

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

n°13

juin 2013

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

Sa Majesté Le Roi Mohammed VI.

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

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

## La Physique aujourd'hui et ses applications (Thème général de la Session Plénière Solennelle 2013)

### Sommaire

• Editorial .....	9	• Perspectives .....	65
• Dossier spécial : «La Physique aujourd'hui et ses applications» .....	11	• Activités de l'Académie.....	71
• Focus : Le CNRST.....	43	• Nouvelles des académiciens .....	79
• Appui à la recherche scientifique et technique.....	51	• Actualités scientifiques .....	83



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

# n°13

juin 2013

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

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

*Publié par :*

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

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

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

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

**Rédacteur en Chef : Mohamed AIT KADI**

**Comité de rédaction:**

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

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

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

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





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





# Sommaire

<b>Editorial</b> .....	<b>9</b>
<b>La Physique aujourd'hui et ses applications</b> ( <i>Thème général de la session plénière solennelle 2013</i> ) .....	<b>11</b>
- Discours du secrétaire perpétuel à l'ouverture de la 8 <sup>ème</sup> session plénière solennelle Omar FASSI-FEHRI.....	14
- Où en est-on dans la compréhension des mécanismes qui régissent la matière? Catherine BRÉCHIGNAC .....	17
- Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des «chats de Schrödinger» de lumière Serge HAROCHE .....	22
- Les mathématiques et la physique un mariage heureux «Quelques réflexions sur les tribulations de l'entropie, allant et venant entre mathématiques et physique» - Cédric VILLANI.....	28
- Résumés des conférences de la session plénière solennelle .....	35
<b>Focus</b> .....	<b>43</b>
- Le CNRST au service de la recherche. Interview accordée par le Professeur Driss ABOUTAJDINE, directeur du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique.....	45
<b>Appui à la recherche scientifique</b> .....	<b>51</b>
- Les accidents vasculaires au Maroc : Résultats et enseignements d'une enquête épidémiologique - Mustapha EL ALAOUI FARIS.....	53
- Etude immunologique et immunogénétique de la tuberculose dans la population marocaine (IMMGEN) - Rajae EL AOUAD .....	59
<b>Perspectives</b> .....	<b>65</b>
- Conduire le développement durable. Rôle de la science, de la technologie et de l'innovation. Déclaration Commune des Académies du G-Science 2013 .....	67
<b>Activités de l'Académie</b> .....	<b>71</b>
<b>Nouvelles des académiciens</b> .....	<b>79</b>
<b>Actualités scientifiques</b> .....	<b>83</b>





## Editorial

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

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

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

Tous ces domaines sont au cœur des avancées majeures que nos sociétés ont connues, et du développement industriel du monde moderne: électricité, télécommunications, électronique, optique-photonique, aérospatial, automobile, appareils de diagnostic médical, outils d'analyses et de fabrication et de production, etc. Bref, la physique est omniprésente dans presque tous les secteurs d'activité industrielle et de production.

Au Maroc, les applications du savoir scientifique et technique en physique devraient être largement utilisées dans ses divers plans sectoriels de développement, comme le plan émergence dans le domaine de l'industrie (aéronautique, automobile, électronique, télécommunications et technologies numériques, secteur d'extraction et de transformation, textile, chimie et parachimie, etc.) ou encore le plan solaire dans le domaine énergétique. Ces secteurs nécessitent aussi bien de la formation qualifiée que de la recherche scientifique et technique de haut niveau.

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

Des avancées majeures sont en cours également dans des domaines aussi variés que la mécanique quantique, l'optique photonique, le traitement du signal et les matériaux multifonctionnels et à propriétés physiques multiples. Toutes ces avancées ouvrent la voie à un cadre théorique nouveau et des applications ayant un fort impact sur le développement technologique et le quotidien de l'Homme.

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

**La Rédaction**





## **La Physique aujourd'hui et ses applications**

(Thème général de la Session Plénière Solennelle 2013)

## PROGRAMME

mercredi 20 février

## CÉRÉMONIE D'OUVERTURE

**Mot du Directeur des Séances**

Rajae El Aouad

**Discours d'ouverture du Secrétaire Perpétuel**

Omar Fassi-Fehri

**Où en est-on dans la compréhension des mécanismes qui régissent la matière?**

Catherine Bréchnignac

**Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des «chats de Schrödinger» de lumière**

Serge Haroche

**Les mathématiques et la physique un mariage heureux «Quelques réflexions sur les tribulations de l'entropie, allant et venant entre mathématique et physique»**

Cédric Villani

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

**Origine de la structuration de l'univers et nature de l'énergie noire**

Jean-Michel Alimi

**A la recherche du boson de Higgs et au-delà**

Jonathan R. Ellis

**L'univers super-symétrique**

El Hassan Saidi

## SESSION PLÉNIÈRE II : PHYSIQUE QUANTIQUE, MATIÈRE CONDENSÉE ET MATIÈRE MOLLE

**Dynamics of Soft, Biological Interfaces**

Gerald G. Fuller

**Les corrélations quantiques en théorie quantique de l'information**

Pr. Mohamed DAOUD

**Packing of wires in cavities and growing surfaces**

Hans Hermann

**Nouveaux matériaux pour la spintronique**

Abdelilah Benyoussef

**Sesion Parallèle 1 : Physique en Sciences de la vie****Tomographie par émission de positrons (TEP)**

Nezha Ben Raiss, Rajaa Cherkaoui

**Radiochirurgie gamma knife: Méthode thérapeutique neurochirurgicale de pointe et domaine privilégié des applications de la physique médicale**

Abdesslam El Khamlichi

**Radiothérapie au Maroc : passé, présent et futur**

Abdellatif Benider

**Sesion Parallèle 2 : Physique et Agronomie****Agriculture instrumentation as one of the opportunities for international cooperation in science and technology, specifically between Brazil and Morocco**

Silvio Crestana

**La télédétection en agriculture**

Mohamed Ettarid

**La prédiction agrométéorologique des rendements céréaliers au Maroc**

Riad Balaghi

**Sesion Parallèle 3 : Physique et Sciences économiques****Introduction : quand la physique s'invite dans l'économie**

Rachid Benmokhtar Benabdellah

**L'économie expérimentale : quel rapport à la physique**

Guillaume Hollard

**China's economic development**

Yu Yongding



**jeudi 21 février**

**SESSION PLÉNIÈRE III : PHYSIQUE ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR**

**Instrumentation pour les lasers à impulsions ultra-courtes**

Daniel Kaplan

**Matériaux cellulaires pour des applications piézoélectriques**

Mostapha Bousmina

**L'expérimentation a-t-elle (encore) sa place en mécanique des matériaux?**

André Zaoui

**Revisiter le quadrant de Pasteur : Rôle de la science post moderne par rapport aux besoins de la société et catastrophes naturelles**

Juan Carlos Castilla

**Session Parallèle 4 : Physique, Physique-Chimie**

**La récupération d'énergie mécanique en utilisant l'hybridation des polymères électrostrictifs et électrets**

Yahia Boughaleb

**Les cellules photovoltaïques organiques**

Mohammed Addou

Ecole Doctorale de Marseille

Mossadek Talby

**Nanomatériaux magnétiques à base de métal de transition et de terre rare**

Hassan Lassri

**Photo-génération de travail avec des polymères : Mouvement moléculaire photo-induit et nano-structuration**

Zouheir Sekkat

**Propriétés magnétiques de quelques systèmes exotiques mono et tridimensionnels**

Mohamed Belaiche

**Session Parallèle 5 : Physique et Sciences de la Terre et de l'Environnement**

**The crustal lithosphere across the atlas and Rif orogenic belts : Wide-Angle seismic reflection studies**

Ramon Carbonell

**Thermo-chronologie par traces de fission, applications aux orogènes Marocains**

Omar Saddiqi

**Space geodesic research for geodynamics and atmospheric studies**

Robert Reilinger

**A Climate-Driven model and development of a floating point time scale for the middle devonian eifelian stage: based on time series analysis, magnetostratigraphic susceptibility data**

Brooks B. Ellwood

**Geophysical investigations for environmental applications**

Abdelkrim Rimi

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

**Principes et applications de l'intensification en génie des procédés**

Laurent Falk

**Le traitement des déchets miniers pour l'obtention de produits à haute valeur ajoutée**

Mohamed Barakate

**Compostage des déchets organiques urbains**

Brahim Soudi

**Valorisation des déchets urbains: cas de la technologie biogaz**

Hassan El Bari

**vendredi 22 février**

**SESSION INTERNE DE L'ACADÉMIE**

**Rapport d'Activité de l'Académie pour l'année 2012 et discussion**

Omar Fassi-Fehri

**Bilan 2012 et plan d'action pour l'année 2013**

**Clôture de la session**

## Discours d'ouverture du Pr Omar FASSI-FEHRI

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



**Excellences,  
Honorables invités,  
Mesdames & Messieurs les Académiciens,  
Mesdames & Messieurs,**

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

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



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

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

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

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

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

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



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

#### **Excellences,**

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

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

1. la promotion de la recherche scientifique par le financement d'une douzaine de projets de recherche correspondant à un budget de quelques 30 Millions DH,
2. l'intérêt que nous portons à l'enseignement des sciences, et à la diffusion de la culture scientifique que nous encourageons par l'organisation des journées «les jeunes et la science au service du développement» tenues cette année sous le thème «l'énergie durable pour tous», et par la création de clubs scientifiques au sein des établissements scolaires (une quinzaine),
3. la diffusion régulière depuis l'installation de l'Académie de ses publications qui sont : les actes des sessions, le bulletin d'information de l'Académie, la lettre de l'Académie et depuis deux ans le journal scientifique «Frontiers in Science and Engineering»,
4. le développement de la communication scientifique dans son volet vulgarisation mais aussi formation à la rédaction d'articles scientifiques,
5. l'encouragement de l'excellence, en octroyant en particulier aux lauréats du Concours général des Sciences et Techniques, organisé en commun avec le Ministère de l'Éducation Nationale, des bourses d'excellence. Signalons, ce dont nous sommes particulièrement fiers, que parmi les lauréats de la première promotion, l'un d'entre eux a été admis à l'École Polytechnique et un autre a réussi en juillet dernier au concours d'entrée à l'École Normale Supérieure (Rue d'Ulm); peut être qu'il sera un jour étudiant chercheur au sein du célèbre laboratoire Kastler Brossel où travaillent aujourd'hui les professeurs Serge Haroche et Claude Cohen Tannoudji,

6. une présence sur le plan international ponctuée notamment durant l'année écoulée par la participation de l'Académie Hassan II à la réunion tenue à Washington du G-Sciences, avec treize autres académies nationales, qui a préparé la réunion du G20 au Mexique, qui s'est penchée sur les questions de l'environnement, ponctuée aussi par deux nouvelles conventions, signées avec l'Académie des Sciences de l'Inde, qui se traduit déjà par une coopération dans le domaine de la recherche médicale, et avec l'Académie des Sciences de Chine, qui aussi a déjà donné lieu à une coopération scientifique sur les questions de désertification,

7. la réalisation d'études et d'enquêtes sur la recherche scientifique au Maroc par la publication du document «Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité : un état des lieux et des recommandations clés», qui

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

#### **Excellences,**

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

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

Sans remonter aux origines de la physique, qui se situent en Grèce, rappelons que le mot «physique» lui-même vient du grec et signifie «connaissance de la nature»; en fait la science moderne est née avec des expériences de physique, menées par le génial Galilée qui est considéré comme «le père de la physique moderne», il n'accepte comme critères de vérité que l'expérience et la réflexion, et y associe l'utilisation

des mathématiques. Depuis, chaque grand domaine de la physique a connu un développement continu, comme la mécanique, l'électricité, l'optique, la thermodynamique, la structure de la matière, jusqu'aux grandes révolutions du siècle dernier avec la découverte de la mécanique quantique et celle de la relativité; malgré tous les progrès et avancées réalisés; ceci étant, beaucoup de questions restent encore ouvertes, qui touchent à la fois le domaine de l'infiniment petit et les composants ultimes de la matière, que celui de l'infiniment grand; pourra-t-on en particulier un jour unifier dans un même modèle la gravitation et la mécanique quantique? – quelle est la nature de l'énergie noire responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers? Dans le domaine de l'électronique, domaine qui façonne notre vie aujourd'hui, intervient dans toutes nos activités et a conduit au développement formidable de la microélectronique et des technologies de la communication, grâce à la miniaturisation des composants électronique (taille divisée par 2 tous les 18 mois), trouvera-t-on un processus autre que les semi-conducteurs lorsqu'on aura atteint la limite de la taille des atomes? Il semble que sur ce plan la biologie vient déjà au secours de l'électronique en utilisant des cellules vivantes comme connexions électriques miniatures.

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

**Excellences,  
Mesdames, Messieurs,**

- Le premier ressort qui fait évoluer les sciences physiques est bien entendu d'ordre cognitif; il répond au souci de répondre aux questions fondamentales que les physiciens se posent sur la matière et sur l'univers; cette volonté de connaître, de comprendre, d'expliquer la nature et l'univers est le propre du physicien; à ce propos Einstein a parlé de : «la lutte éternelle de l'esprit inventif de l'homme pour arriver à une compréhension plus parfaite des lois qui gouvernent les phénomènes physiques». C'est encore lui qui écrit «qu'est ce que qui nous pousse à inventer des théories l'une après l'autre, et pourquoi même les imaginons-nous? la réponse est simple parce que nous avons de la joie à comprendre». Au cours de la session, nous consacrons à ces questions trois séances plénières une à l'ouverture, ensuite une séance sur physique des hautes énergies et sciences de l'univers, enfin une séance sur physique quantique, matière condensée et matière molle,
- Un ressort non moins important que celui dû à l'intérêt cognitif, c'est celui dû aux importantes et multiples applications de la physique; celle-ci est aujourd'hui omniprésente dans notre environnement; nous avons déjà parlé du rôle de l'électronique, mais aussi dans la mise au point des thérapeutiques nouvelles, et dans

bien d'autres applications, qui font évoluer la recherche en physique. Qui pouvait imaginer, que la théorie de la physique quantique au moment de sa découverte allait donner naissance à autant d'applications pratiques et à autant d'inventions comme le laser, l'ordinateur, internet, l'I.R.M, l'énergie nucléaire; a-t-on imaginé que la théorie de la relativité restreinte et la relativité générale allaient connaître une application aussi pratique que celle du GPS. Dans ce cadre nous organisons une séance plénière consacrée à la physique et sciences de l'ingénieur,

- Enfin, rappelons que la physique évolue aussi grâce aux sollicitations provenant des sciences voisines, chimie, biologie, sciences de la terre, de l'environnement, la météorologie. Dans ce cadre, nous organisons six séances parallèles consacrées à la physique et sciences médicales, physique et agronomie, physique-chimie, physique et sciences économiques, physique et mathématiques, physiques et sciences de la terre et de l'environnement.

**Excellences,  
Mesdames, Messieurs,**

A la base de toute cette activité, et à l'instar des autres disciplines scientifiques, insistons sur l'importance de l'esprit scientifique qui permet à la recherche scientifique et aux chercheurs de jouer correctement leur rôle; j'insisterai sur quatre qualités indispensables dans toute réelle activité scientifique: la rigueur, l'objectivité, la liberté et l'indépendance. A ce propos citons Gaston Bachelard «l'esprit scientifique nous interdit d'avoir une opinion sur des questions que nous ne comprenons pas» - ou encore Albert Einstein : «la science est une création de l'esprit humain au moyen d'idées, et des concepts librement inventés».

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

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

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

Je vous remercie pour votre attention.

\* \* \* \* \*

**Où en est-on dans la compréhension des mécanismes qui régissent la matière?**

**Pr Catherine BRÉCHIGNAC**

Secrétaire Perpétuel, Académie des Sciences de France  
Ambassadeur délégué en Science, Innovation et Technologie



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

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

**Naissance de la démarche scientifique**

L'observation du ciel et les mathématiques constituent le berceau de la connaissance scientifique. Les origines de l'astronomie remontent au-delà de l'Antiquité. La pierre trouvée le 15 août 2006 au nord-ouest de la Chine, qui montre une représentation de la grande Ourse que les chinois appellent «boisseau», date d'environ 10.000 ans. Elle témoigne que l'homme s'intéressait au ciel il y a fort longtemps. Avec l'apparition de l'écriture, les observations astronomiques sont consignées avec soin et ceci dans les quatre foyers de civilisations qu'étaient la Mésopotamie, l'Égypte, la Chine, et ce que nous appelons aujourd'hui les civilisations précolombiennes.



Ce savoir, tant en astronomie qu'en mathématiques, avait des fins utilitaires que sont la mesure du temps et les décomptes dans la vie quotidienne. Le jésuite Joseph de Mailla affirme que vers 2850 avant notre ère, l'astronome Fu-Hi donna aux chinois le moyen de calculer les éclipses et mesurait le temps dans un système sexagésimal utilisé aussi par les babyloniens et dont il nous reste en héritage les 60 secondes dans la minute et les 60 minutes pour faire une heure. A cette époque qui marque le début de l'Histoire et qui nous a transmis des calendriers d'une grande précision, aucune civilisation ne cherchait le pourquoi des phénomènes célestes observés.

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

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

Dès l'antiquité on avait conscience que la Terre était ronde mais, à l'exception d'Aristarque de Samos au IIIème siècle avant notre ère, la représentation d'Aristote plaçait la terre fixe au centre de l'univers. Le changement de paradigme vint de l'observation du mouvement des planètes, vocable qui -en grec- signifie astre errant. En effet, pour un observateur terrestre, le mouvement des planètes dans le ciel semble avancer, s'arrêter puis repartir en sens

inverse, mouvement appelé rétrograde. Pour décrire le mouvement de Mercure des astronomes du monde arabe, tel qu'Ibn al Shatir, travaillant à l'observatoire de Maragha construit en 1259, avaient adopté un modèle héliocentrique. Copernic, médecin, mathématicien, astronome, reprit cette idée et propose dès les années 1510, un modèle dans lequel le Soleil était fixe au centre de l'Univers, chaque planète décrivant une trajectoire qu'il pensait circulaire autour de celui-ci. Ce modèle restera cependant confidentiel, il ne resurgira qu'avec Galilée qui, après des nuits d'observation du ciel avec une lunette dont il porta le grossissement de 6 à 30, mit en évidence les satellites de Jupiter et fit sienne la théorie de Copernic.

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

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

### **La démarche scientifique le langage et la raison**

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

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

Tandis que Galilée établissait les lois de l'inertie, Descartes qui voulait rompre avec les interminables

raisonnements par syllogismes que l'on enseignait à son époque instaure des règles de raison qu'il énonce dans son Discours de la méthode en 1637 :

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

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

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

### **La démarche scientifique et les succès du déterminisme**

Observer, accumuler des données, faire des synthèses, créer des langages et établir des lois pour expliquer les faits expérimentaux tout en cherchant s'il n'existe pas un contre-exemple qui mette la loi en défaut, est, depuis la fin du XVIème siècle, la méthode qui permet d'accroître la somme de nos connaissances. Cette méthode permet d'appréhender le monde qui nous entoure d'une manière conceptuelle et synthétique. Elle présente l'avantage de minimiser la place qu'occuperait la mémorisation d'un grand nombre d'observations dans notre cerveau.

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

Plus tard Charles Coulomb énoncera, à la suite des mesures effectuées au moyen de sa balance à torsion d'une extraordinaire sensibilité, que les forces développées par les charges électriques

et magnétiques suivent la même loi que celle de l'attraction gravitationnelle. Elles sont inversement proportionnelles au carré de leur distance.

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

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

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

Avec Einstein, l'attraction universelle décrite par Newton est devenue une approximation d'une

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

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

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

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

Dans cette connaissance du monde physique construite à partir de notre environnement particulier sur la Terre, les théories successives s'emboîtent les unes dans les autres au fur et à mesure que nous nous éloignons de notre environnement naturel. Elles sont des approximations successives de théories de plus en plus générales. Cependant l'état actuel de nos connaissances fait que les concepts abordés nous éloignent du tangible. Mais plus on s'éloigne du tangible plus les concepts doivent être élaborés avec

une démarche scientifique qui impose qu'aucune observation ne doive mettre en défaut la loi qui la régit; s'il n'en est pas ainsi, il nous faut concevoir un paradigme plus universel pour définir une nouvelle loi dont la précédente sera une approximation. Cette démarche est résolument déterministe.

