1437 الموافق لـ 16 فبراير 2016 زوالا

جلسة مغلقة للأكاديمية

الجلسة الافتتاحية

الكلمة الافتتاحية

محاضرة الافتتاح حول موضوع «من أين أتينا...؟ التاريخ الجديد للبشرية على ضوء الاكتشافات الجديدة»

يوم الثلاثاء 07 جمادى الأولى 1437 الموافق لـ 16 فبراير 2016 ما بين الساعة الثانية والرابعة زوالا اجتمعت الهيئات العلمية الستة بشكل منفصل في قاعات أكاديمية المملكة لمراجعة حصيلة أنشطتها لسنة 2015 ومناقشة خطة عملها لسنة 2016.

في الساعة الرابعة والنصف زوالا لنفس اليوم انطلقت الجلسة الافتتاحية لأشغال الدورة العامة الرسمية لسنة 2016 لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات بقاعة المحاضرات بمقر أكاديمية المملكة بالرباط بحضور عدد من الشخصيات المدعوة منهم عدد من مستشاري صاحب الجلالة وعدد من الوزراء في الحكومة المغربية؛ كما حضرها عدد من ممثلي وسائل الإعلام السمعية البصرية والمكتوبة.

في بداية الجلسة الافتتاحية تم انتخاب السيدة سلامة الناضيفي مديرة للجلسات خلفا للسيد تيجاني بونحميدي الذي انتهت ولايته. مباشرة بعد ذلك أعطيت الكلمة للأستاذ عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، لإلقاء الكلمة الافتتاحية والترحيب بالحاضرين. ولقد ذكر الأستاذ عمر الفاسي الفهري في كلمته بأن انعقاد الدورة العامة الرسمية لهذه السنة يتزامن مع الاحتفاء بالذكرى العاشرة لتنصيب أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات من طرف صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله. كما أشار أن هذه الدورة الرسمية تمثل الحدث الرئيسي بالنسبة لبرنامج عام يتضمن عددا من التظاهرات العلمية التي سيتم تنظيمها حول مواضيع معينة في عدد من جهات المملكة على طول سنة 2016.

كما شكر الشخصيات العلمية ذات المستوى الرفيع، التي لبت دعوة الأكاديمية وأتت من المغرب ومن خارجه (فرنسا، إسبانيا، الولايات المتحدة الأمريكية، المكسيك، كندا، شيلي، تونس، السينغال) لتساهم في تنشيط أشغال الدورة العامة بارتباط مع الموضوع العام للدورة «العلم وتجلياته العديدة».

**محضر أشغال الدورة الرسمية العامة السنوية لأكاديمية
الحسن الثاني للعلوم والتقنيات
لسنة 1436 هجرية الموافق لسنة 2016 ميلادية**

حول موضوع :

«العلم في كل تجلياته»

سيداتي سادتي،

في خضم هذا الغليان العلمي ماذا عن المغرب؟

علما أن كل سياسة علمية واقعية وفعالة يجب أن تنبني أولا على منظومة للتربية والتكوين تكون فعالة وتضمن تدريس جيد للعلوم، وتسعى إلى تكوين أطر ذات كفاءة، وأن البحث العلمي في المغرب يجب أولا أن يجيب على الحاجيات المستعجلة وذات الأسبقية بالنسبة للبلاد، يعني تحسين ظروف عيش المواطنين وعلى المساهمة في عصرنه وتنمية البلاد على جميع الأصعدة، كما يجب أيضا أن يساهم البحث العلمي المغربي في البحوث العلمية العالمية المتقدمة التي هي بصدد خلق ثورة في نظرتنا إلى العالم.

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي

في هذه الدورة يشارك معنا ثلة من الشخصيات العلمية المرموقة جاءت من المغرب ومن خارج المغرب (من الولايات المتحدة، فرنسا، إسبانيا، الشيلي، المكسيك، السنغال، تونس، البرازيل، كندا والسويد) الذين سيقدمون محاضرات ومدخلات حول موضوع هذه الدورة، أشكرهم جزيل الشكر على قبولهم دعوتنا، ومرحبا بهم معنا.

في نهاية هذه الكلمة، أريد أن أتقدم بجزيل الشكر بالخصوص لصديقي الأستاذ عبد الجليل الحجمري، أمين السر الدائم لأكاديمية المملكة على كل المساعدات والتسهيلات التي يقدمها كعادته لتنظيم دوراتنا الرسمية.

أريد كذلك أن أتقدم بالشكر الحار لكل أعضاء مجلس الأكاديمية ولجنة الأعمال والهيئات العلمية وكل أعضاء الأكاديمية، وجميع العاملين في إدارتها على ما يقدموه من عطاء لصالح الأكاديمية وخصوصا بالنسبة لتحضير هذه الدورة في أحسن الظروف، التي نتمنى النجاح لأشغالها ولأكاديميتنا أن ترقى إلى ما يطمح لها راعيها صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله وأيده، وهو أن نكون «في خدمة الوطن، وأن نساهم في تنمية العلوم بأبعادها الكونية».

أشكركم على إصغائكم.

البعيدة، ونعرف الكثير عن جينوم العديد من المخلوقات بما فيه جينوم البشر. كما أن العلم أصبح اليوم يمر بمرحلة انتقالية ويوجد في مفترق الطرق، وأن علامات بداية علم عالمي جديد أضحت وضوحاً أكثر فأكثر، حيث أصبح العلم متعدد التخصصات ويسعى إلى دمج العلوم الاجتماعية والطبيعية.

في الماضي، اهتمت المناهج العلمية بدراسة العمليات الطبيعية الفردية بدلاً من النظم الطبيعية، وبالتحليل بدلاً من التركيب، وبفهم الطبيعة بدلاً من توقع سلوكها. وفي كثير من الأحيان ركز العلم اهتمامه على المشاكل ذات البعد القصير وعلى نطاق صغير معتمداً في كثير من الأحيان على مقارنة علمية موحدة التخصص، بدلاً من التركيز على المشاكل ذات المدى الطويل وعلى نطاق واسع مع مقارنة علمية متعددة التخصصات وأكثر شمولية للعلم.

في بداية هذه الألفية الثالثة، يعرف العلم غليان حاد يغذيه تراكم المعرفة الكونية المكتسبة الناتجة عن الاكتشافات والابتكارات على مدى قرن من الزمان. كما أن جميع المؤشرات توضح أننا أصبحنا في فجر عصر علمي جديد مشابه لذلك الذي شهد اكتشاف العالم الجديد مع كل ما ينطوي عليه من غموض وتكهّنات، مماثل كذلك لبداية القرن المنصرم الذي شهد ولادة الفيزياء الكونية والنسبية التي غيرت مسار الحياة اليومية للإنسان.

إن مواضيع النقاش العلمي ستزداد بحلول أواخر القرن الواحد والعشرين، حيث ستصبح تكنولوجيا النانو، وعلوم الحياة التركيبية، وأيضاً الروبوتات البشرية، وكذلك العلاج البيولوجي والجيني واقعا ملموسا. كما أن التغيرات المناخية والاحتباس الحراري، التي أصبحت ملموسة اليوم على الأقل في القطبين، ستغير الظروف المعيشية في أجزاء كثيرة من العالم. ناهيك عن استنفاد بعض الموارد الطبيعية.

البعض يعتقد أن عصراً جيولوجياً جديداً قد بدأ بالفعل مع الثورة الصناعية، وأن الاحتباس الحراري يمكن مواجهته بترويض المناخ والتأثير عليه عن طريق اختراع نظام لاستخراج أكسيد الكربون CO_2 من الغلاف الجوي، أو الحد من أشعة الشمس على سطح الأرض عن طريق حقن الكبريت في الغلاف الجوي العالي.