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

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

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

Suivant cette même idée Claude Bernard, considéré comme le fondateur de la physiologie moderne dit dans son célèbre ouvrage Introduction à l'étude de la médecine expérimentale «Le savant complet est celui qui embrasse à la fois la théorie et la pratique expérimentale. 1° Il constate un fait; 2° à propos de

ce fait, une idée naît dans son esprit; 3° en vue de cette idée, il raisonne, institue une expérience, en imagine et en réalise les conditions matérielles. 4° De cette expérience résultent de nouveaux phénomènes qu'il faut observer, et ainsi de suite... Le douteur est le vrai savant ; il ne doute que de lui-même et de ses interprétations, mais il croit à la science; il admet même dans les sciences expérimentales un principe scientifique absolu. Ce principe est le déterminisme des phénomènes, qui est absolu aussi bien dans les phénomènes des corps vivants que dans ceux des corps bruts.»

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

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

Cependant cette démarche a aussi ses limites.

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

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

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

L'exemple considéré par Luca Pacioli est celui de deux équipes misant chacune 11 ducats, dans une partie

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

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

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

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

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

Quelques exemples :

- 1- la matière condensée est formée d'atomes, mais ses propriétés sont pour la plupart dues à des effets collectifs. Les électrons pour les plasmons.
- 2- le verre alors que l'homme maîtrise depuis longtemps les techniques de fabrication du verre,

les physiciens ne savent toujours pas expliquer pourquoi ce matériau ne coule pas. Sa structure microscopique évolue sans cesse. «Le problème le plus profond et le plus intéressant en physique de l'état solide est sûrement celui de la nature du verre et de la transition vitreuse.» dit Philip Anderson.

- 3- la classification périodique le carbone et le silicium. Le verre et le vitrimère.
- 4- Les cellules du muscle cardiaque mises en culture dans une boîte de Pétri se contractent d'une manière synchrone lorsqu'elles sont au nombre d'une centaine.
- 5- Les milliards de neurones qui composent notre cerveau et qui n'ont individuellement aucune intelligence en créent une en se couplant.
- 6- Un autre exemple est celui de la métagénomique, ou encore la génomique des communautés. Le métagénome d'un ensemble de communautés d'organismes qui réfère à l'ensemble des séquences d'ADN extraites de ces communautés indique qu'elles sont généralement composées d'organismes non cultivables seuls.

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

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

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

\* \* \* \* \*

## Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des «chats de Schrödinger» de lumière\*

Pr Serge HAROCHE

Prix Nobel de Physique 2012, Professeur au Collège de France, membre de l'Académie de Sciences (France),  
(invité d'honneur de la session)



Je suis très honoré et très heureux d'avoir l'occasion de venir m'exprimer ici devant votre Académie pour parler des recherches que je mène à Paris et qui ont été, comme vous l'avez indiqué, reconnues au mois d'octobre dernier par le Prix Nobel. En fait, je suis également très ému que ceci me donne l'occasion de revenir au Maroc après très longtemps. Je suis né à Casablanca comme vous l'avez rappelé et j'ai quitté le Maroc il y a plus de 50 ans à une époque où je ne savais pas du tout ce que c'était un photon.

J'ai eu ensuite toute ma formation universitaire et scientifique en France mais j'ai gardé un souvenir du Maroc qui est extrêmement vivant et je suis heureux d'avoir l'occasion maintenant de revenir ici. J'irai à Casablanca demain et je suis un petit peu ému et effrayé parce que je pense que la ville a beaucoup changé depuis l'époque où je l'ai connue. Donc je vais vous parler des expériences que nous réalisons à l'Ecole Normale Supérieure à Paris. Je les ai symbolisés sur cette image :



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

Je vous rappelle ce qui a été dit par Madame Catherine Bréchnignac tout-à-l'heure que cette physique quantique a révolutionné la compréhension

du monde il y a maintenant près de 100 ans. Elle nous a introduit à un monde dans lequel les notions d'ondes et de particules qui sont si différentes pour un esprit classique sont en fait mêlées. Des atomes que l'on a l'habitude de considérer comme des systèmes discrets peuvent se comporter comme des ondes de matière et inversement la lumière qui depuis Maxwell est reconnue comme étant une onde électromagnétique est également constituée de corpuscules, des photons.

Ce dualisme ouvre des perspectives extrêmement contre-intuitives, il introduit immédiatement la notion de superposition d'états. Si une particule peut être à plusieurs endroits à la fois, comme c'est le cas d'une onde, c'est qu'elle est une superposition de différentes réalités classiques, et ceci est un des aspects fondamentaux de la physique quantique. Cette notion de superposition d'états, qui a été rendue quantitative par la théorie d'Heisenberg puis par l'équation de Schrödinger, est à l'origine de toutes les propriétés fondamentales de la matière et elle régit le monde à l'échelle microscopique.

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

Au début de la physique quantique ces manipulations étaient impossibles pour des raisons technologiques. Les fondateurs de la théorie (Einstein et Bohr) imaginaient qu'ils seraient capables de manipuler ces systèmes et ils inventaient des expériences que l'on appelle des «expériences de pensée» où ils supposaient que les systèmes quantiques (atomes ou photons) pouvaient être isolés du monde extérieur et qu'on pouvait les contrôler et les manipuler. La boîte à photons mise en place par Einstein était censée contenir un photon et ce photon pouvait être libéré, relâché à l'extérieur par une porte qui s'ouvrait et qui était commandée par une petite

\* Texte retranscrit de l'enregistrement audio de la conférence.

horloge. Bien entendu il y avait une part d'humour dans ces expériences et Bohr essayait de dessiner cela de la façon la plus réaliste possible, mais cette expérience était évidemment impossible. En fait, les fondateurs de la théorie pensaient qu'on ne serait jamais capables de manipuler des particules individuelles.

### Expériences de pensée

Schrödinger savait que des particules individuelles pouvaient être détectées, mais, disait-il, c'était par des observations « post mortem », qui détruisaient l'objet observé.

Chambre à bulles (CERN)

Einstein, Bohr et leur boîte à photon

« We never experiment with single electrons, atoms or small molecules... In thought experiments we assume that we do. It always results in ridiculous consequences... » (Schrödinger 1952)

«...It is fair to state that we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo. We are scrutinising records of events long after they have happened.» (Schrödinger, ibid)

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

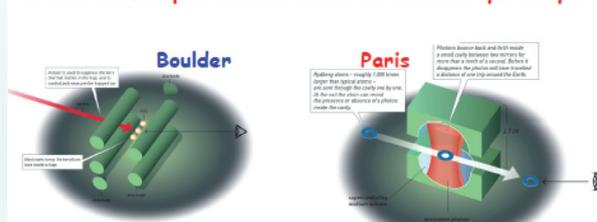
L'idée qui a émergé durant les 20 ou 30 dernières années est que: est-il vraiment impossible de faire ces expériences?

La technologie a beaucoup évolué depuis et on peut maintenant effectuer au laboratoire ces expériences de pensée et contrôler tout un zoo de particules. Personnellement, je travaille sur des photons isolés. Mon collègue et ami David Wineland et bien d'autres groupes dans le monde travaillent sur des ions ou des atomes isolés. Des expériences sur des molécules isolées ont également été effectuées et ces expériences se développent maintenant dans de nombreux laboratoires. Ce qui a permis évidemment l'émergence de technologies nouvelles, le fait qu'on a même les lasers accordables qui nous permettent de manipuler des atomes avec une très grande précision. Bien entendu que nous avons des ordinateurs rapides qui nous permettent d'analyser les signaux de ces expériences en temps réel de façon à être capable de réagir sur les systèmes

à des échelles de temps suffisamment courtes, et pour certaines expériences que l'on dispose de matériaux supraconducteurs (miroirs). Ces technologies sont des technologies quantiques. Le laser, les ordinateurs et la supraconductivité n'ont pu être développés au niveau technologique que parce qu'on a compris le comportement de la matière à l'échelle microscopique. Il y a là une espèce de cercle vertueux. La théorie quantique a permis de développer des technologies par des expériences nouvelles et d'approfondir les connaissances sur des phénomènes fondamentaux.

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

### Contrôle de particules dans un monde quantique



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

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

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

Je voudrais rappeler mon parcours personnel dans cette histoire. La thèse que j'ai effectuée dans les années 1960-70 à l'Ecole Normale Supérieure sous la direction de Claude Cohen-Tannoudji a joué un rôle essentiel parce que c'était l'époque du pompage optique. Ce dernier consistait à

manipuler des atomes à l'aide de lumière. A l'époque, il s'agissait d'une lumière créée par des lampes classiques mais l'idée que la lumière pouvait façonner l'état de la matière était une idée révolutionnaire développée par Kastler et Brossel et théorisée par Claude Cohen-Tannoudji à l'époque. Nous effectuons des expériences de pompage optique et à l'aide de faisceaux lumineux on observait la danse des moments magnétiques des atomes dans un champ de radiofréquence. Ces expériences portaient sur des collections énormes d'atomes, on travaillait sur des milliards d'atomes à la fois, mais le comportement de chaque atome était régi par la théorie quantique. Je me souviens déjà qu'à l'époque j'étais vraiment fasciné par l'idée que peut-être un jour on serait capable non pas de travailler sur des atomes collectivement mais sur des atomes isolés.

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

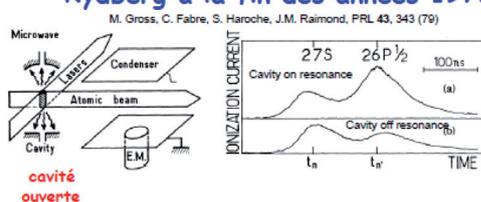
Après cette première phase de formation, je suis parti pour un stage postdoctoral en Californie dans le groupe du professeur Arthur Schawlow à Stanford et c'est là que j'ai été initié au laser alors que les lasers commerciaux se développaient et l'Université de Stanford recevait en priorité les premiers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

A cette époque là, j'ai été sensibilisé à l'importance de la notion de superposition d'états. Ici aussi c'est un effet que l'on observe sur une collection d'atomes et qui est une interférence quantique qui se produit

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

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

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



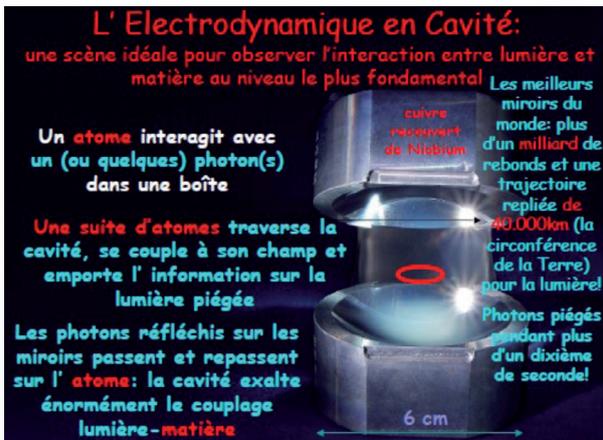
cavité ouverte

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

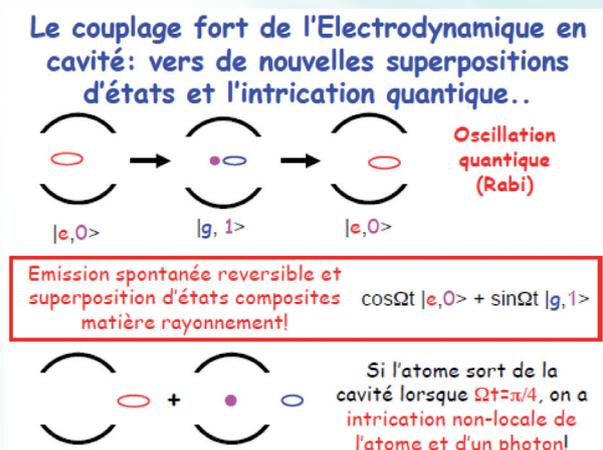
More fundamentally, we believe that these experiments open the way to the study of even smaller emitting systems (i.e., samples smaller than the atomic wavelength or with very small absolute atom number), a domain where there is still no comparison available between experiments and theory.

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

Notre but était de réaliser ces expériences avec un atome isolé qui émettrait alors un photon dans la cavité, et ceci a constitué le début de l'électrodynamique quantique en cavité.



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



Si on arrête l'expérience par l'interruption du couplage lorsqu'on est à mi-parcours entre les deux états, on fabrique une intrication non-locale dans laquelle l'atome sort de la cavité dans l'état excité laissant la cavité vide et en même temps l'atome sort de la cavité dans l'état inférieur en laissant un photon derrière lui. La question suivante qui nous a intrigué : comment détecter ce photon sans le détruire? Une façon de détecter le photon c'est de le faire absorber par un atome, mais à ce moment là le photon est détruit et si on veut le manipuler ce n'est pas la bonne méthode. Ceci nous amène à une question qui est essentielle et qui est liée à l'optique en général : la détection par absorption ou détection photo-électrique détruit le photon.

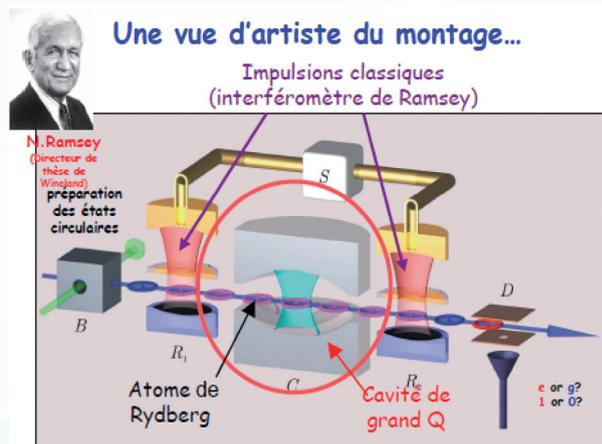
Einstein en 1905, comme Catherine Bréchnignac l'a rappelé, a fait une théorie de l'effet photo-électrique qui montre comment lorsque les photons heurtent une photocathode, des électrons sont éjectés et c'est l'éjection de ces électrons qui signale le fait qu'on avait un photon. En fait tous les photo-détecteurs,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

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

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

Quand un atome interagit avec de la lumière non résonnante, la fréquence de son horloge est légèrement modifiée par l'effet de light shift (Cohen-Tannoudji, 1961). En fait, on va s'arranger pour que l'atome ne soit pas résonnant avec le champ parce qu'on veut éviter de l'absorption du rayonnement, donc on décale la fréquence de l'atome de celle du champ de la cavité, et dans le

cas non résonnant les deux systèmes voient leurs fréquences caractéristiques légèrement changées. Ceci conduit à un déplacement du dipôle atomique. La sensibilité des atomes de Rydberg est telle qu'on peut faire un déphasage par photons de  $180^\circ$ . Pour mesurer ce déplacement de phase, on va utiliser un interféromètre de Ramsey. Ce dernier est le père des horloges atomiques.



Horloge atomique retardée par des photons piégés dedans

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

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



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

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



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



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

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

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

Quel est le mécanisme qui permet de préparer le chat de Schrödinger de notre expérience? On commence par préparer un état cohérent dans la cavité, donc une flèche dans une direction donnée. On envoie un seul atome que l'on prépare dans une superposition d'états et cet atome traverse la cavité. Suivant qu'il est dans l'état e ou dans l'état g, il va déphaser le champ dans une direction ou dans l'autre. L'atome a un effet extrêmement sensible sur le champ et on se trouve à ce moment dans une situation type chat de Schrödinger. L'atome est excité et le champ a une phase ou l'atome est désexcité et le champ a une phase opposée. La deuxième zone remélange les deux

états de l'atome, ce qui fait que lorsqu'on détecte finalement l'atome, on n'a pas moyen de savoir si l'atome a traversé la cavité dans un état ou dans l'autre à cause de ce mélange et ceci fait qu'on projette le champ dans une superposition des deux états de type chat de Schrödinger. Une fois que cet atome a été préparé, il faut évidemment mesurer le système et on envoie une succession d'atomes dans la cavité qui à l'aide d'une version modifiée de la mesure QND permettent de reconstituer le chat de Schrödinger et de sa fonction de Wigner c'est-à-dire la carte de son état du champ.

Toute la physique que l'on cherche à développer maintenant dans ce domaine, ce qu'on appelle la théorie quantique de l'information cherche à maintenir la cohérence quantique le plus longtemps possible pour essayer de fabriquer des dispositifs qui vont se servir de ces interférences quantiques et faire des choses que la physique classique ne permet pas.

L'ordinateur quantique, en étant la limite extrême, serait un système constitué d'un grand nombre d'atomes ou de photons travaillant dans des superpositions d'états tels qu'à la fin la mesure d'une interférence convenablement choisie permettra de répondre à une question beaucoup plus rapidement que ne le ferait un ordinateur classique. Mais je n'ai pas le temps pour vous parler de cela. Je voudrais simplement en conclusion insister sur le fait qu'il s'agit d'un travail d'équipe. J'ai travaillé depuis plus de 30 ans avec Jean-Michel Raimond, plus de 20 ans avec Michel Brune et toutes les décisions que nous

avons prises dans le groupe et toutes les idées que nous avons eu viennent de ce travail collectif, et certaines de ces idées viennent d'eux avant tout et je voudrais insister là-dessus.



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

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

\* \* \* \* \*



## Les mathématiques et la physique, un mariage heureux. Quelques réflexions sur les tribulations de l'entropie, allant et venant entre mathématiques et physique\*

Pr Cédric VILLANI

Professeur à l'Université Claude Bernard-Lyon1, France  
Directeur de l'Institut Henri Poincaré, Paris, France



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

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

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

Aujourd'hui, je vais insister sur un autre aspect de ce mariage, cette interaction, entre les mathématiques et la physique, notamment l'un des enfants de ce mariage, l'entropie, un concept dont on ne peut plus dire s'il s'agit à la fin d'un concept physique ou d'un concept mathématique, qu'il s'agit des deux à la fois. L'entropie est un concept qui traverse une

bonne partie de mon œuvre. A un moment, j'avais coutume de dire que le seul point commun entre mes différents articles était qu'il est toujours question d'entropie. Ce n'est plus tout à fait vrai, mais ça reste un sujet important dans les  $\frac{3}{4}$  de mon travail, avec cette faculté exceptionnelle de l'entropie de passer d'un thème à l'autre.

### Révolution conceptuelle 1865-1875



James Maxwell



Max Planck

Avancée majeure en modélisation : l'équation de Boltzmann  
Avancée majeure en mathématique : l'entropie  
Avancée majeure en EDP : étude qualitative en grand temps  
Avancée majeure en physique fondamentale : irréversibilité

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

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

- une avancée majeure en modélisation : c'est l'équation de Boltzmann sur laquelle j'ai effectué ma thèse et travaillé une bonne dizaine d'années.
- une avancée majeure mathématique : la notion d'entropie.
- Une avancée majeure dans l'étude des Equations Dérivées Partielles (EDP) qui datent d'il y a plus longtemps (18<sup>ème</sup> siècle). Mais avec l'équation

\* Texte retranscrit de l'enregistrement audio de la conférence.



L'équation de Boltzmann, comme beaucoup d'équations importantes en physique, fait intervenir deux termes correspondant à deux effets très différents. Dans la vraie vie, il y a beaucoup d'effets qui se combinent, mais souvent quand vous cherchez à comprendre déjà l'interaction de deux effets, vous vous retrouvez face à une grande richesse de phénomènes et face à une difficulté technique. Dans le cas de cette équation, nous avons la combinaison de l'effet du transport et l'effet des collisions qui forcent les vitesses à changer. Ces deux termes sont de nature très différente : l'un est linéaire, l'autre est non linéaire, l'un est différentiel, l'autre est intégral, l'un est local, l'autre est non local. On pourrait continuer ainsi la liste de leurs différences et, dans l'équation, ils doivent continuer à cohabiter et à s'entendre. Le mathématicien sait bien que toute la difficulté réside dans l'interaction de ces deux termes, mais en même temps, c'est là où réside tout ce qui fait toute la richesse de l'équation.

Le terme quadratique de collision que j'ai caché jusqu'à l'instant présente une forme assez complexe. Notez juste l'inconnue, la distribution de particules, apparaît dans ce terme de collision de manière quadratique. En termes techniques, on dit même s'il s'agit d'un terme tensoriel, c'est-à-dire que l'argument compris dans la vitesse est différent. Il est associé en fait à l'indépendance et c'est de ça qu'il s'agit. Dans l'équation de Boltzmann, on suppose que les particules, juste avant de se rencontrer, ne se connaissent pas; il n'y a pas de corrélation dans les vitesses des particules juste avant le choc. C'est là toute la subtilité et c'est là ce qui permet la résolution de nombreux paradoxes.