إن التطور السريع للعلوم والتكنولوجيا أصبح اليوم مذهلاً، ويحدونا باستمرار إلى سؤال مخيّلنا وتوقعاتنا، وكلما ازداد هذا التطور نزداد نتساءل حول الآثار الأخلاقية الناتجة عن هذا التطور. إن العلم والتكنولوجيا يمكن لهما أن يثيرا عدد من المخاوف. فهما يخلقان في بعض الأحيان حالة من الارتباك وكثير من التساؤلات الأساسية حول حدود الأخلاقيات الناتجة عن تأثيرهما على حياتنا اليومية. لذا تقتضي الضرورة بأن الاكتشافات العلمية يجب تطبيقها في الاتجاهات المفيدة للإنسان. لهذه الأسباب ارتأينا أنه من المناسب إدماج مسألة الأخلاقيات في العلم ضمن برنامج هذه الدورة.

العلم يعتبر دائما في «حالة غليان» وفي حركة دائمة لكونه يتوصل كل يوم إلى اكتشافات واختراعات جديدة، والآن أصبحت نتائجه تصل بسرعة أكبر وبكمية أكثر، وكل يوم نرى أننا مازلنا نجهل الكثير من الأمور والأشياء. وأعتقد أن أينشتاين هو الذي قال « كلما أدركت الأشياء كلما أدركت كم أنا جاهل» وقبله كلارك ماكسويل الذي قال «من دون وعي عميق لجهلنا لا يمكن أن يكون هناك تقدم حقيقي في العلم».

في القرن العشرين، مع اختراع المطبعة من قبل غوتنبرغ، تضاعفت كمية المعلومات في أوروبا خلال مدة 50 سنة. اليوم، مع التكنولوجيات الجديدة، تتضاعف هذه الكمية كل 3 سنوات. وخلال 30 سنة الماضية، أنتجت البشرية أزيد من المعلومات التي أنتجتها خلال 2000 سنة من تاريخها وهذه الكمية تتضاعف كل 4 سنوات.

وآخر اكتشاف كبير هو الذي حدث خلال الأسبوع المنصرم مع ملاحظة موجات الجاذبية من طرف فريق أمريكي (LIGO) مؤكدين بذلك التنبؤ الذي سبق أن أدلى به أينشتاين قرن من الزمن قبل هذا. وإنني أطلع إلى الاستماع إلى العرض الذي ستقدمه زميلتنا الأستاذة كاترين بريشينيكا، والتي لا شك أنها ستطرق في عرضها إلى هذا الاكتشاف.

في أواخر القرن التاسع عشر، لم يتردد لورد كيلفان الفيزيائي الانجليزي المرموق في القول «لا يوجد اليوم شيء لم يكتشف بعد في الفيزياء. وكل ما تبقى القيام به هو تحسين دقة القياسات». سنوات قليلة بعد ذلك عرفت الفيزياء اثنين من الثورات الكبرى وهما الفيزياء الكونية والنسبية، اللتان أقلبتا كل المعارف والمفاهيم التي سادت لمدة طويلة حول المكان، الزمان، والضوء، وعالم متناه في الصغر، وعالم متناه في الكبر.

اليوم أيضا لازالت هناك تساؤلات كبيرة في جميع الميادين العلمية؛ ولاسيما في بعض التخصصات الرئيسية كالأنثروبولوجيا، وعلوم المادة، وعلوم الحياة، والفيزياء والكيمياء، بالإضافة إلى بعض الميادين العلمية المتعلقة بقضايا الطاقة، والبيئة والاقتصاد والفلاحة في المستقبل، سيكون لنا فرصة خلال اليومين القادمين لمناقشة هذه التساؤلات مع شخصيات علمية بارزة الذين سيقدمون محاضرات ومداخلات حول موضوع هذه الدورة، أشكرهم جزيل الشكر على قبولهم دعوتنا.