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

La grande force de ces équations statistiques est qu'on peut grâce à elles oublier la nature microscopique de certains de ces phénomènes pour se concentrer sur des phénomènes macroscopiques. On peut ranger dans différentes cases des phénomènes qui nous

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

Du microscopique au macroscopique

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

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla_x f - \nabla_{v_x} \cdot \left( \int f dv \right) \cdot \nabla_v f = 0$$

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

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

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

Autant de mystères !

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

En 1973, Lanford établit un pas dans ce problème du passage de la mécanique microscopique à la mécanique macroscopique. Il résout un problème dont la solution était source de controverses chez les mathématiciens et chez les physiciens. Lanford, en 1973, démontre que l'on peut déduire rigoureusement l'équation de Boltzmann des équations de Newton sur un petit intervalle de temps. Il travaille sur un modèle avec **N** sphères dures, chacune est de rayon **r**. On s'intéresse à une limite où **N** est très grand, où le rayon est très petit, mais où la section efficace est de l'ordre de **1** de sorte que chaque particule rencontrera les autres environ une fois par unité de temps. C'est le régime dans lequel on s'attend à ce que l'équation de Boltzmann soit valide. Il utilise pour ce faire une hypothèse de

*chaos moléculaire fort* consistant à dire qu'au début de l'expérience, les particules sont distribuées au hasard et qu'il n'y a pas de corrélation entre elles. Il néglige complètement les effets quantiques et s'intéresse uniquement à une description classique. Il parvient à établir ce théorème, peut-être le plus important en physique mathématique statistique seulement sur un petit intervalle de temps alors que c'est sur un grand intervalle de temps que l'équation de Boltzmann prend tout son intérêt. Nous sommes là face à de nombreuses énigmes qui demeurent dans la théorie des gaz. Son résultat laisse de nombreuses questions en suspens.

### Théorème de Lanford (1973)

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



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

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

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

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

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

### Exercice (Boltzmann)

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

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

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

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

La fonctionnelle  $H$  de Boltzmann (1872)

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

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

Même si la validité de la Loi de Boltzmann ne concerne que les gaz raréfiés, un modèle parmi beaucoup d'autres, son importance conceptuelle est considérable. Elle montre qu'on peut démontrer ce second principe et vous convaincre de sa validité, un

accomplissement dont Boltzmann était extrêmement fier. La formule que j'ai relatée ici relate l'évolution de l'entropie au cours du temps le long de l'équation de Boltzmann, elle ne peut qu'augmenter mais jamais diminuer. Plus généralement, et c'est la vision qu'on a depuis Boltzmann, sous l'effet de processus microscopiques aléatoires et réversibles comme l'est la dynamique de Newton, l'entropie va toujours augmenter à l'échelle macroscopique. Ce principe est une prédiction et c'est aussi une façon de comprendre le monde, c'est un principe directeur. A la lumière de ce principe, considérons l'expérience bien connue dans laquelle on sépare une boîte en deux compartiments avec une cloison étanche. On met du gaz dans un compartiment, on met le vide dans l'autre compartiment, et on retire la cloison au temps initial. Que va-t-il se passer? Nous avons l'habitude de penser que le vide va aspirer le gaz. Boltzmann nous explique qu'il faut le comprendre d'un point de vue statistique. Si le gaz envahit toute la boîte, ce n'est pas parce que le vide aspire le gaz, c'est simplement parce que l'état dans lequel le gaz occupe toute la boîte est associé à une incertitude, à une entropie beaucoup plus grande que le gaz qui occupe la moitié de la boîte. C'est donc seulement des phénomènes aléatoires qui expliquent cette marche irréversible du gaz pour occuper toute la boîte.

Une analogie que j'aime utiliser dans la vie de tous les jours, c'est les enfants qui sortent dans la cour de leur école, vont se disperser au hasard les uns et les autres sans se concerter et occuper en quelques minutes toute la cour. Du fait des interactions indépendantes, ils vont occuper l'état d'entropie maximale. Vous allez dire qu'il y a un problème dans l'analogie. Il arrive par hasard que les enfants soient tous regroupés dans un coin de la cour. Si les gaz sont régis par des lois probabilistes, il va arriver que par hasard le gaz ne va pas occuper toute la boîte. Ce serait oublier les nombres formidables mis en jeu là dedans. D'abord les particules, il y'en a beaucoup, on ne parle pas de 10 ou 30 élèves, on parle de  $10^{17}$  particules; c'est considérable. Les probabilités qui vont être associées à cela vont typiquement être énormes et interviennent de manière combinatoire : la factorielle d'un grand nombre est un nombre gigantesque.

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

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

Toute la théorie, toute la biologie, la préservation des êtres vivants, consistent à dépasser cette loi de la thermodynamique, à faire quelque chose qui semble impossible : préserver des états de basse entropie que nous sommes, des états très ordonnés. Dans des réflexions théoriques, au cours de la vie, effectuées

par des physiciens et des biologistes, on retrouve cette question liée au paradoxe théorique du démon de Maxwell : comment faire en sorte que des êtres vivants puissent propager ces états de basse entropie de la même façon que le démon hypothétique de Maxwell qui va minutieusement à l'encontre du principe d'entropie en créant de manière astucieuse les états de basse entropie. Une interprétation de ce démon de Maxwell est précisément le fait qu'on peut faire une sorte d'échange entre des questions d'information et des questions de désordre.

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

$$S = k \log W$$



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

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

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

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

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

### L'entropie, polymorphe et universelle

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

A partir du moment où il s'agit d'un concept mathématique combinatoire, il s'agit d'un concept que les mathématiciens peuvent s'approprier et qui n'a pas manqué d'être utilisé dans de nombreuses situations. L'approximation hydrodynamique de Boltzmann, qui nous permet de remplacer les équations mécaniques des gaz par les équations de la mécanique des fluides, est basée sur la notion d'entropie. Et le fait que l'augmentation de l'entropie

force le gaz à aller vers un état où la distribution des vitesses sera gaussienne. Ce phénomène de convergence vers un état gaussien est l'un des phénomènes sur lesquels j'ai travaillé pendant des années.

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

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

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

**Je vous remercie.**





## Résumés des conférences de la session plénière solennelle





## Session Plénière I : Physique des Hautes Energies et Sciences de l'Univers

### Origine de la structuration de l'univers et nature de l'énergie noire

**Pr. Jean-Michel Alimi**

Laboratoire Univers et Théories,  
Observatoire de Paris, France

L'univers est devenu depuis la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, un objet physique comme les autres. C'est dans ce cadre théorique que la cosmologie moderne a pu déduire un des résultats les plus remarquables dans l'histoire des idées; l'univers est dynamique, il est en expansion.



Récemment, il a été découvert, que cette expansion cosmique était accélérée. Quelle est l'origine de cette accélération, ou en d'autres termes quelle est la nature de l'énergie noire, composante mystérieuse qui représenterait plus de 70% du contenu énergétique de notre univers et serait la source de cette accélération est, avec l'origine de la structuration de notre Univers parmi les défis de la cosmologie moderne.

Afin de tenter de répondre à ces deux questions, probablement liées, nous avons été conduit à réaliser les premières simulations au monde de la structuration de tout l'Univers observable en présence d'énergie noire, du Big Bang jusqu'à aujourd'hui. Cela n'a été possible qu'en disposant des ressources de calculs parmi les plus importantes qui n'est jamais été réunies.

Nous présenterons dans cette conférence les différentes possibilités d'interpréter l'énergie noire qui toutes interrogent les principes fondamentaux de notre paradigme cosmologique, nous discuterons les différents scénarios de formation de structures et les moyens de les simuler.

Nous présenterons les premiers résultats que nous avons obtenus issues de ces simulations et ce qu'ils nous disent sur la nature de cette composante mystérieuse. Nous discuterons finalement au-delà de cette expérience le rôle que peut jouer la simulation numérique intensive dans notre compréhension de quelques questions de physique fondamentale.

### A la recherche du boson de Higgs et au-delà

**Jonathan R. Ellis**

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

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



### L'univers super-symétrique

**Pr. El Hassan Saidi**

Université Mohammed V Agdal, Rabat  
Membre résident de l'Académie Hassan II  
des Sciences et Techniques

Most of the stable particles observed at accessible energies like electrons, photons, quarks, and neutrinos were created about 14 billion years ago at the birth of our universe. However, astrophysical observations and hints from accelerator experiments indicate that these particles and all of the matter visible to telescopes constitute no more than 5 percent of universe. The great bulk of the matter and the energy are dark; they respectively account to about 25 and 70 percent and seem to interact only gravitationally or through the weak force with the known particles. Supersymmetry, an exotic symmetry going beyond Einstein relativity, has been proposed as leading candidate theory for dark matter and dark energy; it suggests that known particles of nature have superpartners (sparticles) whose lightest are expected to be stable and to account for most of the dark matter.



In this presentation, I review the basic idea of supersymmetry and comment on its implications in Grand Unified Models building at high energies with a special focus on the intimate connection between the three following (i) matter, (ii) radiation, and (iii) space time geometry.



I also make comments on supergravity, the gauged version of supersymmetry, as it is a powerful tool that has been at the basis of most of developments made in theoretical and mathematical physics during the last decades; it extends quantum relativistic theories including Yang-Mills theory and general relativity; and offers adequate solutions to several problems of unification of the 4 fundamental forces of nature.

## Session Plénière II : Physique Quantique, Matière Condensée et Matière Molle

### Dynamics of soft biological interfaces

**Pr. Gerald G. Fuller**

Université de Stanford, Etats Unis d'Amérique  
Membre associé de l'Académie Hassan II  
des Sciences et Techniques

Biological systems are normally high-interface systems and these surfaces are laden with biological molecules that render them rheologically complex. The resulting nonlinearities with response to surface stresses and strain are often essential to their proper function and these are explored using recently developed methods that reveal interfacial moduli and microstructure. Three applications are discussed.



1. The tear film of the eye is a composite structure of an aqueous solution of protein and biomacromolecules. This thin layer is further covered by a film comprised of meibomian lipids excreted during each blink. The purpose of the meibum has been largely unexplained although one prevailing suggestion is that it suppresses evaporation. Recent measurements in our laboratory demonstrate that this layer is strongly viscoelastic and this property has dramatic effects on the dynamics of the moving contact line and stability against dewetting.
2. Biofilms are protective layers produced by bacteria colonies that offer protection against desiccation and external agents that can attack the colonies. This layer, a result of amyloid fiber produced by the bacteria make it difficult to treat intestinal tract infections in our own bodies and methods to monitor the kinetics of biofilm

development and the resulting response of the films to excipient materials that might upregulate or quench amyloid production are needed. Experiments are described where interfacial moduli are demonstrated to be very effective in sensing the presence of these films and provide a convenient format for the systematic introduction of external, chemical agents.

3. Vascular endothelial cells line the interior walls of our blood vessels and are sensitive to surface shear stresses. These stresses are known to affect the shape and orientation of endothelial cells. It is evident that the spatial homogeneity of flow can affect vascular health and it is well-documented that lesions form in regions of high curvature, bifurcations, and asperities in blood vessels. Experiments are described where stagnation point flows are used to create regions of well controlled flow stagnation and spatial variation of wall shear stresses. Live-cell imaging is used to monitor the fate of cells attached to surfaces experiencing flow impingement and it is revealed that endothelial cells migrate and oriented in such flows to create remarkable patterns of orientation and cell densification.

### Les corrélations quantiques en théorie quantique de l'information

**Pr. Mohamed Daoud**

Université Ibn Zohr, Agadir

L'information quantique est un des domaines les plus dynamiques de la physique quantique actuelle et pourrait conduire à des avancées technologiques révolutionnaires. Elle se veut une nouvelle science utilisant les lois régissant le monde quantique et regroupant toutes les disciplines alliant la théorie de l'information à la physique quantique. A l'heure actuelle, elle porte essentiellement sur deux challenges majeurs. Le premier est la réalisation d'un ordinateur quantique capable d'exécuter rapidement certains calculs qui nécessitent un temps exponentiellement long sur un ordinateur conventionnel. Le second concerne l'utilisation de la cryptographie quantique pour effectuer des communications privées très sécurisées.



Les protocoles quantiques garantissent la confidentialité des communications, non pas grâce à la complexité du cryptage mais grâce aux lois de la physique quantique. Dans ce contexte, des progrès considérables ont été achevés et des

expériences en grandeur nature ont été réalisées. Cependant, la conception de l'ordinateur quantique se heurte à l'extrême fragilité des bits quantiques qu'une telle machine devrait manipuler : la moindre perturbation fausserait le calcul.

En théorie quantique de l'information, le problème de la caractérisation des corrélations dans un système quantique revêt une importance capitale. Dans cet exposé, nous discutons tout d'abord comment séparer les corrélations totales présentes dans un système bipartite entre une partie classique et une partie purement quantique. Dans le cas de systèmes composés de plus de deux corps, nous présentons de nouveaux quantificateurs de corrélations classiques et quantiques. Une quantification des corrélations quantiques d'un système multipartite, définie comme la somme des corrélations pour toutes les partitions possibles, est introduite.

Les différentes notions relatives aux mesures des corrélations classiques et quantiques sont passées en revue (Discorde quantique (Quantum Discord), Discorde quantique géométrique (Geometric Quantum Discord) ou Intrication (Etrangement of Formation)). En particulier, pour des états purs de trois qubits de tels quantificateurs se basent sur le fait que les corrélations bipartites obéissent à une loi d'ordre déterminée par les diverses informations mutuelles à deux corps.

Une attention particulière est accordée aux superpositions multipartites des états cohérents généralisés qui interpolent entre les états quantiques W (Werner) et GHZ (Greenberg-Horne-Zeilinger). Pour les états purs tripartites, la mesure de la discorde quantique est équivalente à celle basée sur la notion de l'intrication. Ceci fournit un outil pratique pour comparer la distribution et la robustesse de ces corrélations dans les systèmes quantiques ouverts.

Nous terminons cette présentation par la description de l'intrication quantique dans les systèmes multipartites dans le langage de la géométrie symplectique. Nous discutons comment les outils de la géométrie symplectique permettent une caractérisation de l'ensemble des états intriqués comme des orbites sous l'action du groupe de symétrie dans l'espace de Hilbert du système. En particulier, les états séparables forment une orbite munie d'une structure Kählérienne, tandis que les orbites générés à partir des états intriqués sont caractérisés par différents degrés de dégénérescence de la forme symplectique canonique sur l'espace projectif complexe. Il en ressort que le degré de dégénérescence peut être ainsi utilisé comme une nouvelle mesure géométrique de l'intrication pour les systèmes quantiques comportant plusieurs particules.

### Packing of wires in cavities and growing surfaces

Pr. Hans Hermann

Swiss, Federal Institute of Technology, ETH,  
Zurich, Switzerland

We investigate the morphologies and maximum packing density of thin wires packed into spherical cavities. Using simulations and experiments with nylon lines, we find that ordered as well as disordered structures emerge, depending on the amount of internal torsion.



We find that the highest packing densities are achieved in a low torsion packing for large systems, but in a high torsion packing for small systems.

An analysis of both situations is given in terms of energetics and comparison is made to analytical models of DNA packing in viral capsids. In two dimensions we also find that wires can crumple into different morphologies and present the associated morphological phase diagram.

Our results are based on experiments with different metallic wires and confirmed by numerical simulations using a discrete element model. We show that during crumpling, the number of loops increases according to a power-law with different exponents in each morphology.

Furthermore, we observe a power-law divergence of the structure's bulk stiffness similar to what is observed in forced crumpling of a membrane. We also investigate the morphology of thin discs and rings growing in circumferential direction. Recent analytical results suggest that this growth produces symmetric excess cones (e-cones). We study the stability of such solutions considering self-contact and bending stress. We show that, contrary to what was assumed in previous analytical solutions, beyond a critical growth factor, no symmetric e-cone solution is energetically minimal any more. Instead, we obtain skewed e-cone solutions having lower energy, characterized by a skewness angle and repetitive spiral winding with increasing growth.

These results are generalized to discs with varying thickness and rings with holes of different radii. Simple experiments with cardboard confirm the simulations.

### Nouveaux matériaux pour la spintronique

**Pr. Abdelilah Benyoussef**

Université Mohammed V Agdal, Rabat  
Membre résident de l'Académie Hassan II  
des Sciences et Techniques

Des découvertes récentes ont fait émerger une nouvelle classe d'électronique «l'électronique de spin ou la spintronique», qui utilise le spin de l'électron au lieu de sa charge pour créer des courants polarisés. La spintronique, connaît actuellement un développement extraordinaire, avec la fabrication de dispositifs nanométriques basés sur des matériaux ferromagnétiques et des semiconducteurs. Leurs applications sont nombreuses, allant de l'enregistrement, l'électronique, l'optoélectronique à l'information quantique.



La découverte de la magnétorésistance géante GMR, en 1988 par Albert Fert et Peter Grünberg (Prix Nobel de physique 2007), est considérée comme le point de départ de la spintronique. La GMR est basée sur la variation du courant électrique en présence d'un champ magnétique. En effet, dans la GMR le courant circule dans une couche métallique comprise entre deux couches magnétiques d'aimantations parallèles. Alors que dans la magnétorésistance à effet tunnel TMR, le courant circule perpendiculairement aux couches par effet tunnel à travers une barrière isolante.

L'électronique de spin a apporté une contribution importante à la miniaturisation recherchée pour l'électronique, elle utilise des composants nanométriques pour traiter et stocker l'information. Cependant, les limites de la miniaturisation à l'échelle nanométrique sont connues et il devient impératif de trouver de nouvelles voies et de nouveaux matériaux pour dépasser ces limites.

Les propriétés les plus recherchées, pour ces matériaux, sont une forte polarisation en spin, des propriétés magnétiques modulables par un champ électrique et une longue durée de vie de la polarisation en spin.

Parmi les nouveaux matériaux prometteurs, nous citons; les semi-conducteurs magnétiques dilués, qui donnent aux semi-conducteurs conventionnels de nouvelles propriétés magnétiques, les oxydes fonctionnels, y compris les demi-métaux et les multiferroïques, et les semi-conducteurs organiques.

### Session Plénière III : Physique et Sciences de l'Ingénieur

#### Instrumentation pour les lasers à impulsions ultra-courtes

**Pr. Daniel Kaplan**

Membre de l'Académie des Sciences, France  
Président de la société Fastlite

Le développement dans les vingt dernières années de sources laser à impulsions puissantes et ultra-courtes (durées comptées en femtosecondes et plus récemment en attosecondes) a conduit au besoin d'instruments permettant le contrôle et la mesure de la forme temporelle et spatiale de ces impulsions lumineuses. Il s'agit principalement de concentrer l'énergie de l'impulsion de manière à obtenir des densités de puissance extrêmes, qui ouvrent des possibilités nouvelles à l'optique non linéaire en termes de science et d'applications, par exemple l'accélération de particules par des lasers, l'usinage de matériaux à l'échelle de quelques dizaines de nanomètres, la génération d'effets relativistes, etc...



Après une vue générale des nouveaux problèmes de contrôle posés par ces lasers, on racontera concrètement l'histoire de FASTLITE, une petite société créée il y a plus de dix ans pour apporter des approches originales à la solution de ces problèmes.

L'objectif de cette présentation est de retracer l'historique d'une petite entreprise dans le domaine de l'instrumentation scientifique, dont le parcours constitue un exemple atypique, mais porteur de réflexions sur les moyens de construire une activité économique issue de la recherche fondamentale. La société a été créée en 1999 par deux Seniors expérimentés Daniel Kaplan et Pierre Tournois au moment où ils atteignaient l'âge officiel de la retraite. Elle a recruté essentiellement des jeunes docteurs es sciences qui s'impliquent dans tous les aspects de l'activité de l'entreprise. Elle opère dans le contexte de la recherche sur les impulsions lasers ultracourtes, principalement dans le domaine du contrôle et de la mesure de la forme temporelle de ces impulsions.

**REVISITING THE PASTEUR QUADRANT :  
POST-NORMAL SCIENCE,  
SOCIETY AND NATURAL CATASTROPHES**

**Pr. Juan Carlos Castilla**

Pontificia Universidad Catolica de Chile Casilla, Chili  
Membre Associé de l'Académie Hassan II  
des Sciences et Techniques

The presentation focuses on the need to tackle and develop Post-Normal Science (P-NS) approaches particularly when countries have to plan ahead to confront natural non-predictable and sudden catastrophes, such as earthquakes, tsunamis, typhoons or epidemics. The concept of Normal Science, as defined by T.S Kuhn (synthesized as “puzzle-solving science”), is exemplified by the “Normal and Modern knowledge” on plate tectonics and earthquake science accumulated in Chile (the largest earthquake hit country in the world) over the past 40 years. Post-Normal Science is hereby defined (Funtowicz and Ravest, 2008) as a new conception for the management of complex-science socio-biophysical issues (socio-biophysical problem-solving). Uncertainty, value loading, plurality, communication with society and governance are inputs and major end products of P-NS. The large Chilean earthquake, 27 February 2010 (27F: magnitude 8.8) serves as example to contrast Normal versus P-NS, either seen from the lineal science-developing model or the Pasteur quadrant model.



The main factors (science advances, natural indicators, socio-cultural resources, local ecological knowledge, man-made systems) responsible for the survival/dead of coastal small-scale fishers during the 27F earthquake and tsunamis in central Chile are analysed. It is concluded that in the future we need to integrate at least all these factors to achieve a better “catastrophe management” situation, and thereafter to develop P-NS new governance schemes. In a country, the existence of just top advanced scientific knowledge is no enough to confront sudden natural catastrophes. Academies, such as the Morocco Hassan II Academy of Sciences and Technologies, may play the role of a catalyser to advice the government on how to be prepared to better confront complex natural catastrophes scenarios, via the exercise of Post-Normal Science strategies, which aim much further than just simple inter or multidisciplinary exercises.

**Matériaux cellulaires pour des  
applications piézoélectriques**

**Pr. M. Bousmina**

Académie Hassan II des Sciences et Techniques,  
Université Euro-méditerranéenne de Fès, Maroc

Les matériaux piézo-électriques ont la propriété de transformer une contrainte mécanique en une réponse électrique et inversement un potentiel électrique induit une déformation du matériau. Cette propriété est derrière le fonctionnement de nombreux dispositifs tels que les capteurs, les injecteurs et actionneurs de moteurs, les résonateurs, les hauts parleurs, les allume-gaz, les films minces des Smartphones, les filtres électroniques, les dispositifs de positionnement de la pointe des microscopes à force atomique et à effet tunnel, etc.



De nombreux matériaux naturels ou synthétiques sont dotés du caractère piézoélectrique et ceci inclut, entre autres, le bois, l'os, la soie, l'ADN, le Quartz, les pérovskites, les céramiques et quelques semi-conducteurs. Bien que ces matériaux soient largement utilisés dans l'industrie, leur rigidité et leur densité restreignent leur application dans des domaines où la flexibilité, la densité et l'épaisseur (films minces) sont des critères importants.

Nous exposerons dans cette présentation une nouvelle catégorie de matériaux polymères cellulaires bon marché et caractérisés par une importante flexibilité et une très faible densité tout en offrant la possibilité de les mettre en œuvre sous forme de films minces. Nous discuterons également l'importance de leur modification par le graphène pour augmenter la réponse piézoélectrique du matériau final tout en le dotant de nouvelles propriétés inédites.

### L'expérimentation a-t-elle (encore) sa place en mécanique des matériaux ?

**Pr. André Zaoui**

Membre de l'Académie des Sciences, France  
Membre associé de l'Académie Hassan II  
des Sciences et Techniques

Les progrès importants et rapides réalisés récemment en matière de modélisation et de simulation numérique en mécanique des matériaux peuvent donner à penser que l'expérimentation n'a plus rien à apporter dans ce domaine de recherche. Chacun reconnaît certes la nécessité des expériences classiques d'identification des comportements mécaniques (en déformation et en rupture) et de validation des modèles, mais le doute existe quant à l'apport de l'expérimentation à la compréhension et à la prédiction (et donc à l'amélioration/optimisation) de ces comportements. Il apparaît donc opportun d'examiner le rôle que peut effectivement jouer une expérimentation moderne adaptée en micromécanique des matériaux dans un dialogue renouvelé avec la modélisation et la simulation numérique.



Le contexte actuel des développements numériques et expérimentaux en mécanique des matériaux apparaît très favorable. D'une part, les puissances de calcul et les méthodes numériques (X-FEM, FFT...) ont fait des progrès considérables, débouchant sur une capacité accrue de calcul numérique sur microstructures complexes. D'autre part, les techniques expérimentales, tant en matière de caractérisation des microstructures (EBSD, microtomographie par Rayons X, microdiffraction, AFM...) que d'essais mécaniques poussés in situ (MEB, MET, RX, mesures de champs...) débouchent sur une capacité accrue de caractérisation mécanique et structurale à micro-échelle. Les conditions semblent ainsi réunies pour un dialogue de type nouveau entre expérimentation et modélisation en micromécanique des matériaux.

On en donnera ici quelques illustrations dans le domaine de la mécanique des matériaux cristallins, en plasticité et endommagement, en montrant quelques répercussions des progrès récents des techniques expérimentales et numériques sur la

modélisation. L'accent sera mis sur l'utilisation combinée de l'EBSD, des essais mécaniques dans le MEB et des mesures de champs de déplacement associées, pour répondre aux nouveaux besoins de la modélisation par changement d'échelle, dans trois domaines différents :

- l'analyse des champs mécaniques locaux ;
- l'identification du comportement intracristallin ;
- la définition du volume élémentaire représentatif.

Au total, l'expérience aura ouvert à la modélisation de nouveaux champs d'application; elle lui aura permis de déboucher sur de nouvelles méthodologies; elle aura conduit à lui poser de nouvelles questions théoriques qui n'ont, pour le moment, pas encore reçu de réponses. Il est vraisemblable que de tels apports de l'expérimentation ne soient pas spécifiques de la micromécanique, à condition de développer une mécanique résolument multi-échelle et multi-physique, de consacrer les efforts voulus à la mise au point des techniques expérimentales innovantes adéquates et de mener les recherches en couplant étroitement expérience, simulation numérique et modélisation.

\*\*\*\*\*



## Focus



## Le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique

### Interview du Directeur du CNRST



**Professeur Driss ABOUTAJDINE**

**Question : Quel est, Monsieur le directeur, le positionnement du CNRST dans l'architecture du système national de la recherche scientifique?**

**Réponse :** Je voudrais tout d'abord rappeler les missions du CNRST telles qu'elles sont spécifiées dans la loi 80.00.

Le Centre National pour la Recherche Scientifique et technique est un organisme public de recherche, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière. Il est placé sous la tutelle de l'Etat.

C'est un opérateur de recherche, qui a pour missions la promotion, le développement et la valorisation de la recherche scientifique, en fonction des besoins culturels, économiques et sociaux du pays et en liaison avec les organismes publics et privés poursuivant les mêmes objectifs, à travers :

- La mutualisation des moyens et services;
- Le soutien à la réalisation de travaux de recherche;
- L'appui pour une ouverture à l'international;
- Et l'encouragement de la valorisation de la recherche.

Le CNRST est le bras armé de l'état marocain chargé de mettre en place la politique gouvernementale en matière de recherche scientifique et technique. Comme spécifié dans la loi, il doit le faire en liaison avec les organismes poursuivant les mêmes objectifs. Effectivement, il existe au Maroc plusieurs directions/institutions intervenant dans le domaine de la recherche dont certaines sont sous la tutelle d'autres ministères que celui de l'enseignement supérieur, de la recherche scientifique et de la formation des cadres. Cependant à notre connaissance le CNRST est le seul à assurer les missions de mutualisation comme celles des UATRS, de l'IMIST et de MARWAN.

Il assure avec d'autres organismes, la promotion de la recherche et son ouverture à l'international à travers le financement sur appels à projets, l'accompagnement vers l'excellence à travers la labélisation des unités associées au CNRST (URAC), l'encouragement de la naissance et de la pérennisation de réseaux de recherche et enfin l'appui dans le cadre de programmes de coopération bilatérale ou multilatérale avec des organismes étrangers comparables au CNRST.

Nous souhaitons que le CNRST puisse jouer un rôle de coordination entre tous les acteurs intervenant dans la promotion et de la recherche et donner de la visibilité et permettre le suivi de l'ensemble des actions menées par ces acteurs à travers un portail unique.

**Question : Comment le CNRST contribue-t-il à l'amélioration de la recherche scientifique et quels sont les moyens dont vous disposez (infrastructures de recherche, documentaires, réseaux de communications, ...)?**

**Réponse :** Je vais commencer par vous répondre d'abord sur les infrastructures de recherche dont dispose le CNRST.

Le CNRST dispose de plusieurs infrastructures, réparties entre plusieurs unités, au service des chercheurs et de la recherche nationale.

### L'Institut Marocain de l'Information Scientifique et Technique (IMIST).

Il a pour principale vocation de mettre à la disposition des milieux scientifiques, des industriels et des différents décideurs la documentation scientifique et technique dont ils ont besoin pour être à la pointe de leurs activités et de faciliter l'accès aux travaux et aux compétences scientifiques nationaux. Il assure aussi un service de veille scientifique et technologique. Il dispose actuellement de :

- Plus de 250 000 documents (ouvrages, revues, actes de congrès, thèses, rapports,...);
- Plusieurs Bases de données bibliographiques:
  1. Scopus : 23 000 titres de revues issus de plus de 5000 éditeurs internationaux;
  2. Web of science : 9 300 revues scientifiques;
  3. Mathscience : plus de 1 900 revues en Maths.
- Des bases de données en full text :
  1. Sciences Direct 2000 revues couvrant 23 domaines.
  2. JSTOR plus de 1000 revues.
  3. Fonds Documentaire IMIST plus de 20000 monographies.
  4. Toubkal plus de 8000 thèses.
- Plus 10 000 notices de monographies
- Plus de 4000 ouvrages électroniques (E-Books).

### Les Unités d'Appui Techniques à la Recherche Scientifique (UATRS).

L'unité UATRS est une structure dont la mission est de mettre à la disposition des chercheurs, des producteurs et des décideurs un savoir et une compétence dans le domaine de l'analyse de la matière (inerte ou vivante) à chaque étape de leurs projets pour maximiser leurs chances de succès et pour leur permettre d'atteindre leurs objectifs. La division est formée de trois plates-formes opérationnelles dans les domaines de la chimie, la biologie et les matériaux. Elles permettent aujourd'hui d'offrir des prestations dans les meilleures conditions, couvrant un vaste domaine d'applications, et ce, en étroite collaboration avec les groupes industriels et en assurant une forte dimension de la formation à la recherche et par la recherche. Ces prestations génèrent ainsi des connaissances permettant d'investir dans des domaines de la recherche et du développement technologique prometteurs tels que l'environnement, l'agro-alimentaire, les matériaux, l'énergie, la santé, le secteur pharmaceutique, les biotechnologies, la génomique etc.



### La division des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC).

Connue sous l'appellation du réseau MARWAN, cette unité est dédiée à la mise en place, au développement et à la gestion des services liés aux technologies de l'information et de la communication offerts à l'ensemble des universités et établissements de recherche nationaux.

Actuellement, plus de 130 établissements d'enseignements supérieur et de recherche sont connectés au réseau MARWAN à des débits allant jusqu'à 100 Mbps.

Parmi les services mis à la disposition de la communauté scientifique figure la grille de calcul MaGrid utilisée actuellement par 5 universités et plus de 120 chercheurs. D'autres sont en cours de développement comme l'accès aux logiciels spécialisés pour la conception, la simulation et la réalisation de circuits électroniques mis en place en partenariat avec le Cluster microélectronique.

### Le Laboratoire d'Instrumentation Scientifique (LIS).

Le LIS assure, depuis 1985, une double mission de service scientifique et technique et de formation des personnels à la maintenance. Il offre de nombreux services en matières de maintenance et des technologies d'interconnexions en électronique. Il contribue à l'exploitation optimale du patrimoine en équipements scientifiques et techniques. Il assure pour nos partenaires des missions pour :

- le recensement et l'étude de l'existant;
- la formation de compétences humaines pour la maintenance des équipements;
- l'organisation et la mise en place des structures pour la maintenance.

Ces services s'inscrivent dans le cadre de conventions et de projet nationaux et régionaux tels que :

- Le Programme de Maintenance des Equipements Universitaires (PROMASUP);

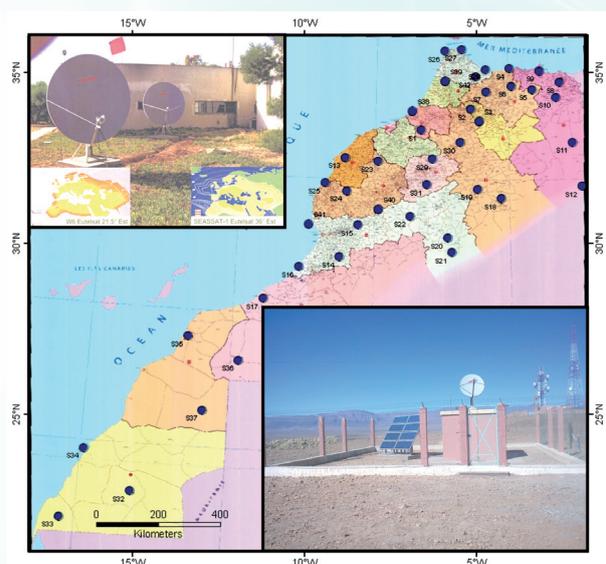
- L'Opération de Gestion et Maintenance du Patrimoine du CNRST;
- Le Projet Régional, (Afrique), AFRA/AIEA sur la maintenance de l'instrumentation nucléaire et connexe.

Le CNRST dispose en outre d'un service pour la valorisation de la recherche qui gère le Réseau Marocain de l'Incubation et de l'Essaimage dont nous allons parler plus tard.

Il dispose de structures qui viennent en appui à ses missions dont : **(i)** le laboratoire de microbiologie moléculaire qui est responsable de la collection de microorganismes, **(ii)** l'Institut National de Géophysique (ING) qui assure une mission de veille et de surveillance du territoire national pour ce qui concerne les catastrophes naturelles dont les séismes et les tsunamis, **(iii)** la cellule chargée de la diffusion de la culture scientifique et technique.



Centrale d'acquisition et de traitements des données sismiques en temps réel pour les besoins de l'alerte sismique 24/24.



Nouvelle configuration du réseau national de surveillance et d'alerte sismique  
Exemple de nouvelle station sismique installée dans la région d'Errachidia

Un autre service œuvre pour mettre en place les mécanismes permettant d'impliquer la diaspora marocaine dans le développement scientifique et économique de notre pays. Il s'agit du service FINCOME.

Pour la 1<sup>ère</sup> partie de la question, en plus de tous les services mutualisés que le CNRST offre à la communauté scientifique marocaine, le CNRST œuvre pour l'animation de la recherche scientifique, sa structuration, son financement et son ouverture à travers la coopération avec nos partenaires.

Ainsi dans le cadre de ses activités de soutien à la recherche scientifique, le CNRST a mis en place un programme de soutien aux manifestations et aux publications scientifiques dont les principaux objectifs sont :

- Permettre une large diffusion des résultats des travaux de recherche innovants;
- Renforcer les échanges et le réseautage entre chercheurs à l'échelle nationale et internationale;
- Encourager la participation de jeunes chercheurs aux manifestations scientifiques;
- Encourager la publication d'ouvrages scientifiques originaux et de revues savantes.

Il lance périodiquement depuis plusieurs années des appels à projets de coopération permettant d'assurer des missions de mobilité pour des chercheurs et des doctorants avec des pays partenaires dont la France, l'Espagne, le Portugal, l'Italie et la Hongrie. Il a aussi mis en place des programmes de coopération plus consistants avec le CNRS, l'INSERM en France le Royaume Uni et un autre va être lancé avec la Turquie. Ces programmes aboutissent à la création d'un groupement de recherche ou un laboratoire international à une unité mixte internationale.

A côté, de la coopération, le CNRST encourage la mise en réseau des laboratoires au sein des pôles de compétences, l'accompagnement de l'excellence à travers la labélisation des URAC et le financement de la recherche par l'intermédiaire d'appels à projets qu'ils soient ouverts, thématiques, sectoriels ou pluridisciplinaires. Un appel est actuellement publié sur le site web du CNRST et il consacre aux projets 300 millions de dirhams.

La valorisation de la recherche et l'appui aux incubateurs nationaux fait partie des missions du CNRST et à ce titre, un service est dédié à ces activités et aux relations avec les entreprises. Il a déjà à son actif plusieurs créations de start-up et de projets incubés financés au sein du CNRST comme dans plusieurs autres incubateurs nationaux.

**Question : Vous dites offrir des prestations aux universités et aux industriels marocains à travers les unités d'appui techniques à la recherche scientifique. Est-ce à dire que le CNRST n'a pas vocation d'effectuer des recherches sur des thèmes qui lui sont propres et qu'il définirait à travers les moyens et les compétences dont il dispose?**

**Réponse :** D'après la loi 80.00, le CNRST est d'abord un organisme pour la promotion de la recherche scientifique aussi bien universitaire que celle des autres secteurs. Il est d'abord une agence de moyens ou de mutualisation de moyens. Cependant, le CNRST peut effectuer des missions à la demande de l'état. Dans ce cadre le CNRST a actuellement quelques unités propres qui travaillent en soutien aux missions du CNRST où à la demande de l'état.



Microscope électronique de transmission

**Question : Comment est concrétisé votre soutien à la réalisation des travaux de recherche? Etes-vous dans ce cadre associés à d'autres structures de recherche marocaines ou internationales?**

**Réponse :** Comme je l'ai dit précédemment, nous avons des accords avec plusieurs organismes internationaux pour financer des recherches menées en partenariat par des institutions des deux pays.

Ainsi le Service de Coopération avec les Organismes de Recherche (SCOR) gère de nombreux accords de coopération scientifique avec ses homologues qui permettent, en particulier, de financer la mobilité des chercheurs de part et d'autre, dans le cadre de projets de recherche soumis conjointement.

Plusieurs ont commencé depuis plusieurs années. Il s'agit en particulier des accords : CNRST - CNRS.

Le CNRS français est le premier établissement de recherche avec lequel le CNRST a signé une convention en 1984. Dans le cadre de cet accord, des appels à projets sont lancés annuellement pour les communautés scientifiques marocaines et françaises pour le dépôt de leurs projets de recherche. Les projets retenus le sont pour deux ou trois années, mais, qui sont un tremplin pour la mise en place de :

- PICS (Projet International de Collaboration Scientifique) qui formalise pour trois ans un projet bien défini, ayant déjà donné lieu à une ou plusieurs coopérations, avec un cofinancement équilibré des organismes partenaires,
- GDRI (Groupement de Recherche International), réseau de recherche sans personnalité juridique, créé pour une durée de quatre ans, qui regroupe plusieurs laboratoires de deux - ou davantage - pays pour la coordination scientifique d'une thématique déterminée,
- LIA (Laboratoire International Associé), «laboratoire sans murs», sans personnalité juridique, qui associe des équipes d'un ou plusieurs laboratoires marocains à ceux, affiliés aux organismes de recherche français concernés. Ce laboratoire met en commun, pendant une durée de quatre ans, éventuellement renouvelable une fois, des ressources humaines et matérielles pour réaliser, avec une «valeur ajoutée», un programme défini conjointement.

Je peux citer comme exemple de cette évolution le cas de trois projets soutenus dans le cadre de la convention d'échanges (1986, 1997, 2000) qui ont donné lieu à un PICS (97-2000), intégré dans un GDRI (2005-2008) : «Calorimétrie électromagnétique à argon liquide d'Atlas», qui a donné lieu ensuite, en 2010 à la création d'un LIA, le Laboratoire International Associé pour la Physique des Collisionnaires. (LIPC 2010-13). Cet exemple n'est pas isolé.

La convention avec le CNRS français est la plus ancienne et la plus importante, mais le CNRST a signé d'autres conventions d'échanges :

- avec des organismes de recherche européens :

- INSERM, IRD, INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique)-France,
- CERN (Centre d'Etudes et de Recherche Nucléaire), Europe,



- CSIC (Conseil Supérieur des Recherches Scientifiques), CIEMAT (Centre de Recherche Energétique Environnementale et Technologie) – Espagne,
- CNRi (Conseil National de la Recherche.) Italie,
- DFG (Organisme Allemand pour la Promotion de la Recherche) Allemagne,
- FCT (Fondation pour la Science et la Technologie. Portugal),
- ONHRT (Office National Hongrois de la Recherche et de la Technologie),
- **et asiatique** : La Kosef (Fondation coréenne pour la Science et le Génie).

Dans le cadre de ces conventions, des appels à projets sont régulièrement lancés pour les communautés scientifiques marocaines et étrangères pour le dépôt de leurs projets de recherche. Les principaux bénéficiaires de ces projets sont les universités et certains organismes de recherche non universitaires. (IAV, ENIM, INSAP, INH, Institut Pasteur). Le SCOR (Service de Coopération avec les Organismes de Recherche) gère ainsi 100 à 150 projets annuellement.