أصحاب السعادة،

سيداتنا سادتي،

لقد عرف العلم لأكثر من قرن من الزمن تطورا هائلا وتحولات عميقة حتى أصبحت سعته لا يدركها الجميع، بما في ذلك وسط المجموعة العلمية. لقد أصبح العلم أكثر من وقت مضى يمثل بالنسبة لمجتمعاتنا رهانا كبيرا وعاملا حاسما لتطورها. بفضل العلم على مدى العقود الماضية تعلمنا الكثير وأصبحنا نعلم المزيد عن سلوك الجسيمات الأساسية، ونكتشف كل يوم أكثر من الأجسام الكونية

علمائنا بصفة عامة، وأعضاء الأكاديمية بصفة خاصة، في الإسهام في رفع ما طرحه التنمية من تحديات، ولا سيما منها تلك المرتبطة بالتنمية البشرية». ففي هذا الإطار تسعى الأكاديمية جاهدة إلى الاطلاع بمهامها المتمثلة أساسا في :

- النهوض بالبحث العلمي،
- المساهمة في نشر الثقافة العلمية وتنمية تدريس العلوم في بلادنا،
- النشر المنتظم لمنشورات أكاديمية الحسّن للعلوم والتقنيات (أعمال الدورات الرسمية، النشرة الإخبارية، رسالة الأكاديمية، والمجلة العلمية «حدود في العلوم والهندسة»،
- تشجيع الامتياز في مجال العلوم على جميع المستويات،
- تقديم الدعم لمشاريع البحث حول مواضيع ذات الأولوية بالنسبة لبلادنا،
- تنظيم على طول السنة سلسلة من المحاضرات تلقى من طرف شخصيات علمية بارزة من المستوى العالمي،
- المساهمة في إدماج البحث العلمي والتقني في المحيط الاجتماعي والاقتصادي الوطني والدولي (صناعة الطيران، صناعة السيارات ...)،
- ضمان حضور الأكاديمية خارج المغرب على المستوى الإقليمي (شبكة الأكاديميات الإفريقية للعلوم)، وعلى المستوى الدولي (IAP).

هذه، باختصار شديد، بعض الأنشطة المتميزة التي قمنا بها خلال السنة المنصرمة والتي ستكون مناسبة لتعميق النقاش حولها بعد غد وخاصة دراسة كيفية تحسين وتعزيز عمل الأكاديمية.

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي،

تمثل هذه الدورة العامة الرسمية الحدث الرئيسي لبرنامج عام يتكون من عدد من التظاهرات العلمية التي سيتم تنظيمها على المستوى الجهوي بشراكة مع الجامعات التي نشكرها جزيل الشكر في عدة مدن كمراكش، وفاس، والدار البيضاء، وطنجة، والداخلية، والجديدة، والرباط. من المقرر كذلك أن يعقد لقاء بين أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات وأكاديميات العلوم الإفريقية في شهر ماي 2016 بالرباط.

سيداتي سادتي،

الآن إذا سمحتم سأقدم كلمة حول الموضوع العلمي العام لهذه الدورة «**العلم وتجلياته العديدة**» «**la science dans tous ses états**» .

بسم الله الرحمن الرحيم

معالي الوزراء،

أصحاب السعادة،

السيدات والسادة أعضاء الأكاديمية،

سيداتي سادتي،

بتاريخ 18 مايو 2006، أي أقل بقليل من 10 سنوات، تفضل صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله وأيده، بتنصيب أكاديميتنا رسميا بالقصر الملكي بأكادير. إننا لازلنا نستحضر بتأثر بالغ هذا الحدث البارز الذي سيظل راسخا في أذهاننا إلى الأبد، وأيضا الكلمة المولوية السامية التي ألقاها بهذه المناسبة؛ نعقد اليوم هذه الدورة العامة الرسمية لأحياء هذه الذكرى العاشرة، وأيضا لمعالجة الموضوع العلمي الذي تم اختياره بعد الموافقة السامية لصاحب الجلالة الملك محمد السادس حول «العلم وتجلياته العديدة».