Toujours dans la perspective d'offrir à notre communauté scientifique une coopération diversifiée, d'autres programmes viennent d'être lancés- à l'instar de celui avec le British Council signé dernièrement - ou le seront bientôt. Le CNRST envisage de signer une nouvelle convention-réactualisée- avec la DFG allemande et un accord de partenariat avec la Turquie.

**Question : Vous avez en dernier lieu parlé de valorisation de la recherche scientifique. Comment s'exprime cette valorisation et y a-t-il une collaboration ou un rapprochement avec l'entreprise et l'université marocaines dans un esprit de partenariat et de dynamique pouvant encourager l'innovation scientifique et technique?**

**Réponses** : La valorisation de la recherche, l'innovation et le transfert de technologie vers le milieu socioéconomique est l'aboutissement normal des activités de recherche-développement et le baromètre des politiques réussies dans ce domaine. Désormais incontournables aussi bien dans le domaine de la recherche que dans celui de l'industrie, l'économie de l'innovation est la clé de réussite de chaque pays. Conscient de cette réalité, le Maroc s'est penché sur cette problématique dès le début des années 2000 et un constat a été dressé concernant la réalité du terrain à savoir :

- Manque de valorisation de la recherche scientifique dans le milieu universitaire;

- Faible interaction entre l'université et le monde économique;
- Difficulté de création d'entreprises innovantes.

Dans ce domaine, l'efficacité résiderait dans la conjugaison des efforts pour mettre en place les bons mécanismes et infrastructures et les coordonner entre plusieurs acteurs partageant les mêmes objectifs et missions. C'est dans ce sens-là qu'un programme national dédié à la valorisation de la recherche et la mise à niveau de l'entreprise a été mis en place en 2002 par notre ministère de tutelle et le ministère du commerce, de l'industrie et des nouvelles technologies en partenariat avec d'autres acteurs socioéconomiques œuvrant dans le domaine, notamment le CNRST, l'OMPIC, R&D Maroc....Ce programme comprenait 4 composantes dont notamment :

### 1. Le Réseau de Diffusion Technologique (RDT).

C'est un réseau de compétences au service de l'innovation et du développement technologique des entreprises. Il met en synergie des compétences issues de divers horizons (centres techniques industriels, délégations du MICMANE, universités, organisations professionnelles, etc.) ainsi que des moyens financiers. Le RDT vise à travers une structure à la fois souple, maillée et coordonnée, à :

- Accompagner les entreprises industrielles dans l'identification et la mise en œuvre de leurs besoins en matière de projets d'innovation ou de développement technologique;
- Constituer une passerelle entre les entreprises industrielles et les prestataires de services (laboratoires universitaires, cabinets de conseil et ingénierie, centres techniques industriels, etc.);
- Promouvoir une culture de l'innovation et du transfert de technologie au sein des entreprises au sein des entreprises industrielles.

Le RDT propose aux entreprises éligibles, relevant des secteurs de l'industriel, des TIC ou des technologies avancées, Un soutien financier dénommé PTR (Prestation Technologique Réseau) pour la réalisation de prestations à caractère innovant et/ou technologique à hauteur de 75% et ce dans la limite d'un plafond de 100.000 Dhs. Le RDT prend également en charge les coûts des prestations d'expertises liées à :

- Un diagnostic technologique visant l'émergence/formulation de besoins en prestations technologique/d'innovation, dans la limite de 36 000 Dhs.
- Une collaboration à contenu technologique avec un centre de compétences tiers, s'inscrivant dans un programme d'innovation ou de développement de produit ou procédé nouveaux ou fortement améliorés.
- La preuve du concept ou l'étude de faisabilité et de validation technico-économique du projet.
- La rédaction de brevet.

## 2. Le Réseau de Génie Industriel (RGI).

Le Réseau de Génie Industriel (RGI) a été mis en place afin d'aider le tissu industriel marocain dans l'élaboration d'innovations simples, liées à l'organisation de l'entreprise permettant des gains de productivité importants. L'ensemble des outils dont ont besoin les entreprises en premier lieu appartiennent au génie industriel. Des universitaires adhérents à une charte accompagnent l'entreprise en vue de la mise en place d'une action de progrès. L'originalité de la démarche réside dans le fait que les formateurs se forment au contact de l'industrie et vont pouvoir dispenser le savoir-faire au public bénéficiaire de leur accompagnement à savoir les cadres d'entreprises et les stagiaires qui seront mis à disposition de l'entreprise pour mettre en place les actions du plan de progrès.

Le réseau de génie industriel est un programme destiné aux universités désirant proposer des prestations de services aux bénéficiaires des industriels et ainsi devenir un véritable acteur du tissu socio-économique.

Le Réseau de Génie Industriel a pour principales missions :

- L'accompagnement des entreprises dans toute démarche d'amélioration de leur productivité
- De former des enseignants chercheurs, des cadres d'entreprises et des entrepreneurs au Génie Industriel

Le RGI et le RDT coordonnés respectivement par le CNRST et le Ministère de l'industrie ont fusionné fin 2007 dans le cadre du RDT qui est géré actuellement par le Centre Marocain de l'Innovation.

## 3. Le Réseau Maroc Incubation et Essaimage (RMIE).

Le Réseau Maroc Incubation et Essaimage constitue la pièce maîtresse du dispositif mis en place. Il a pour

vocation la valorisation de la recherche scientifique à travers l'accompagnement et le soutien des projets de création d'entreprises, innovants et viables, à travers une démarche d'incubation et d'essaimage.

Pour cela, il poursuit les missions suivantes :

- mutualisation et professionnalisation des pratiques des incubateurs ;
- sensibilisation à l'entrepreneuriat ;
- financement de projets accueillis dans ses incubateurs membres ;
- formation des ressources humaines impliquées dans l'émergence d'entreprises innovantes ;
- développement d'un processus de création d'entreprise innovante au Maroc ;
- visibilité à l'international du potentiel de valorisation de la recherche ;
- soutien des manifestations portant sur l'entrepreneuriat en milieu universitaire.

Le Réseau Maroc Incubation & Essaimage a permis le développement de l'incubation au Maroc et l'entrepreneuriat et c'est dans ce sens que la pérennisation du réseau est primordiale néanmoins certaines contraintes et difficultés font obstacle au bon fonctionnement du réseau et entrave son essor dont les principales sont :

- L'inexistence de cadre juridique et organisationnel convenable pour l'innovation et la valorisation économique de la recherche, alors qu'il constitue un préalable à toute politique dans ce sens (Autonomie des incubateurs, bureaucratie, intéressement des chercheurs, loi sur la propriété intellectuelle, etc.);
- Les compétences au niveau de l'évaluation et l'accompagnement qui demeurent insuffisants en quantité et en qualité;
- L'absence d'autonomie des incubateurs;
- Une culture dominante aux universités.





## **Appui à la recherche**



## Les accidents vasculaires au Maroc : Résultats et enseignements d'une enquête épidémiologique

Mustapha EL ALAOUI FARIS

Professeur de Neurologie, Faculté de Médecine et de Pharmacie,  
Université Mohammed V-Souissi, Rabat.

Chef du service de Neurologie A et de Neuropsychologie,  
Hôpital des spécialités, Rabat.

Responsable du Projet AVC, projet financé  
par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Rabat

Et le Groupe de Recherche sur les AVC au Maroc

- Etudes épidémiologiques et cliniques : Mustapha EL ALAOUI FARIS,  
Mohamed YAHYAOUÏ, Ilham SLASSI, Saadia AÏDI;
- Etude Génétiques : Sellama NADIFI, Mariame EL MESSAL;
- Etude métabolique : Ahmed ADLOUNI, Layachi CHABRAOUI.



### Les Accidents Vasculaires Cérébraux : véritable problème de santé mondiale

L'Organisation Mondiale de la Santé a estimé que 57 millions de décès sont survenus dans le monde en 2008 et que 36 millions sont dus à des maladies non transmissibles. Parmi ceci les accidents vasculaires cérébraux (AVC) constituent la cause principale de mortalité avec un nombre de décès estimé à 6,2 millions représentant environ 11% des décès (WHO, 2011). Les AVC ont été classés comme la septième cause d'handicap en 2002. Par ailleurs, les projections épidémiologiques indiquent que les AVC seront la deuxième cause de décès et la sixième cause d'handicap en 2030 dans le monde (Mathers et al., 2002).

Depuis l'installation de la transition démographique dans plusieurs pays en développement, les maladies cérébro-vasculaires sont devenues un problème majeur de santé publique. Les projections épidémiologiques montrent que la mortalité par AVC sera plus rapide dans les pays en développement par rapport aux pays à haut niveau économique, ceci est dû à l'augmentation de la prévalence des facteurs de risque (vieillesse de la population, changement de style de vie et augmentation des facteurs de risque vasculaires tels que l'hypertension artérielle, le diabète et le tabac) et aussi à la moindre disponibilité des moyens de prévention primaire et de programmes de prises en charge des AVC à la

phase aiguë (Srikant et al., 2007; Strong et al., 2007; Johnston et al., 2009; Addo et al., 2012). L'analyse des études épidémiologiques menées entre 1970 et 2008 montre que l'incidence des AVC a diminué de 42% dans les pays à haut niveau économique alors qu'elle a augmenté de 100% dans les pays à faible niveau économique (Johnston et al., 2009; Feigin et al., 2009). Par ailleurs, des études récentes dans des pays comme l'Inde, le Chili et l'Afrique de Sud ont montré que le taux d'incidence des AVC est quasi-similaire à celui retrouvé dans les pays à haut revenu économique, cependant la mortalité due aux AVC est plus élevée (Addo et al, 2012; Das et al, 2007; Lavados et al, 2005).

A partir de 2030, les projections épidémiologiques prédisent que les AVC seront la première cause de décès (14,4% du total des décès) et la troisième cause d'handicap (6%) dans les pays à moyens revenu et la troisième cause de décès (8,2% du total des décès) et la huitième cause (2,8%) d'handicap dans les pays à revenu faible (Mathers and Loncar, 2006). Malgré l'énorme fardeau des AVC dans les pays en développement seuls 15% des recherches sur cette maladie sont réalisées dans ces pays contre 85% dans les pays à haut niveau économique (Johnston et al, 2009). Sans des mesures effectives de prévention pour inverser cette tendance, l'impact du fardeau économique des AVC dans le monde pourrait être dévastateur sur la croissance économique globale (Mukherjee and Patil, 2011).

## Recrudescence des Accidents Vasculaires Cérébraux au Maroc

Depuis plus de dix ans l'expérience des services de Neurologie de l'Hôpital des Spécialités de Rabat, montre l'augmentation continue du nombre de malades hospitalisés pour AVC. En effet, il arrive en moyenne aux urgences neurologiques de cet hôpital, dix à quinze patients par 24 heures, souvent souffrant d'AVC graves avec des troubles de la conscience et une hémiparésie lourde. Cette augmentation de l'incidence des AVC est due à l'entrée du Maroc dans une transition démographique (Courbage et Todd (2005) et son corollaire la transition épidémiologique (Omran, 1971) qui est largement entamée actuellement. Celle-ci est caractérisée par un rôle de plus en plus prépondérant des maladies chroniques à la fois dans la mortalité et la morbidité de la population.

Au Maroc, plusieurs travaux ont montré à la fois les changements des habitudes alimentaires de la population (Fahed et al., 2012) et l'augmentation de la prévalence des facteurs de risques vasculaires tels que l'hypertension artérielle, le tabac et le diabète (Tazi et al, 2003; Essariab et al., 2011; Berraho et al., 2012).

Afin de connaître la fréquence des AVC et leurs facteurs de risque au Maroc, nous avons mené une enquête épidémiologique porte-à-porte dans les régions de Rabat et de Casablanca. Cette enquête a été effectuée dans le cadre du Projet AVC financé par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

### Ethique de l'enquête

Le comité d'éthique de la Faculté de Médecine et de Pharmacie de Rabat a expressément approuvé cette étude. Compte tenu du fait qu'une proportion importante de la population enquêtée est illettrée, les participants à l'enquête ont été invités à donner leur consentement après avoir écouté une note de présentation de l'étude lue en arabe dialectal.

Seuls 3% des ménages ont décliné la participation à cette enquête. Ces refus étaient dus à des raisons diverses, notamment le manque de temps, mais ne sont nullement en rapport avec le contenu de l'enquête.

### Analyse statistique

Toute l'analyse statistique a été réalisée en utilisant STATA 11.0 [StataCorp. 2009. Stata Statistical Software: Release 11. College Station, TX: StataCorp LP].

## Enquête pilote

Afin d'étudier la pertinence du questionnaire et avoir une expérience du terrain, nous avons mené une enquête pilote en octobre 2008. Elle a concerné 600 ménages soit 2500 personnes habitant le milieu urbain et rural. Pour apprécier la sensibilité et la spécificité du questionnaire tous les ménages qui ont signalé la présence d'AVC et 25% de ceux qui ont répondu négativement ont été visités par les neurologues pour confirmer ou non les données rapportées par les enquêteurs. La spécificité et la sensibilité du questionnaire ont été évaluées en utilisant la méthode proposée par Gouri-Devi et al. (1997), ainsi nous avons trouvé que la sensibilité était de 100% à la fois en milieu rural et urbain et la spécificité de 76,4% en milieu urbain et de 76,1% en milieu rural.

### Matériel et méthodes

L'enquête épidémiologique a été réalisée entre novembre 2008 et avril 2009, elle a concerné la Wilaya de Rabat-Salé-Zemmour-Zair (milieu urbain et rural) et le Grand Casablanca (urbain). L'échantillon enquêté est un échantillon stratifié et aléatoire. Il a été constitué avec les experts de la division des statistiques du Haut Commissariat au Plan. L'effectif de la population enquêtée était de 13 000 ménages, 8 000 en milieu urbain et 5 000 en milieu rural. Le nombre des personnes enquêtées était de 60 031 avec 36 756 en milieu urbain et 23 275 en milieu rural. Les données ont été collectées par questionnaire lors d'une enquête porte à porte. La comparaison de notre échantillon avec l'ensemble de la population marocaine a montré que l'échantillon était représentatif de cette population selon divers critères démographiques (âge, sexe) et socio-économiques (milieu urbain et rural, taux alphabétisation) (Aisi et al, 2011) L'enquête s'est déroulée en deux étapes, la première étape est réalisée par des enquêteurs pour recueillir des données démographiques, socio-économiques, nutritionnelles et médicales et la deuxième étape est réalisée par des neurologues qui avaient pour tâche de confirmer ou non l'AVC.

**Lors de la première étape** de l'enquête, les enquêteurs font du porte-à-porte et vont interroger les membres des ménages, en utilisant un questionnaire composé de quatre parties :

- La première partie du questionnaire sera focalisée sur la composition du ménage : l'âge, le sexe, le statut matrimonial, l'occupation, et le niveau d'instruction ont été précisés pour chaque membre du ménage.

- La deuxième partie incluait des questions relatives à l'état de santé, en précisant les antécédents de maladies chroniques telles que l'hypertension artérielle, le diabète, une maladie cardiaque, respiratoire, rhumatismale ou des troubles neuropsychiatriques (dépression, anxiété). Le style de vie a été apprécié par des questions sur les habitudes alimentaires, l'activité sportive, la consommation d'alcool ou l'usage du tabac.
- La troisième partie va apprécier le niveau économique du ménage, les questions concerneront le type de logement, la présence ou non d'électricité, d'eau courante, de sanitaires, les biens possédés : télévision, réfrigérateur, téléphone, voiture, etc.
- La quatrième partie utilise un questionnaire médical spécifique pour repérer les ménages ayant un malade présentant un AVC ou ayant eu une personne décédée à la suite d'AVC.

**La deuxième étape** de l'enquête a été réalisée par 12 neurologues formés au diagnostic des AVC et à l'évaluation des différents handicaps, ils étaient encadrés par 4 neurologues seniors. Les neurologues visitent tous les foyers signalés par les enquêteurs comme ayant une personne souffrant d'un éventuel AVC ou ayant eu une personne décédée d'un AVC. Ils préciseront l'histoire clinique de l'AVC, effectueront un examen neurologique et vasculaire, préciseront l'existence de facteurs de risque, analyseront les données disponibles du dossier médical du malade : scanner et/ou l'IRM cérébrale, examens complémentaires (cardio-vasculaires, biologiques, etc.) rempliront une fiche clinique exhaustive et évalueront l'état fonctionnel et l'autonomie du patient par les échelles de Rakin-modifié et de Barthel et par l'échelle d'activité quotidienne, l'IADL (Instrumental Activities of Daily Living); l'état cognitif et l'humeur seront évalués par le MMSE (MiniMental State Examination) et la MADRS (Montgomery-Asberg Rating Scale).

Par ailleurs, les neurologues préciseront la cause du décès grâce à un questionnaire structuré «d'autopsie verbale» développé par l'OMS pour étudier les causes de décès dans les pays en voie de développement (Chandramohan et al, 1994), ils étudieront aussi le dossier médical et les certificats de décès s'ils sont disponibles.

L'AVC a été diagnostiqué selon les critères de l'OMS (2006), nous avons considéré tous les types d'AVC mais nous avons exclu les accidents ischémiques transitoires. Tous les dossiers des AVC ont été revus par Mustapha El Alaoui Faris pour vérifier le diagnostic et déterminer le type physiopathologique de l'AVC.

## Résultats et commentaires

### Profil clinique et épidémiologique des patients AVC

Nous avons trouvé 127 cas d'AVC, 70 cas en milieu urbain et 57 cas en milieu rural dont 63 cas sont des hommes et 64 des femmes. L'ancienneté moyenne de l'AVC était de 2 ans. L'âge moyen était de 66 ans (+/-14) sans différence entre les sexes ou entre les milieux de résidence. Soixante-dix pour cent des patients avaient un âge supérieur à 65 ans alors que 30% avaient entre 15 et 64 ans. L'AVC atteint surtout les sujets âgés mais peut aussi concerner des adultes relativement jeunes qui risquent de vivre pendant plusieurs années avec un handicap neurologique limitant leur autonomie et leur qualité de vie.

Le scanner cérébral a été réalisé au cours du mois suivant l'AVC, chez 83,5% des patients (85,7% en milieu urbain et 80,7% en milieu rural). Seuls 43,3% des patients ont été hospitalisés (45,7% en milieu urbain et 40,4% en milieu rural). On constate donc que malgré la gravité de l'AVC, moins de la moitié des malades ne sont pas soignés en milieu hospitalier, ceci est dû en particulier au manque flagrant de lits de neurologie en milieu urbain et l'absence totale d'offre de soins hospitaliers spécialisés en milieu rural.

En suivant la classification de Feigin et al (2003) qui classent les AVC en quatre types physiopathologiques. Nous avons trouvé la répartition suivante : les AVC ischémiques (70,9% des cas), les hémorragies intracérébrales spontanées (8,7%), les hémorragies sous-arachnoïdiennes (3,9%) et les AVC d'étiologie indéterminée (16,5%).

Le principal facteur de risque vasculaire retrouvé est l'hypertension artérielle présente chez 57% des patients. Elle est plus fréquente chez la femme (63%) que chez l'homme (52%) et retrouvée plus en milieu urbain (61%) qu'en milieu rural (52%). Le diabète chez 20% des cas, plus fréquent en milieu urbain (26%) qu'en milieu rural (12%), les maladies cardiaques (18%) plus fréquentes en milieu rural (21%) qu'en milieu urbain (16%) et le tabac dans 24%, retrouvé plus en milieu urbain (29%) qu'en milieu rural (18%) mais il ne concernait quasi-exclusivement que des hommes.

Les signes cliniques retrouvés lors de l'examen neurologique étaient l'hémiplégie dans 82% des cas, l'aphasie dans 20%, la démence dans 17% et l'ataxie dans 4%. L'évaluation de l'handicap neurologique par les échelles de Rankin-modifié et de Barthel



a montré que 58% des patients ont un handicap neurologique important responsable d'une perte d'autonomie totale ou partielle. Le handicap est plus important chez les femmes (67%) que chez les hommes (50%), il est plus sévère chez les sujets âgés de plus de 65 ans. Il est aussi plus fréquent en milieu urbain (62%) qu'en milieu rural (52%), probablement par le fait que les personnes vivant en milieu rural survivent plus rarement à un AVC grave.

### **Le taux de Prévalence des AVC**

La prévalence d'une maladie est définie par le nombre de personnes affectées par cette maladie pendant une période donnée, généralement pendant une année. La prévalence mesure le poids d'une maladie au sein d'une population donnée. Elle permet ainsi de connaître le nombre de patients atteints par la maladie, d'évaluer le fardeau social de cette maladie et d'estimer son coût économique. Elle permet aussi d'estimer les besoins à la fois matériel et humain pour soigner cette maladie. Les calculs des taux de prévalence ne prennent en compte habituellement que les personnes âgées de 15 ans et plus (Bonita et al, 1997).

La prévalence globale des AVC observée dans notre enquête est de 284/100.000 habitants (IC: 237-390). Elle est plus élevée chez les hommes (289/100.000) que chez les femmes (278/100.000) et en milieu rural (348/100.000) qu'en milieu urbain (248/100.000). Elle augmente nettement avec l'âge, elle est de 2 500/100.000 après 65 ans. Ce taux de prévalence se rapproche de ceux rapportés par Truelsen et al. (2002) pour la région Moyen Orient-Afrique du Nord, soit un taux de prévalence de 368 par 100.000 pour les hommes et de 320 pour les femmes dans la région EMR-B et de 292 pour les hommes et de 294 pour les femmes dans la région EMR-D (qui inclut le Maroc). Ce taux de prévalence se rapproche aussi de ceux retrouvés dans d'autres pays émergents comme l'Inde (Das et al., 2007), l'Afrique du Sud (The SASPI Project Team, 2004) ou la Chine (Ferri et al, 2011).

Le taux de prévalence relativement bas des AVC retrouvé dans les pays en développement peut s'expliquer soit par la distribution de la population (la population âgée à risque d'AVC est faible dans ces pays, ainsi, seuls 5,5% des personnes dans notre échantillon sont âgées de plus de 65 ans), soit à un taux élevé de mortalité des AVC en rapport à la fois avec l'insuffisance de la prise en charge des AVC à la phase aiguë et au manque de structures adaptées de rééducation et de réadaptation ( Nicoletti et al, 2000; Truseten et al, 2002).

### **Le taux d'incidence des AVC**

L'incidence d'une maladie se définit par le nombre de nouveaux cas survenus au cours d'une période donnée, habituellement une année. L'évaluation de l'incidence pour une maladie donnée suppose de diagnostiquer tous les cas de cette maladie survenus pendant cette période. Nous avons combiné les résultats de l'enquête de prévalence avec les données de l'autopsie verbale (patients décédés à la suite d'un AVC avant l'enquête) (Chandramohan et al, 1994; Sudlow et Warlow, 1996) pour approcher le taux d'incidence des AVC au Maroc. La connaissance de l'incidence des AVC permet de connaître les besoins nécessaires pour le diagnostic précoce et les soins d'urgence de cette maladie. Le taux d'incidence global ajusté à la population mondiale est de 106 pour 100.000 habitants (IC : 56-92), 112/100.000 pour les hommes et 99/100.000 pour les femmes. Ce taux est de 93/100.000 en milieu urbain et 134/100.000 en milieu rural. Le taux d'incidence retrouvé dans notre étude se rapproche de celui rapporté par Lavados et al, au Chili (2005) et par Das et al, en Inde (2007).

### **Les enseignements de cette étude épidémiologique**

De cette étude épidémiologique nous pourrions tirer un certain nombre d'enseignements :

Les AVC sont fréquents au Maroc, pour une prévalence de 282/100.000, leur nombre serait actuellement de 64 000 cas dont plus de la moitié souffrent d'un handicap neurologique permanent, ceux-ci est dû à la fois à l'insuffisance de la prise en charge à la phase aiguë et au manque criant de structures de rééducation dans notre pays. Les projections épidémiologiques estiment le nombre de cas en 2030 à 85 000 cas. Ces AVC atteignent non seulement des personnes âgées mais aussi des adultes jeunes. Ils sont plus fréquents en milieu rural qu'en milieu urbain, ceci est dû probablement au retard sanitaire encore plus important dans les campagnes marocaines que dans les villes.

Pour une incidence de 106/100.000, il y aurait actuellement 25 000 nouveaux cas d'AVC par an et leur nombre atteindra 50 000 nouveaux cas par an en 2030. L'incidence est plus élevée chez les personnes âgées. Plus du quart de ces patients meurent au cours de la première année, ceci est dû à la fois, à la sévérité des AVC chez notre population et au manque des structures de soins des AVC à la phase aiguë.



A cause de la transition épidémiologique en cours au Maroc, le nombre des AVC et les besoins pour les soigner augmenteront très rapidement dans notre pays, il est donc urgent de mettre en place une politique de santé cohérente pour lutter contre les maladies cérébro-vasculaires, cette politique doit se baser sur :

- L'information et l'éducation de la population;
- La prévention primaire et le traitement des facteurs du risque vasculaire (hypertension, diabète, tabac, cardiopathies);
- Le diagnostic précoce de l'AVC (qui passe nécessairement par la généralisation des scanners dans les hôpitaux généraux);
- L'acheminement de ces patients le plus rapidement possible vers les lieux de soins appropriés (nécessité de mettre en place des SAMU régionaux);
- L'augmentation de lits spécialisés de neurologie;
- La mise en place dans les services de neurologie d'unités spécialisées dans le traitement des maladies cérébro-vasculaires à la phase aiguë (Stroke Units), qui seules permettront l'utilisation de la thrombolyse dans des conditions de sécurité pour les patients. La thrombolyse est actuellement le traitement optimal pour soigner les AVC ischémiques à la phase aiguë en permettant de déboucher le vaisseau obstrué mais elle ne peut être utilisée que dans les 4 heures qui suivent l'installation de l'infarctus cérébral. Ce traitement est actuellement largement utilisé dans les pays industrialisés (Wahlgren et al, 2007) et il est en cours de développement dans plusieurs pays en développement (Langhore et al, 2012);
- Le développement de structures de réadaptation et de rééducation des différents handicaps neurologiques provoqués par l'AVC. Ces structures doivent être proches des lieux de vie des malades à la fois en milieu urbain et rural;
- La formation du personnel soignant nécessaire pour la prise en charge de ces patients : kinésithérapeutes, orthophonistes, ergothérapeutes, psychomotriciens, etc.
- L'augmentation de la formation des neurologues, la neurologie étant la discipline où il y a le moins de spécialistes dans notre pays, 150 neurologues pour une population de 33 millions d'habitants alors qu'en Algérie il y a 350 neurologues pour une population analogue et en France il y a environ 2000 neurologues pour 65 millions d'habitants. A signaler que l'OMS conseille le nombre minimum d'un neurologue par 100 000 habitants dans les pays en développement.

## Références

1. Aidi S, Teziti S, Yahyaoui M, Slassi S, Mourji F, El Alaoui Faris M, Prevalence of Stroke Survivors in Morocco: The Rabat-Casablanca Study, Oral communication presented at 20<sup>th</sup> World Congress of Neurology (Marrakech, 12-17<sup>th</sup> November 2011).
2. Addo J, Ayerbe L, Mohan KM, Crichton S, Sheldenkar A, Chen R, Wolfe CDA, McKeivitt C (2012), Socioeconomic status and stroke: An updated review, *Stroke*, 43:1186-1191.
3. Benjelloun S(2002), Nutrition transition in Morocco, *Public health Nutrition*, 5(1A) : 135-140.
4. Berraho M, El Achhab Y, Benslimane A, El Rhazi K, Chikri M, Nejari C (2012), Hypertension and type2 diabetes: a cross-sectional study in Morocco (EPIDIAM Study), *Pan African Medical Journal*, 11(52).
5. Bonita R, Salomon N, Broad JB (1997) Prevalence of stroke and stroke related disability. Estimates from the Auckland stroke studies. *Stroke*, 28(10): 1898-1902.
6. Chandramohan. D, Mande GH, Rodriguez LC, Hayes RJI (1994), Verbal Autopsy for adult deaths: issues in their development and Validation, *International Journal of Epidemiology*, 23:213-22.
7. Courbage Y & Todd E (2007) *Le rendez-vous des civilisations*. Le Seuil, la République des idées, Paris.
8. Das SK, Banerjee TK, Biswas A, Roy T, Raut DK, Mukherjee CH, Chaudhuri A, Avijit Hazra A, Roy J (2007) Prospective Community-Based Study of Stroke in Kolkata, India. *Stroke* 2007, 38: 906-910.
9. Essariab F, Taki H, EMalki A, Hssar M, Saïle R, Ghalim N (2011), Cardiovascular risk factors prevalence in a Moroccan population, *European Journal of Scientific Research*, 49(4):581-589.
10. Fahed AC, El-Hage-Sleiman AKM, Farhat TI, Nemer GM (2012), Diet, genetics, and disease: a focus on the middle East and North Africa Region, *Journal of Nutrition and Metabolism*, 109037: 1-19. doi:10.1155/2012/109037.
11. Feigin VL, Lawes C MM, Bennett D A, Anderson C S. (2003) Stroke epidemiology: a review of population based studies of incidence, prevalence, and case-fatality in the late 20<sup>th</sup> century. *Lancet Neurology*; 2: 43-53.
12. Feigin VL, Lawes CMM, Bennet DA, Parag V. (2009), Worldwide stroke incidence and early case fatality reported in 56 population-based studies: a systematic review, *Lancet Neurology*, 8(4):355-369, DOI: 10.1016/S1474-4422(09)70025-0.

13. Ferri CP, Schoenborn C, Kalra L, Acosta D, Guerra M, Huang Y, Jacob KS, Llibre Rodriguez JJ, Salas A, Sosa AL, Williams JD, Liu Z, Moriyama T, Valhuerdi A, Prince MJ (2011) Prevalence of stroke and related burden among older people living in Latin America, India and China. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 82:1074-1082 doi:10.1136/jnnp.2010.234153.
14. Gouri-Devi M, Gururaj G, Satishchandra P. *Neuroepidemiology in Developing Countries. A Manual for Descriptive Studies*. Bangalore, Prism Book, 1997.
15. Johnston SC, Mendis S, Mathers CD. (2009), Global variation in stroke burden and mortality: estimates from monitoring, surveillance, and modelling. *Lancet Neurol*, 8:345-354.
16. Langhore P, de Villiers L, Pandian JD (2012) Applicability of stroke-unit care to low-income and middle-income countries. *Lancet Neurology*. 11: 331-48.
17. Lavados PM, Sacks C, Prina L, Escobar A, Tossi C, Araya F, Feuerhake W, Galvez M, Salinas R, Alvarez G. (2005). Incidence, 30-day case-fatality rate, and prognosis of stroke in Iquique, Chile: a 2-year community-based prospective study (PISCIS project). *Lancet*. 365(9478) : 2206-15.
18. Mathers CD & Loncar D (2006), Projections of global mortality and burden of disease from 2002 to 2030, *PLoS Med*, 3:e442.
19. Mukherjee D & Patil CG (2011), Epidemiology and the global burden of stroke, *World Neurosurgery*, 76(6S): S85-S90.
20. Nicoletti A, Sofia V, Giuffrida S, Bartoloni A, Bartalesi F et al. (2000), Prevalence of Stroke: A Door-to-Door Survey in Rural Bolivia, *Stroke*, 31:882-885. doi: 10.1161/01.STR.31.4.882
21. Omran A., (1971) The epidemiologic transition: a theory of the epidemiology of population change, *Milbank Memorial Fund Quarterly*, vol. 49, n° 4, p. 509-538.
22. Paul SL, Srikanth VK, Trift AG (2007) The large and growing burden of stroke, *Current Drug Targets*, 8(7):786-793.
23. Sudlow CL and Warlow CP (1996) Comparing stroke incidence worldwide: what makes studies comparable? *Stroke*, 27: 550-558.
24. Tazi MA, Abir-Khalil S, Chaouki N, Cherqaoui S, Lahmouz F, Sraïri J, Mahjour J. (2003). Prevalence of the main cardiovascular risk factors in Morocco: results of a National Survey, 2000, *Journal of Hypertension*, 21(5):897-903.
25. The SASPI Project Team (2004). Prevalence of Stroke Survivors in Rural South Africa. Results from the Southern Africa Stroke Prevention Initiative (SASPI) Agincourt Field Site. *Stroke*. 35:627-632.
26. Truelsen T, Begg S, Mathers C: *Global Burden of Cerebrovascular Disease in the Year 2000*. Geneva, World Health Organization, 2002.
27. Wahlgren N, Ahmed N, Dávalos A et al. (2007) Thrombolysis with altepas for acute ischemic stroke in the safe implementation of thrombolysis in stroke Monitoring-Study (SITS-MOST) : an observational study. *Lancet*, 369:275-82.
28. World Health Organization (2006), *WHO STEPS Stroke Manual: The WHO STEPwise approach to stroke surveillance*. Geneva, WHO. Accessed online on 27 July 2013: <http://www.who.int/chp/steps/Manual.pdf>.
29. World Health Organization (2011), *Global Status Report on Non-communicable Diseases 2010*. Geneva: WHO.

## Etude immunologique et immunogénétique de la tuberculose dans la population marocaine (IMMGEN)

(Juin 2008 - Juin 2012 prorogé à Juin 2013)

Coordonnateur :  
Pr Rajae EL AOUAD  
Faculté de médecine et de pharmacie,  
Université Mohammed V - Souissi  
et Institut National d'Hygiène, Rabat.



### Principaux objectifs scientifiques du projet

#### Objectif général

A travers l'analyse des trois composantes de la tuberculose dans la population marocaine (la réponse immunitaire et la génétique de l'hôte, la diversité phénotypique et génotypique du *Mycobacterium tuberculosis* (Mtb)), le projet IMMGEN a pour objectif général de contribuer à améliorer les outils diagnostiques, et à identifier de nouvelles cibles thérapeutiques ou vaccinales.

#### Objectifs spécifiques

##### Axe de recherche 1 : Étude de la susceptibilité génétique à la tuberculose.

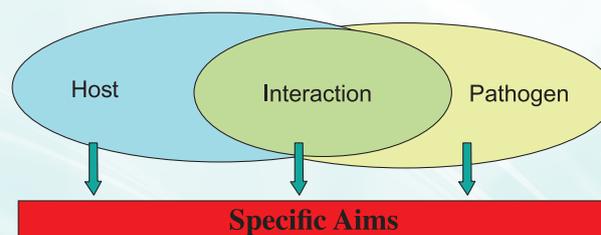
1. Étude du polymorphisme génétique de la région chromosomique 8q12.1 et des gènes candidats NSMAF, DCBP, CYP7A1, TOX1 ;
2. Analyse du profil d'expression des gènes de susceptibilité/résistance à la tuberculose révélés par le transcriptome et étude du polymorphisme des gènes d'intérêt.

##### Axe de recherche 2 : Étude immunologique

3. Caractérisation phénotypique et fonctionnelle de différentes sous-populations de lymphocytes T spécifiques des antigènes de Mtb ;
4. Caractérisation des cytokines clés des voies Th1 et Th2.

##### Axe de recherche 3 : Étude génétique *Mycobacterium tuberculosis*

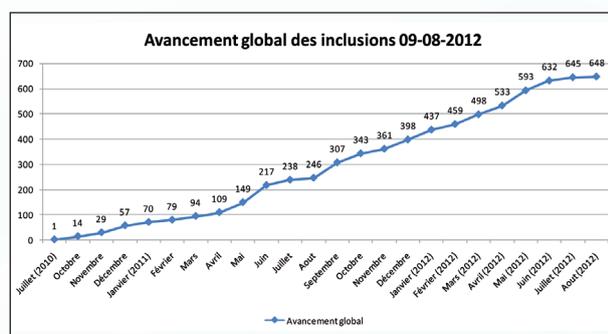
5. Étude de la diversité génotypique des souches de Mtb et caractérisation phénotypique et génotypique de la résistance.
6. Étude du génome de Mtb exprimé dans les macrophages des sites d'infection des patients tuberculeux.



### Protocole et population de l'étude

Les trois axes de recherche relèvent de l'épidémiologie analytique de type étude cas-témoins et étude familiale avec un volet transversal par sous-étude et un volet longitudinal pour l'axe «Immunologie» chez les patients tuberculeux avec un suivi aux mois 2, 4 et 6 (groupe S1) et un suivi au mois 6 (groupe S2). La taille de l'échantillon a été limitée à 660 patients et contrôles répartis dans les 5 sous-études selon le protocole de l'étude. Vingt cinq centres d'inclusion et de prélèvement répartis dans 7 provinces au Maroc (Fès, Marrakech, Oujda,

Tanger, Rabat, Salé et Casablanca) ont participé à l'étude : 7 hôpitaux, 12 Centres de Diagnostic et de Traitement des Maladies Respiratoires (CDTMR), 6 Centres Régionaux de Transfusion Sanguine (CRTS).



## Gestion du projet IMMGEN

En raison de la complexité de l'étude et de l'implication de plusieurs équipes sur de nombreux sites régionaux (25) et de la consistance du travail de suivi ainsi que de l'ambition du coordonnateur de faire de ce projet, soutenu par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, un levier pour des collaborations internationales, l'équipe en charge du projet a recruté un «Project manager» pour l'accompagner dans la conduite de l'étude sur le terrain à travers : i) la mise en place d'un système d'assurance qualité, ii) la préparation de la mise en place, iii) le suivi et la coordination («Monitoring - Site Management»), iv) la gestion de données.

## Retombées scientifiques et socioéconomiques

### A. Articles scientifiques

1. Arji N., et al. "Genetic diversity of TLR2, TLR4 and VDR and pulmonary tuberculosis in Moroccan patients", *J. Infect. Dev. Ctries.* Accepted.
2. Zakham F., et al. "Comparison of a DNA based PCR approach with conventional methods for the detection of Mycobacterium tuberculosis in Morocco", *Mediterr. J. Hematol. Infect. Dis.* 4: (1):1-6, 2012.
3. Zakham F., et al. "Evaluation of conventional molecular diagnosis of Mycobacterium tuberculosis in the clinical specimens from Morocco", *J. Infect. Dev. Ctries.*, 6(1):40-45, 2012.
4. Zakham F., et al. "Rapid Screening and Diagnosis of Tuberculosis: a real Challenge for the mycobacteriologist", *Cell. Mol. Biol.* 58: 1632-1640, 2012.
5. Arji N., et al. "The MCP-1 (CCL2) -2518 GG genotype is associated with protection against pulmonary tuberculosis in Moroccan patients", *J. Infect. Dev. Ctries*, 6(1):73-78, 2012.
6. Lahlou O., et al. "The genotypic population structure of Mycobacterium tuberculosis complex from Moroccan patients reveals a predominance of Euro-American lineages", *PLOS One* 2012; 7(10):e47113. DOI:10.1371/journal.pone.0047113.Epub 2012 Oct. 15, 1-10, 2012.
7. Kizub D., et al. "Qualitative study of perceived causes of tuberculosis treatment default among health care workers in Morocco", *Int. J. Tuberc. Lung Dis.*, 16(9):1214-1220, 2012 Sept., doi:10.5588/ijtld.11.0626. E-pub. 12 July 2012.
8. Zakham F., et al. "Mycobacterial species as a case-study of comparative genome analysis", *Cell. Mol. Biol.*, 57: 1462-1469, 2011.
9. Kelly E. Dooley et al. "Risk factors for tuberculosis treatment failure, default, or relapse and outcomes of retreatment in Morocco", *BioMed Central Public Health*, 11:140, 1-7, 2011 Feb 28.
10. El Fenniri L. et al. «Polyfunctional Mycobacterium tuberculosis-specific effector memory CD4+ T cells at sites of pleural TB», *Tuberculosis (Edind)*, 91 (3) : 224-230, May 2011, doi:10.1016/j.tube.2010.12.005.
11. Sadki K., et al. "Gene polymorphisms with susceptibility to pulmonary tuberculosis in Moroccan population", *Journal of Genetics and Genomics*, 37 (4): 257-264, 2010, doi:10.1016/S1673-8527(09)60044-8.
12. Kourout M., et al. "Molecular Characterization of Rifampicin-Resistant Mycobacterium tuberculosis Strains from Morocco", *International Journal of Tuberculosis and Lung Diseases*, 13 (11): 1440-1442, 2009.
13. Sadki K., et al. "CD209 Promoter Single Nucleotide Polymorphism -336A/G and the Risk for Susceptibility to Tuberculosis Disease in Moroccan Population", *International Journal of Human Genetics*, 9 (3-4): 239-243, 2009.
14. Chaoui I., et al. "Analysis of Isoniazid, Streptomycin and Ethambutol resistance in Mycobacterium tuberculosis isolates from Morocco", *J Infect Dev Ctries* ; 3 (4): 278-284, 2009.
15. Seghrouchni F., et al. "Design of immunogenic peptides from Mycobacterium Tuberculosis genes expressed during macrophage infection", *Tuberculosis*, 89 (3), 210-217, 2009.
16. Baassi L., et al. "Evaluation of a multi-antigen test based on B-cell epitope peptides for the serodiagnosis of pulmonary tuberculosis", *Int. J. Tuberc. Lung Dis.* 13 (7): 848-854, 2009.