اسمحوا لي باسم كل أعضاء الأكاديمية أن أجدد التأكيد لصاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، عن أصدق مشاعر التقدير والامتنان، وعن أسمى عبارات الشكر وجميل العرفان، راجين من الله العلي القدير أن يعيننا حتى نكون عند حسن ظن جلالته وأهلا لثقته الغالية وعطفه الكريم.

كما أغتنم هذه المناسبة لأقدم بالشكر الجزيل لجميع الشخصيات التي جاءت من المغرب وخارجه والتي أبت إلا أن تشرفنا بحضورها ومشاركتها في هذه الجلسة الافتتاحية، فمرحبا بجميع ضيوفنا الكرام.

أصحاب السعادة،

سيداتي سادتي،

في إطار هذه الكلمة الافتتاحية، سوف لا أطيل حول حصيلة أنشطة الأكاديمية للسنة الماضية، سوف تتاح لنا الفرصة، بعد غد الخميس، لتقديم التقرير المفصل عن كل الأعمال والأنشطة التي قامت بها الأكاديمية أثناء السنة الممتدة من 15 فبراير 2015 إلى 15 فبراير 2016. أود خلال هذه الجلسة، التذكير فقط، بأن أكاديميتنا خلال السنة المنصرمة حافظت على خطها الذي حددته في إطار التوجيهات السامية التي رسمها لها راعيها صاحب الجلالة حين دعاها في خطابه عند تنصيبها إلى «خدمة الوطن والإسهام في تنمية العلم في أبعاده الكونية، مؤكدا جلالته على «أهمية الدور الفاعل الذي يقوم به

كلمة الأستاذ عمر الفاسي الفهري
أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات
في
الجلسة الافتتاحية الرسمية لأشغال الدورة العامة لسنة 2016
لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات
- الرباط، الثلاثاء 16 فبراير 2016 -

في بعض التخصصات الرئيسية كعلوم المادة، وعلوم الحياة، وعلوم الكون، والتكنولوجيات الجديدة، بالإضافة إلى بعض الميادين العلمية المتعلقة بقضايا الطاقة، والبيئة والاقتصاد والفلاحة في المستقبل. وقد تم خلال هذه الدورة تقديم عدة عروض ومداخلات علمية قدمت من طرف عدد من الأكاديميين وعلماء باحثين وشخصيات علمية مدعوة من المغرب وخارجه، تلتها مناقشة مستفيضة همت دور العلم وعلاقته بأهم القضايا والتساؤلات التي تهم المجتمع. كما تم خلال هذه الدورة تخصيص إحدى الجلسات لدراسة موضوع الأخلاقيات في العلم، تناول فيها المشاركون مختلف الجوانب الأخلاقية المرتبطة بمجال علوم وتكنولوجيا الحياة، ومجال التكنولوجيات الجديدة للمعلومات والاتصال، وكذلك بمجال البيئة والعلوم الفيزيائية والكيميائية. كما كانت هذه الدورة مناسبة أيضا لمناقشة أفضل السبل لإدماج العلم في تحقيق أوسع الحاجيات الاجتماعية على مستوى التنمية البشرية على وجه الخصوص، مع مراعاة المسائل المطروحة في مجال الأخلاقيات الناجمة عن التطورات العلمية الأخيرة وتأثيرها على الحياة اليومية.

وفي ختام أشغال هذه الدورة، تم تقديم التقرير السنوي لأنشطة الأكاديمية خلال السنة المنتهية الذي تضمن كل الأنشطة السنوية التي قامت بها الأكاديمية، تلتها مناقشة من طرف أعضاء الأكاديمية الذين أوصوا بأن تقوم الأكاديمية بدورها الكامل في النهوض بالعلم والتكنولوجيا في وطننا العزيز، وتساهم إلى جانب الجهود الجماعية للأمة ومؤسساتها الوطنية في مختلف أورش البناء والتشييد والتعمير، التي ما فتئت، أعز الله أمركم، تقودونها بعزيمة صادقة وعقيدة راسخة في كل ميادين التنمية عبر كل جهات المملكة.