17. Seghrouchni F., et al. "In silico Selected Peptide Antigens from Mycobacterium tuberculosis: New Perspectives for Diagnosis and Vaccine Development", *Research & Reviews in BioSciences*, 2 (1), 1-16, 2008.
18. Sabouni R., et al. "Molecular analysis of multidrug resistant Mycobacterium tuberculosis isolates from Morocco", *Annals of Microbiology*, 58 (4) : 749-754, 2008.

Les cinq premiers articles sont directement liés aux travaux de recherche du projet soutenu par l'Académie Hassan II de Sciences et Techniques. Les articles de 6 à 18 sont en rapport avec les travaux de recherche reliés à la thématique générale du projet IMMGEN.

#### **B. Conférences plénières et communications dans des congrès internationaux**

1. Karima Sahmoudi, et al. "Functional and phenotypic characterization of Mycobacterium tuberculosis specific CD4+ T cells in peripheral blood and at the site of infection", *The 15<sup>th</sup> International Congress of Immunology*, Milan 22-27 August 2013.
2. Rajae El Aouad, et al. «Moroccan TB Cohort and potential for Moroccan Tuberculosis research», *Scientific Workshop on "Tuberculosis biomarkers: from research to action"*, Marrakech, 4-5 octobre 2012.
3. Khalid Sadki, et al. «Immunogenetic of susceptibility to tuberculosis in Moroccan patients», *Scientific Workshop on "Tuberculosis biomarkers : from research to action"*, Marrakech, 4-5 octobre 2012.
4. Fouad Seghrouchni, et al. "T cells immune response profile in peripheral blood and autologue site of infection within patients with active tuberculosis", *Scientific Workshop on "Tuberculosis biomarkers : from research to action"*, Marrakech, 4-5 octobre 2012.
5. Ouafae Lahlou, et al. "Molecular epidemiology preliminary results of TB isolates related to Moroccan TB Cohort", *Scientific Workshop on "Tuberculosis biomarkers : from research to action"*, Marrakech, 4-5 octobre 2012.
6. Fouad Seghrouchni, et al. "Biomarkers for clinical forms of tuberculosis; Collaborative Study in Morocco", *33<sup>rd</sup> Annual Congress of the European Society of Mycobacteriology*, Brasov, Romania, 01-04 juillet 2012.
7. Fouad Seghrouchni, et al. "Involvement and induction of CD4+CD25 high regulatory T cells in sites of infection and autologue peripheral blood during active tuberculosis", *5<sup>eme</sup> Journées de la Société Marocaine d'Immunologie* 6-8 octobre 2012.
8. Fouad Seghrouchni, et al. «Memory and multifunctional T cells profiles in latent and active tuberculosis infection», *4<sup>eme</sup> Journées de la Société Marocaine d'Immunologie* 6-7 décembre 2012 (Prix de la meilleure communication).
9. Naima Arji, et al. «Influence des polymorphismes de l'interleukine 12 et de la chimiokine (MCP-1) (Monocyte Chemoattractant Protein-1) sur le risque de tuberculose pulmonaire au Maroc», *Troisième Colloque International de Biotechnologies Microbiennes*, 15-17 mars 2012 à Tanger.
10. Naima Arji, et al. «Influence potentielle des polymorphismes du gène codant pour «l'inducible nitric oxide synthase» sur la susceptibilité/ résistance à la tuberculose pulmonaire au Maroc», *Troisième Colloque International de Biotechnologies Microbiennes*, 15-17 mars 2012 à Tanger.
11. Fathiah Zakhm, et al. «The insertion sequence IS6110 as a potential tool for the detection of Mycobacterium tuberculosis in the critical cases of the Moroccan population», *The 7<sup>th</sup> European congress of Tropical Medicine and International Health*, Barcelona, Spain, 3- 6<sup>th</sup> October. 2011.
12. Fouad Seghrouchni, et al. "Design of immunogenic multiepitopic Mycobacterium tuberculosis peptides from genes selected using in vitro models of mycobacterial macrophage infection", *29<sup>th</sup> Annual Congress of the European Society of Mycobacteriology*; Plovdiv, Bulgaria: July 6-9, 2008; Communication N°: OP-34.
13. Fouad Seghrouchni, et al. "Design of Immunogenic Peptides from M. tuberculosis Genes Expressed During Macrophage Infection", *5<sup>th</sup> Congress of Scientific Research Outlook in the Arab World -Scientific Innovation and Sustained Development*; Fez 26-30 Octobre, 2008.
14. Fouad Seghrouchni, et al. "Design of immunogenic multiepitopic mycobacterium tuberculosis peptides from genes selected using in vitro models of mycobacterial macrophage infection", *Conference on Immunodiagnosis of Tuberculosis: New Questions, New Tools*; 21-23 Septembre 2008 Virginia Beach, Virginia, USA.
15. Baassi L, et al. "The use of B-cell epitope synthetic peptides derived from Mycobacterium tuberculosis proteins for immunodiagnosis of tuberculosis", *Conference on Immunodiagnosis of Tuberculosis: New Questions, New Tools*; 21-23 Septembre 2008 Virginia Beach, Virginia, USA.

### C. Organisation d'une conférence internationale

Dans le cadre du projet de «Building a cooperative strategy between Europe and Mediterranean Countries for upgrading tuberculosis research and control» conclu entre l'équipe du projet IMMGEN et un Consortium Euroméditerranéen de 7 partenaires (EUMEDNETvsTB) sous le 7<sup>ème</sup> programme cadre (FP7) et, conformément au plan d'action de la 4<sup>ème</sup> année du projet IMMGEN, une conférence internationale sur l'immunité de la tuberculose intitulée «Tuberculosis biomarkers : from research to action» a été organisée à Marrakech le 4 et 5 octobre 2012.

Ce workshop a été l'occasion de faire le point et de partager les connaissances sur la place des biomarqueurs dans l'amélioration du diagnostic de la tuberculose maladie sous ses différentes formes et la tuberculose latente mais surtout leur apport dans l'évaluation de l'efficacité thérapeutique, et des nouveaux vaccins en cours d'essai clinique dans la tuberculose. Il a été également l'occasion de présenter les connaissances et les pratiques à travers les exemples de la cohorte marocaine et de la cohorte ougandaise.

### D. Encadrement de travaux de fin d'études (Master) et de thèses de doctorat

Quatre mémoires de Masters ont été soutenus dans le cadre du projet IMMGEN : i) Imane Asekkaj (Etude du polymorphisme du gène NSMAF chez des patients marocains atteints de la tuberculose pulmonaire), ii) Amal Bennouna (Impact de l'infection tuberculeuse sur les fonctions des phagocytes chez les patients marocains atteints de tuberculose active), iii) Rajaâ Belkouch (Impact de l'infection tuberculeuse sur les fonctions des cellules NK chez les patients marocains atteints de tuberculose active), iv) Youssef Amar (Etude du polymorphisme du gène Cyp7A1 dans une population marocaine atteinte de la tuberculose) à la faculté des sciences, Université Mohammed V-Agdal de Rabat.

Parmi les thèses de doctorat encadrées dans le cadre du projet IMMGEN (sept), deux thèses ont été soutenues : i) Fatiha Zakhm (Molecular diagnosis and multidrug resistance detection of Mycobacterium Tuberculosis in clinical specimens and computational genome/phylogeny analysis of tuberculosis and non tuberculosis Mycobacteria) et ii) Naima Arji (Recherche des facteurs de prédisposition génétique à l'infection par Mycobacterium Tuberculosis au Maroc) à la faculté des sciences, Université Mohammed V-Agdal de Rabat. Cinq autres thèses de doctorat sont en cours de finalisation par Mounia Qrafi, Karima Sahmoudi, Nada Bouklata, Hoda Lamsayah et Pacifique Ndishimye.

### E. Renforcement de l'infrastructure de recherche au sein de la structure

#### **Mise à niveau des équipements de laboratoire :**

Le projet IMMGEN combiné à l'appui du projet de «EUMEDNETvsTB» et au soutien de la direction de l'INH, qui a abrité le projet, a permis de mettre à niveau le plateau technique de l'unité d'immunologie cellulaire et de compléter certains équipements de l'unité de génomique humaine et du laboratoire national de référence de la tuberculose, leur permettant de réaliser les travaux de recherche dans les axes inhérents.

#### **Formations, stages, visites d'études et visites d'experts réalisés et financés dans le cadre du projet IMMGEN**

1) **Des formations en éthique médicale, en management de projets de recherche et en «Grant writing» ont été organisées et bénéficiés aux différents partenaires.**

#### 2) **Stages des étudiants**

- a) Arji Naima: Unité UMRS 940 de l'INSERM à l'Hôpital Saint-Louis, Paris.
- b) Karima Sahmoudi: Division of Infectious Diseases, TB Research Unit, CWRU.
- c) Pacifique Ndishimye : Laboratoire d'immunologie et pathologie, département de biologie, Université Tor Vergata de Rome.

#### 3) **Visites d'études.**

Le professeur Rajae El Aouad, coordonnateur du projet IMMGEN a réalisé des visites d'études aux Etats-Unis d'Amérique: i) «Emerging Pathogens Institute» de l'Université de Floride (Gainesville), ii) «Divisions of Clinical Pharmacology and Infectious Diseases, Center for Tuberculosis Research» de l'Université John Hopkins (Baltimore), iii) le groupe de recherche tuberculose du «National Institute of Allergy and Infectious Diseases» (NIAID) du NIH (Bethesda) et iv) «Tuberculosis Research Department» de la «Harvard School of Public Health» (Boston), v) «Tuberculosis Research Unit (TBRU)», Case Western University (Cleveland).

Le docteur Fouad Seghrouchni, investigateur principal de l'axe immunologie a effectué deux visites d'études: i) «Tuberculosis Research Unit» de l'Université de Cleveland (TBRU) et ii) laboratoire d'immunologie et pathologie à l'Université Tor Vergata de Roma.

#### **4) Visites d'experts**

Les équipes des 3 axes de recherche ont pu bénéficier des échanges et des conférences ou des ateliers techniques animés par Le docteur Kelly Dooley de l'Université John Hopkins, Le docteur Henry Boom, directeur de «Tuberculosis Research Unit (TBRU)» de l'Université de Cleveland, Le docteur Philippe Supply de l'Institut Pasteur de Lille et Le docteur Carla Montesano du laboratoire d'immunologie et pathologie à l'Université Tor Vergata.

#### **Ouverture à l'international et poursuite de la recherche**

Il va sans dire que le projet IMMGEN soutenu par l'Académie a permis au coordonnateur et à l'équipe porteuse du projet IMMGEN de renforcer les collaborations nationales et internationales et de se positionner en tant que partenaire à part entière dans le projet EUMEDNETvsTB. Il s'agit notamment de la collaboration avec :

1. La faculté des sciences, Université Mohammed V-Agdal, Rabat ;
2. La faculté des sciences et techniques, Université Hassan II-Mohammedia ;
3. Le Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN) ;
4. L'Hôpital Moulay Youssef, CHU Rabat ;
5. L'Université Johns Hopkins ;
6. Le laboratoire des Mycobactéries de l'Institut Pasteur de Guadeloupe ;
7. La «Tuberculosis Research Unit» de l'Université de Cleveland ;
8. Le laboratoire d'histocompatibilité de l'Hôpital Saint Louis à Paris ;
9. L'Université de Floride/Emerging Pathogens Institute ;
10. Le consortium euro-méditerranéen EUMEDNETvsTB dans le cadre du FP7.

#### **Collaboration avec le Consortium Euro-méditerranéen dans le cadre du FP7**

Le projet IMMGEN a permis à l'équipe de recherche de l'INH d'intégrer un projet européen dans le cadre du 7<sup>ème</sup> programme cadre International Co-operation – REGPOT-2009-2 du FP7.

Le projet intitulé «Building a cooperative strategy between Europe and Mediterranean Countries for upgrading tuberculosis research and control» sous

l'acronyme EUMEDNETvsTB, correspond à une coopération multi-institutionnelle (Sud Européenne et Nord Africaine) et associe 7 équipes dont celle du projet IMMGEN (INH).

Malheureusement, en raison de la limitation des capacités d'accueil des stagiaires ou encore des problèmes de mise à disposition des fonds, l'équipe IMMGEN de l'INH n'a pas pu bénéficier de l'ensemble des opportunités de formation et de transfert de technologie offertes par ce programme.

#### **Conclusion**

Depuis plusieurs années, le coordonnateur du projet IMMGEN et son équipe se sont engagés dans la recherche sur l'immunogénétique de la tuberculose étant donné son importance santé publique au Maroc et le peu d'intérêt accordé à cette pathologie par la communauté scientifique internationale.

Depuis l'émergence du SIDA dans les années 90 et la réapparition de la tuberculose souvent sous des formes résistantes dans plusieurs pays, on a assisté à un regain d'intérêt pour cette pathologie qui devient menaçante.

Le projet «Etude immunologique et immunogénétique de la tuberculose dans la population marocaine» (IMMGEN), soutenu par l'Académie, a permis la constitution du premier consortium marocain autour d'une problématique d'importance santé publique entre des institutions de recherche et des structures de santé avec la constitution d'une cohorte de patients tuberculeux et de contrôle conforme aux normes internationales en matière de recherche.

Le renforcement de l'infrastructure de recherche à travers la mise à niveau des équipements de laboratoires, les stages de formation et le transfert technologique conséquent ont permis la réalisation locale de travaux de recherche. Ces travaux ont abouti à des publications et des communications d'un très bon niveau scientifique donnant de la visibilité à l'équipe de recherche marocaine à l'échelle internationale. Des étudiants en Master et des doctorants ont également été encadrés à travers ce projet.

Ce projet a également permis à l'équipe marocaine de s'ouvrir sur des collaborations internationales, en Europe et aux Etats-Unis d'Amérique autour de la Cohorte IMMGEN, qui se poursuivront grâce au levier que le soutien apporté par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a pu édifier.





## Perspectives



## Conduire le développement durable Rôle de la science, de la technologie et de l'innovation

Déclaration Commune des Académies du G-Science-2013 (New Delhi, 7-9 mars 2013)

### 1. Introduction

Les Objectifs du millénaire pour le développement (ODM) ont donné lieu à de nombreux débats et discussions au cours desquels ont été passés en revue les progrès déjà accomplis pour assurer un développement durable à travers le monde, et préparées les stratégies à mettre en oeuvre pour la période post 2015. Lors de la Conférence des Nations Unies Rio+20 de juin 2012, consacrée au développement durable, les gouvernements se sont mis d'accord pour élaborer une série d'objectifs de développement durable : les discussions ont alors abordé le rôle des sciences, des technologies et de l'innovation, ainsi que la question des droits de la propriété intellectuelle<sup>1</sup>. Récemment, l'ICSU (International Council for Science) et le département des affaires économiques et sociales des Nations Unies (UN-DESA) ont réuni un groupe d'experts au siège des Nations Unies<sup>2</sup>. En juin 2012, l'IAP (InterAcademic Panel, réseau mondial des académies des sciences) a publié une déclaration ayant pour thème Population et Consommation. Enfin, plusieurs académies et sociétés savantes, dont la National Academy of Sciences américaine<sup>3</sup>, ont publié des rapports sur les enjeux du développement. D'autres rapports pertinents existent<sup>4</sup>.

Les académies des sciences ont pour mission de fournir aux décideurs de leur pays des données pertinentes pour l'aide à la décision, notamment en matière de développement. Ces huit dernières années, un groupe d'académies a transmis de courtes déclarations communes aux gouvernements réunis lors de sommets annuels consacrés à différents enjeux mondiaux. Certains d'entre eux, comme l'énergie, le changement climatique, l'eau, la santé et les maladies infectieuses ou la résilience face aux désastres, concernaient le développement durable. Cette année, c'est l'Académie nationale des sciences d'Inde qui a accueilli les académies pour poursuivre le processus. De nombreux progrès scientifiques et technologiques ont été accomplis au cours des huit dernières années, y compris en matière de technologies de l'information et de la communication et de techniques d'extraction des ressources naturelles. Cependant, les défis auxquels le monde doit faire face restent majeurs, et se sont même accrus de façon importante, notamment en ce qui concerne l'augmentation constante de la population mondiale, les modifications du climat observées et l'impact qui en résulte sur l'écosystème. Répondre aux besoins essentiels de l'humanité, aujourd'hui comme demain, reste ainsi un enjeu majeur. Le travail est engagé, au sein de la

communauté mondiale, pour fixer les Objectifs de développement durable pour les années à venir. Voici nos perspectives concernant le rôle que peuvent jouer les sciences, les technologies et l'innovation dans le pilotage du développement durable.

### 2. Une population mondiale qui augmente sans cesse

Les changements démographiques interviennent rapidement et de manière globale. Même s'il est possible d'atteindre un niveau de population semi-stationnaire à la fin du siècle, les projections indiquent que la population mondiale s'élèvera à près de 9 milliards d'individus en 2050, sur la base d'un chiffre actuel d'environ 7 milliards. Certaines stratégies destinées à ralentir le taux de croissance de la population – éducation, autonomisation des femmes, accès au planning familial –, ont donné des résultats positifs par le passé; utilisées de façon cohérente, elles permettent d'espérer que le taux de croissance de la population continue à diminuer au cours des prochaines décennies. Le défi reste colossal : au cours des quatre prochaines décennies, il faudra répondre aux besoins de près de 1,6 milliard d'habitants de plus sur Terre, dont environ 1 milliard pour le seul continent africain.

Aujourd'hui, cependant, la priorité est de sortir environ 1,3 milliard de personnes de l'extrême pauvreté : l'immensité des besoins encore insatisfaits d'une partie de l'humanité représente une menace non seulement pour la cohésion sociale, mais aussi pour la pérennité de différents systèmes vivants de notre planète.

#### 2.1. Les défis en termes de changement démographique

La composition démographique de bien des régions les moins développées révèle une forte proportion de jeunes, ce qui demande d'importants investissements afin d'éliminer l'illettrisme, améliorer l'éducation à tous les niveaux et créer de l'offre d'emploi. D'un autre côté, les progrès réalisés en termes de qualité des soins, d'amélioration de la nutrition et de l'adoption de modes de vie plus sains ont entraîné dans de nombreux autres pays un taux de survie plus élevé et donc une augmentation de l'âge moyen des populations concernées. Le bien être et la contribution sociale d'un nombre croissant de personnes âgées exigent une attention spéciale ainsi que des innovations, si nous voulons pouvoir proposer des soins qui leur soient adaptés et offrir à tous un rôle dans la société.

## 2.2. Les défis en termes d'urbanisation

Certaines villes à travers le monde ont le potentiel pour répondre efficacement aux besoins exprimés par les citoyens. Dans le même temps, les taux d'urbanisation sans précédent enregistrés dans les pays en développement imposent des contraintes importantes en termes de mise à disposition de logements convenables, de gestion des ressources comme l'eau ou l'énergie et de fourniture de services essentiels tels que les installations sanitaires, le transport, l'offre de soins ou la gestion des déchets. Des efforts sont également requis pour préserver les écosystèmes lors de l'urbanisation. La question revêt un caractère d'urgence dans la mesure où on estime qu'il y aura environ 70% de citadins à l'horizon 2050, contre environ 50% aujourd'hui. Si nous voulons assurer une gestion efficace de ressources devenues rares et obtenir des améliorations dans d'autres secteurs, tels que l'hygiène publique, il faudra investir dans la recherche, développer de nouvelles approches innovatrices et adopter de nouveaux comportements.

## 3. Répondre aux besoins de neuf milliards d'individus

La disponibilité de l'eau est un enjeu central pour l'agriculture, l'industrie et la production d'énergie, mais aussi pour la consommation humaine et la préservation des écosystèmes essentiels. Étant donné la raréfaction actuelle et attendue de l'eau, et les contraintes qui en découleront, de nouvelles façons d'accroître la disponibilité d'eau potable doivent être mises en œuvre. L'amélioration du traitement de l'eau et de la gestion des systèmes, ainsi que de nouvelles technologies pour le recyclage d'eau et le dessalement de l'eau de mer, sans oublier d'autres solutions non technologiques, doivent être explorées. De telles approches requièrent l'attention et l'intervention des gouvernements du monde entier.