وفق الله جلالكم لما فيه خير هذا البلد الأمين، وأبقاكم ذخرا وملازما لشعبكم الوفي، وأدامكم منارا عاليا وسراجا هاديا لمسيرة مغرب الحداثة والتقدم، وأقر عينكم بولي عهدكم الجليل صاحب السمو الملكي الأمير مولاي الحسن وبصاحبة السمو الملكي الأميرة الجليلة للا خديجة، وشد أزركم بشقيقكم السعيد صاحب السمو الملكي الأمير المولى الرشيد، وبسائر أفراد العائلة الملكية الشريفة، إنه على ما يشاء قدير، وبالإجابة جدير. والسلام على السدة العالية بالله ورحمة الله تعالى وبركاته.

خديم الأعتاب الشريفة
عمر الفاسي الفهري

حرر بالرباط في 09 جمادى الأولى 1437 الموافق 18 فبراير 2016

بسم الله الرحمن الرحيم، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين

نعم سيدي أعزك الله

حضرة صاحب الجلالة،

حفظكم الله يا مولاي، وسدد خطاكم، وخذل في الصالحات ذكركم، ورفع بالعز والنصر المكين رايتكم، والسلام على مقامكم العالي بالله ورحمته وبركاته.

مولاي صاحب الجلالة

بمناسبة اختتام أشغال الدورة العامة الرسمية العاشرة لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، المنعقدة بعاصمة مملكتكم الشريفة، أيام 07، 08 و 09 جمادى الأولى 1437 هجرية، موافق 16، 17 و 18 فبراير 2016 ميلادية، يتشرف خديم الأعتاب الشريفة، أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، بعد تقديم ما يليق بمقام صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله من فروض الطاعة والولاء، ومن واجب الإخلاص والوفاء، أن يتقدم إلى سيدنا المنصور بالله، أصالة عن نفسه، ونيابة عن أعضاء الأكاديمية المشاركين في هذه الدورة، بأصدق مشاعر التقدير والاحترام، وبأسمى آيات المحبة والإخلاص، معربين لجنايبكم الشريف عن امتنانهم الأكيد وعرفانهم العميق لما تغدقه جلالته عليكم من سابغ الرضى وحسن العناية، ولما تولونه للعلم وأهله من ضروب الإجلال وموصول الرعاية، ومؤكدين لجلالتكم حرصهم التام، والتزامهم الدائم على الإسهام في جعل المجتمع المغربي مجتمعا منتجا، منفتحا على علوم وتكنولوجيا العصر، متمسكا بمقوماته الروحية، وآخذا في ذات الوقت بكل أسباب النهضة والتقدم، مستثيرين في ذلك بتوجيهاتكم النيرة ونصائحكم السديدة، التي ما فتئتم، أعز الله أمركم، تولونها باستمرار للنهوض بالبحث العلمي والتكنولوجي حتى يرقى إلى المكانة الرفيعة في سلم القيم الوطنية، وهي توجيهات تعبر عن رغبة جلالته الأكيدة في أن تصبح أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، التي تحظى بشرف رعايتكم السامية، مرجعا في مجالات العلم والتكنولوجيا، وأن تساهم في خدمة هذا الوطن العزيز، وفي تنمية العلوم بأبعادها الكونية.

مولاي صاحب الجلالة

تزامنت الدورة العامة الرسمية لهذه السنة مع تخليد الذكرى العاشرة لتنصيب الأكاديمية من طرف جلالته، وتمحورت أشغالها، بعد موافقتكم الغالية، حول موضوع «العلم وتجلياته العديدة». كما تميزت بمشاركة عدة شخصيات علمية بارزة مغربية وأجنبية، انكبت على تقييم التقدم العلمي الكبير الذي يميز عصرنا الحاضر، وعلى مناقشة التحديات والتوقعات المستقبلية للعلم المعاصر، ولاسيما

**نص البرقية المرفوعة
إلى السدة العالفة بالله
صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله
على إثر اختتام أشغال الدورة العامة الرسمية لسنة 2016**

واقعا ملموسا. كما أن التغيرات المناخية والاحتباس الحراري، التي أصبحت ملموسة اليوم على الأقل في القطبين، ستغير الظروف المعيشية في أجزاء كثيرة من العالم. ناهيك عن استنفاد بعض الموارد الطبيعية.

بالإضافة إلى هذا، أصبح للعلم تأثير أكثر فأكثر على حياة الناس. كل الفوائد التي استخلصتها الإنسانية من العلم لم يسبق لها مثيل في تاريخ البشرية. لكن في بعض الحالات كانت لنتائج العلم آثار ضارة أو أن آثارها على المدى الطويل يثير عدد من المخاوف. لاشك أنه لم نكون نتوقع أبدا الكثير من العلم والتكنولوجيا وذلك بسبب الترابط الوثيق بين الرهانات السياسية والاقتصادية والاجتماعية والبيئية، وفي نفس الوقت، فهما يخلقان في بعض الأحيان حالة من الارتباك ومن التساؤلات الأساسية حول حدود الأخلاقيات الناتجة عن تأثيرهما على حياتنا اليومية. لذا فالإكتشافات العلمية يجب تطبيقها على المقاييس المناسبة والملائمة، كما أن تأثير التكنولوجيا على الأفراد، والجماعات والبيئة يجب أيضا معالجتها عن كثب.

إن جميع هذه المواضيع ستكون أرضية للحوار والنقاش خلال الدورة الرسمية العاشرة لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، المنظمة أيام 16، 17 و 18 فبراير 2016 حول الموضوع العلمي العام «العلم في كل تجلياته». إن العروض والمحاضرات وأيضاً الحوار والمناقشة التي ستليها ستكون مناسبة سانحة لتقييم التقدم من أجل العلم، والتقدم الحاصل عن طريق العلم، والتقدم داخل العلم. كما أن هذه الدورة ستكون فرصة لمناقشة التقدم العلمي الكبير الذي يميز عصرنا، وأيضاً التطور والتحديات والتوقعات المستقبلية للعلم المعاصر، خصوصا في بعض التخصصات الرئيسية كعلوم المادة، وعلوم الحياة، وعلوم الكون، والتكنولوجيات الجديدة، وكذلك بعض الميادين العلمية المتعلقة بقضايا الطاقة، والبيئة والاقتصاد والفلاحة المستقبلية.

إن النتائج المنتظرة من هذه الدورة ستكون من تحديد ميادين البحث العلمي الواعدة التي لها قدرة كامنة على الابتكار ونقل التكنولوجيا. كما أنها ستكون، بصفة عامة، من تدقيق أفضل السبل لإدماج تام للعلم في تحقيق أوسع الحاجيات الاجتماعية على مستوى التنمية البشرية على وجه الخصوص، ولتعزيز الاقتصاد ومجتمع المعرفة.

كما تتميز هذه الدورة الرسمية بطابع خاص لكونها تتزامن مع الاحتفال بالذكرى العاشرة لتنصيب أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات من طرف صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله. كما تعتبر هذه الدورة الحدث المركزي ومنار الأنشطة لمجموعة من التظاهرات العلمية حول مواضيع علمية آنية التي سيتم تنظيمها من طرف الأكاديمية في جميع جهات المملكة على مدار طول سنة 2016.

مقدمة

عرف العلم لأكثر من قرن من الزمن تطورا هائلا وتحولات عميقة حتى أصبحت سعته لا يدركها الجميع بما في ذلك وسط المجموعة العلمية. لقد أصبح أكثر من وقت مضى يمثل بالنسبة لمجتمعاتنا رهانا كبيرا وعاملا حاسما لتطورها. بفضل العلم على مدى العقود الماضية تعلمنا الكثير وأصبحنا نعلم المزيد عن سلوك الجسيمات الأساسية، ونكتشف كل يوم أكثر من الأجسام الكونية البعيدة، ونعرف الكثير عن جينوم الكثير من المخلوقات بما فيه جينوم البشر. كما أن العلم أصبح اليوم يمر بمرحلة انتقالية ويوجد في مفترق الطرق، وأن علامات بداية علم عالمي جديد أضحت وضوحا أكثر فأكثر، حيث أصبح العلم متعدد التخصصات ويسعى إلى دمج العلوم الاجتماعية والطبيعية.

في الماضي، اهتمت المناهج العلمية بدراسة العمليات الطبيعية الفردية بدلا من النظم الطبيعية، وبالتحليل بدلا من التركيب، وبفهم الطبيعة بدلا من توقع سلوكها. وفي كثير من الأحيان ركز العلم اهتمامه على المشاكل ذات البعد القصير وعلى نطاق صغير معتمدا في كثير من الأحيان على مقارنة علمية موحدة التخصص، بدلا من التركيز على المشاكل ذات المدى الطويل وعلى نطاق واسع مع مقارنة علمية متعددة التخصصات. إن المقاربة الأولى مكنت بالتأكيد من الحصول على مجموعة هائلة من المعارف، وعلى وضع مجموعة واسعة من التكنولوجيات المفيدة، خاصة في القرن العشرين. إلا أن العديد من المشاكل التي تواجهها البشرية اليوم سوف لا تجد الحل إلا بنهج مقارنة أكثر شمولية في مجال العلوم. لذا يجب بذل المزيد من الجهود لفهم النظم الطبيعية وفقا لمقاييس متعددة الزمان والمكان.

يعرف العلم في بداية هذه الألفية الثالثة غليان حاد يغذيه تراكم المعرفة الكونية المكتسبة الناتجة عن الاكتشافات والابتكارات على مدى قرن من الزمان. كما أن جميع المؤشرات توضح أننا أصبحنا في فجر عصر علمي جديد مشابه لذلك الذي شهد اكتشاف العالم الجديد مع كل ما ينطوي عليه من غموض وتكهّنات، مماثل كذلك لبداية القرن المنصرم الذي شهد ولادة الفيزياء الكونية والنسبية التي غيرت مسار الحياة اليومية للإنسان.

إن الثورات العلمية الناتجة عن الفيزياء الكونية وعلوم الكون إلى جانب نظريات الهباء (théorie de chaos)، ودراسة التعقيد ولا معكوسية، وأيضا التقدم الهائل في ميادين علم الأحياء وعلم الأعصاب، أظهرت عجز المقاربات الحتمية والاختزالية لإدراك طبيعة عالمنا. إن تكنولوجيا النانو، والتكنولوجيات الجديدة للاتصال، والسرعة الفائقة في اكتساب المعرفة، وأيضا الاكتشافات العلمية الأخيرة مثل بوزون دو هيغز، أصبحت الآن كلها على مشارف اكتشافات علمية ضخمة ستمكن دون شك على فهم أفضل للمادة والكون.

ستزداد مواضيع النقاش العلمي بحلول أواخر القرن الواحد والعشرين حيث ستصبح تكنولوجيا النانو، وعلوم الحياة التركيبية، وأيضا الروبوتات البشرية، وكذلك العلاج البيولوجي والجيني



المملكة المغربية
أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات

أشغال الدورة العامة الرسمية لسنة 2016

الموضوع :

العلم وتجلياته العديدة

الرباط، 16 - 18 فبراير 2016



صاحب الجلالة الملك محمد السادس - نصره الله -

راعي أكاديمية الحسن الثاني

للعلوم والتقنيات



المملكة المغربية
أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات

أشغال الدورة العامة الرسمية لسنة 2016

الموضوع
العلم وتجلياته العديدة

الرباط، 16 - 18 فبراير 2016