La nutrition est l'un des besoins les plus basiques de l'homme. L'effort en termes de production de nourriture et d'élimination de la malnutrition et de la faim doit suivre l'augmentation démographique, la modification constante de l'occupation des sols et les effets attendus du changement climatique. Cela peut nécessiter de consacrer davantage de terres à la production de nourriture et, certainement, d'améliorer la gestion des ressources en eau. Il conviendra de développer de nouvelles ressources génétiques, ainsi que d'autres stratégies non technologiques, afin de faire face aux défis d'un changement climatique qui modifiera les cycles des cultures et leurs rendements. De nouvelles stratégies sont désormais nécessaires pour assurer un équilibre, respectueux de l'environnement, entre l'utilisation d'engrais de synthèse et de pesticides et l'utilisation d'équivalents plus naturels. En parallèle, une attention devra être portée à la

préservation de la biodiversité et au fonctionnement des écosystèmes. L'accroissement de la sécurité des aliments dépend en partie d'une stabilisation du prix des aliments sur les marchés internationaux. Les schémas de consommation et de production alimentaires nécessitent la définition de nouvelles perspectives en termes de science, de technologie et d'innovation afin de promouvoir la santé publique et réduire les pertes après récolte et les gâchis.

## 4. Fournir l'énergie demandée sans impact inacceptable sur l'environnement

Certains facteurs essentiels au bien-être des hommes nécessitent le recours à des services énergétiques. En même temps, la combustion de carburants fossiles s'inscrit désormais dans un certain nombre de contraintes environnementales et sanitaires, puisqu'elle constitue le moteur principal des changements climatiques et de ses effets, notamment l'augmentation du niveau de la mer, la survenue d'événements climatiques extrêmes et l'acidification des océans. De nombreuses études ont montré que les mesures d'économie d'énergie et d'accroissement de l'efficacité énergétique sont indispensables, à bénéfices multiples et peu coûteuses à mettre en œuvre. Par ailleurs, la mise à disposition de ressources énergétiques propres et renouvelables sera nécessaire pour répondre à des besoins et des situations variés à travers le monde. Des approches systémiques, concernant le stockage de l'énergie, les réseaux intelligents, la conversion énergétique des déchets et la biomasse et, dans certains cas, la capture et la séquestration du CO<sub>2</sub>, seront également nécessaires. Toutes requièrent des progrès en science, en technologie et en innovation.

## 5. Une consommation durable

L'aspiration à une meilleure qualité de vie est universelle. Pour autant, obtenir cette amélioration pour tous nécessite le recours à un niveau de ressources tel qu'il pourrait mettre en péril l'avenir des générations futures. Les consommations de matières premières varient considérablement entre régions du monde; si nous voulons sortir 1,3 milliard de personnes de la pauvreté, les pays les plus développés et les pays émergents devront stabiliser, puis réduire, leur consommation de matières premières, par : des améliorations drastiques de l'efficacité de leur utilisation, y compris via une réduction des gâchis et la mise en œuvre de nouveaux procédés de recyclage; l'investissement dans des ressources, des technologies et des infrastructures durables. Il est nécessaire de rechercher un découplage systématique entre les activités à but économique et les enjeux environnementaux. Une consommation et une production responsables et solidaires sont les éléments clés de la durabilité.

## 6. Vers un socle de connaissances universelles, y compris dans les domaines scientifiques

L'alphabétisation universelle, incluant notamment les femmes, est reconnue comme essentielle dans l'objectif d'un développement durable et équitable. Mais il conviendra d'étendre cette alphabétisation à la culture scientifique, dans la mesure où de nombreux défis auxquels nous faisons face demandent des solutions scientifiques ou technologiques. Par exemple, le fardeau des maladies non transmissibles liées au comportement (régime alimentaire, manque d'exercice, abus de substances, etc.) est en train d'augmenter rapidement, et l'Evidence-Based Education constitue un outil crucial pour pouvoir aborder de tels enjeux. Des programmes éducatifs innovateurs et créatifs sont en cours dans de nombreux pays, avec l'objectif d'améliorer encore les méthodes d'apprentissage et d'équiper les enseignants des ressources et de la formation nécessaires.

L'enseignement scientifique fondé sur le questionnement est une approche prometteuse, sur laquelle des académies du monde entier travaillent afin d'améliorer les systèmes éducatifs, dans bien des cas avec le soutien du secteur privé. Les coopérations Sud-Sud et Nord-Sud, visant à partager et améliorer les approches éducatives, sont indispensables si nous voulons subvenir aux besoins des pays les moins développés en termes d'éducation.

## 7. Rôle des académies des sciences

Si les progrès en matière de science, de technologie et d'innovation sont nécessaires au développement durable, ils ne sont pas suffisants pour affronter d'autres obstacles sous-jacents, tels qu'une mauvaise gouvernance à tous les niveaux, local comme mondial, des systèmes éducatifs inadaptés et des carences en matière de développement rural (accès aux routes, financements, éducation, autonomie des femmes). La poursuite du progrès exige aussi une réforme du commerce et une transition du concept de PIB au concept de PIB+, où l'on mesure la croissance économique en termes de capital construit, naturel, humain, social et financier. Sans une bonne gouvernance et un système économique plus durable, les gains potentiels des progrès scientifiques et technologiques réalisés ne pourront être engrangés. Les Académies estiment que leur propre promotion des valeurs apportées par les sciences, notamment l'approche fondée sur la preuve, l'ouverture d'esprit, les normes éthiques et la responsabilisation sociale peut contribuer à cette bonne gouvernance. Elles prennent acte du contexte où coexistent aujourd'hui sciences et technologies et se déclarent déterminées à soutenir les décisions politiques en faveur du développement durable, notamment en :

- i. Mettant à la disposition de tous une expertise indépendante et objective, faisant preuve de rigueur dans la collecte des données scientifiques portant sur ce qui est connu, comme sur ce qui ne l'est pas encore, et soutenant, à terme, le progrès vers le développement durable ;
  - ii. Encourager les collaborations entre académies afin de les rendre plus visibles et augmenter leurs capacités à s'engager de manière proactive dans les politiques publiques de développement aux niveaux national, régional et international ;
  - iii. Soutenir les processus destinés à définir, mesurer et surveiller les progrès obtenus en termes d'objectifs de développement durable aux niveaux national, régional et international ;
  - iv. Mener des actions d'aide à la prédiction et à l'information des politiques sur d'éventuels effets néfastes des pratiques et processus de développement ;
  - v. Soutenir le recrutement et la formation de ressources humaines en matière de science, de technologie et d'innovation une action qui devra intervenir dès les enseignements primaire et secondaire, et appellera des investissements dans l'enseignement supérieur afin d'aider à bâtir une capacité d'accueil scientifique permettant de répondre aux défis locaux ;
  - vi. Promouvoir une recherche multidisciplinaire en faveur d'une approche holistique du développement durable, y compris en concluant des conventions avec le secteur privé ;
  - vii. Améliorer la prise de conscience du public quant au rôle de la science, de la technologie et de l'innovation en faveur du développement durable; et
  - viii. Promouvoir la mobilité Sud-Sud et Nord-Sud des chercheurs.
1. Réunion de la UN System Task Team on the Post-2015 UN Development Agenda, mai 2012.
  2. Réunion du groupe d'experts ICSU-Nations Unies pour débattre d'un cadre permettant des objectifs de développement durable et d'élaborer des données scientifiques à l'intention des Nations Unies, mars 2013.
  3. A Sustainability Challenge: Food Security for All: Report of Two Workshops, 2012; Using Science as Evidence in Public Policy, Kenneth Prewitt, Thomas A. Schwandt, and Miron L. Straf, Editors, 2012.
  4. Par exemple, le briefing paper destiné aux membres du UN High Level Panel, préparé par l'UK Collaboration on Development Science, The role of science and evidence in designing post 2015 development goals.

Déclaration co-signée par les académies des sciences (par ordre alphabétique) d'Allemagne, de l'Afrique, de l'Afrique du Sud, du Canada, des États-Unis, de la France, de l'Inde, de l'Italie, du Japon, de la Malaisie, du Mexique, du Népal, du Royaume Uni et de la Russie.





## **Activités de l'Académie**



## Nomination de nouveaux membres

Lors de la séance plénière solennelle, Mr. le Secrétaire perpétuel de l'Académie a pris la parole pour présenter les nouvelles nominations à la dignité d'académiciens à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, qui ont été agréées par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu L'assiste et ce, après examen par le conseil d'Académie, conformément aux dispositions du Dahir portant loi instituant l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Ainsi ont été nommés en qualité de membres associés, les professeurs :

- Yves Coppens, titulaire de la chaire de paléontologie et préhistoire au Collège de France, membre du Haut Conseil de la Science et de la Technologie (France), membre de l'Académie des Sciences de l'Institut de France;
- Ahmadou Lamine NDIAYE, agrégé et Docteur de l'enseignement vétérinaire, Recteur honoraire de l'université Gaston Berger (Saint-Louis du Sénégal), Président de l'Académie des Sciences et Techniques du Sénégal, Président de l'Académie Africaine des Sciences,

en qualité de membres résidents, les professeurs :

- Ali Boukhari, nommé en 2006, par SM le Roi, membre correspondant, Doyen de la Faculté des Sciences de Kenitra;
- Mahfoud Ziad, nommé en 2006, par SM le Roi, membre correspondant, ancien Vice Doyen de la Faculté des Sciences de Rabat.

en qualité de membres correspondants, les professeurs et messieurs :

- Abdeljabbar El Manira, professeur au département de nanoscience à l'Institut de Karolinska (Suède);
- El Maati Ouhabaz, professeur de mathématiques à l'Université de Bordeaux;
- Abdelghani Bellouquid, professeur de mathématiques à l'Université Cadi Ayyad (ENSA de Safi);
- Abdelkrim Filali Maltouf, professeur de microbiologie et biologie moléculaire à l'Université Mohamed V Agdal;
- Abdallah Mokssit, Ingénieur Ecole Supérieure d'Electricité de Paris, Ingénieur Civil Météorologie, Directeur de la Météorologie Nationale (depuis 2009);
- Mohamed Smani, Docteur d'Etat en Sciences physiques, lauréat de l'Ecole Nationale supérieure de géologie de Nancy (France), Directeur de R&D Maroc.

Après cette présentation, les nouveaux membres ont pris la parole respectivement pour présenter leurs remerciements et leur gratitude à Sa Majesté le Roi Mohammed VI – que Dieu L'assiste – pour Sa Haute Sollicitude et les encouragements dont Il entoure l'ensemble de la communauté scientifique du Maroc.

## Renouvellement des instances de l'Académie

Après le déjeuner et suite à la réunion des collèges scientifiques, chaque directeur a passé en revue le bilan des activités de l'année 2012, le plan d'action 2013 et les résultats de l'élection du directeur et du co-directeur suivants :

- **Collège des Sciences et Techniques du Vivant**
  - Directeur : Mr Albert Sasson (reconduit)
  - Co-directeur : Mme Rajae El Aouad (reconduite)
- **Collège des Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer**
  - Directeur : Mr Ahmed El Hassani (reconduit)
  - Co-directeur : Mr Driss Ouazar (reconduit)
- **Collège des Sciences Physiques et Chimiques**
  - Directeur : Mr Mostapha Bousmina (élu)
  - Co-directeur : Mr Abdelillah Benyoussef (élu)
- **Collège des Sciences de la Modélisation et de l'Information**
  - Directeur : Mr Abdelhak El Jai (élu)
  - Co-directeur : Mr Abdelmalek Azizi (reconduit)
- **Collège de l'Ingénierie du Transfert et de l'Innovation Technologiques**
  - Directeur : Mr Mahfoud Ziad (reconduit)
  - Co-directeur : Mr Ali Boukhari (reconduit)
- **Collège des Etudes Stratégiques et du Développement Economique**
  - Directeur : Mr Rachid Ben Mokhtar (reconduit)
  - Co-directeur : Mr Mohammed Berriane (reconduit)

La parole a ensuite été donnée au Secrétaire perpétuel qui a fait lecture de l'élection des membres du Conseil d'Académie et des membres de la Commission des travaux :

Membres du Conseil d'Académie :

- Mr Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel
- Mr Mostapha Bousmina, Chancelier
- Mr Ahmed El Hassani
- Mr Abdelhak El Jai
- Mr Albert Sasson

Membres de la Commission des travaux :

- Mr Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel
- Mr Mostapha Bousmina, Chancelier
- Mr Mohamed Ait Kadi
- Mr Ali Boukhari
- Mr Taïeb Chkili
- Mr Nouredine El Aoufi
- Mr Driss Ouazar
- Mr Youssef Ouknine
- Mr Philippe Tanguy

## Coopération avec l'Académie des Sciences de Malaisie

Dans le cadre des relations de coopération entre l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et l'Académie des Sciences de Malaisie, le Professeur Tijani Bounahmidi, membre du Collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique a représenté l'Académie au workshop sur les «énergies renouvelables», organisé du 14 au 18 janvier 2013 à Kuala Lumpur. Le workshop a comporté une journée de conférences et table ronde suivie de visites d'organismes en relation avec les thématiques traitées.

Plusieurs communications relatant l'état du développement des énergies renouvelables en Malaisie et au Maroc ont été présentées dont la contribution du Professeur T. Bounahmidi portant sur les «Plans marocains des énergies renouvelables». La table ronde a traité des expériences et stratégies actuelles et futures pour des énergies renouvelables réussies basées sur les leçons tirées de l'expérience marocaine et Malaisiennes, ainsi que du potentiel de collaboration entre les deux académies dans le domaine des énergies renouvelables.



Lors de ce workshop, le professeur Bounahmidi a visité les organismes suivants : Fuel Cell Institute et Solar Energy Research Institute de l'Université Kebangsaan, le siège de la Commission de l'Energie de Malaisie dans la ville de Putraya (ville administrative) conçu selon les normes écologiques, et l'usine de fabrication de panneaux solaires photovoltaïques de la société américaine «First Solar».

## Installation de l'Académie des Sciences, des Arts et des Lettres du Bénin

A l'occasion de l'installation de l'Académie Nationale des Sciences, des Arts et des Lettres du Bénin (ANSALAB) et sur invitation du Professeur Eusebe ALIHONOU, son Président, le professeur Mostapha BOUSMINA, Chancelier de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, a participé à la cérémonie organisée pour la circonstance à Cotonou, le 12 avril 2013, sous la présidence effective de Son Excellence Thomas Boni Yayi, Président de la République du Bénin. Le professeur Bousmina a prononcé à l'occasion une allocution

d'encouragement, de souhait de succès et de félicitations de voir se renforcer et se développer en Afrique les espaces dédiés à la promotion du savoir et de la recherche scientifique. Il a aussi exprimé la volonté de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques à tisser des liens de collaboration scientifiques avec les académies africaines et particulièrement avec la nouvelle ANSALAB.



Le Pr. Bousmina prononçant son allocution.

Par la même occasion, le professeur Tijani Bounahmidi, membre du collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique, a représenté l'Académie Hassan II à l'atelier international «Situation énergétique au Bénin : état des lieux et perspectives», organisé les 10 et 11 avril, en prélude à la Rentrée solennelle de l'ANSALAB.

Cet atelier, dont la séance d'ouverture a été présidée par le ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, Monsieur François ABIOLA, a vu la présentation de la brochure de l'ASADI (Initiative de développement des Académies des Sciences d'Afrique) intitulée «Accès à l'énergie en Afrique au Sud du Sahara», par Abdoulaye SAMB, vice-président de l'Académie Nationale des Sciences et Techniques du Sénégal, qui a relaté l'accessibilité très réduite à l'énergie dans les pays subsahariens (5% en moyenne), ainsi que l'expérience de quatre pays africains en matière d'accès à l'énergie : le Maroc, le Sénégal, l'Ethiopie et le Bénin; l'expérience marocaine ayant été présentée par le Professeur Bounahmidi.

Une réunion des représentants des académies africaines des sciences avec l'Académie des Sciences de France et le Groupe Inter Académique (GID) pour le développement a eu lieu au cours de cet atelier, à l'issue de laquelle il a été proposé d'organiser durant l'année prochaine au Bénin, dans le cadre du GID, le 1<sup>er</sup> Forum Africain des Sciences et Technologies pour le Développement (FAST-DEV).



### Coopération Maroc - Espagne

L'Académie Hassan II des Sciences et techniques a accueilli le 05 juin 2013 un atelier scientifique organisé conjointement par le ministère des affaires étrangères et de la coopération et le ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche scientifique et de la formation des cadres, avec la participation et le soutien du CNRST, de l'IRESSEN, de l'Université MohammedV-Agdal et de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Cet atelier a permis aux groupes de travail espagnols et marocains constitués de se pencher sur les programmes de coopération scientifique et technique dans les quatre domaines prioritaires identifiés par les deux gouvernements lors de la réunion de la commission mixte de haut niveau du 03 octobre 2012 à Rabat, à savoir les domaines de l'énergie solaire, des ressources marines, de l'environnement et espaces boisés et des biotechnologies agroalimentaires.

Madame Carmen Vela Olmo, secrétaire d'Etat espagnole à la recherche, au développement et à l'innovation, venue spécialement à l'occasion, a participé durant deux jours successifs à la présentation des résultats de cet atelier aux différents départements ministériels concernés : (Agriculture et pêche maritime - Energie, mines, eau et environnement - Enseignement supérieur, recherche scientifique et formation des cadres) ainsi qu'au Haut-commissariat aux eaux et forêts et à la lutte contre la désertification.

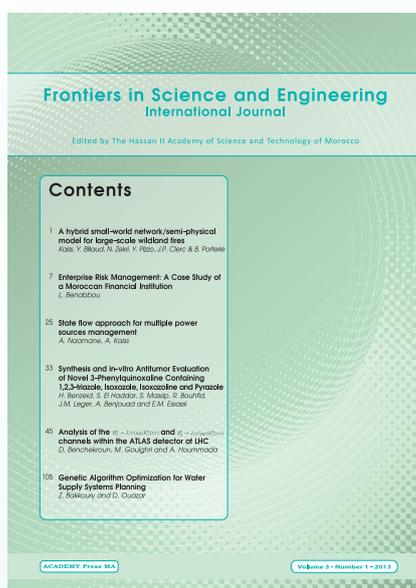
Madame la secrétaire d'Etat espagnole a par ailleurs effectué une visite de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques au cours de laquelle elle s'est entretenue avec le Professeur Omar Fassi-fehri, secrétaire perpétuel.



Les 2 groupes de travail à la fin de l'atelier organisé à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

## Publications de l'Académie

### Parution du volume 3 du journal «Frontiers in Science and Engineering»



#### Contents :

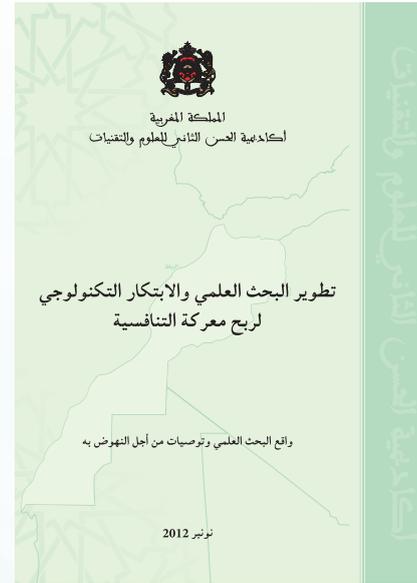
- 1 **A hybrid small-world network/semi-physical model for large-scale wildland fires**  
*Kaiss, Y., Billaud, N., Zekri, Y., Pizzo, J.P., Clerc & B. Porterie*
- 7 **Enterprise Risk Management: A Case Study of a Moroccan Financial Institution**  
*L. Benabbou*
- 25 **State flow approach for multiple power sources management**  
*A. Naamane, A. Kaiss*
- 33 **Synthesis and in-vitro Antitumor Evaluation of Novel 3-Phenylquinoxaline Containing 1,2,3-triazole, Isoxazole, Isoxazoline and Pyrazole**  
*H. Benzaid, S. El Haddar, S. Massip, R. Bouhfid, J.M. Leger, A. Benjouad and E.M. Essassi*
- 45 **Analysis of the  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\mu\mu)K_s^0(\pi\pi)$  and  $B_d^0 \rightarrow J/\psi(\mu\mu)K_s^0(\pi\pi)$  channels within the ATLAS detector at LHC**  
*D. Bencheikroun, M. Goughri and A. Hoummada*
- 105 **Genetic Algorithm Optimization for Water Supply Systems Planning**  
*Z. Bakkoury and D. Ouazar*

### Rapport de l'Académie Hassan II sur l'état de la recherche au Maroc «Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité - Un état des lieux et des recommandations clés»

En vue de contribuer à la définition de la politique nationale de la recherche scientifique et technique et à l'évaluation des programmes mis en œuvre, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a élaboré et édité en mai 2009 un rapport intitulé «Pour une relance de la recherche scientifique et technique au service du développement du Maroc». Dans ce document, elle avait illustré par plusieurs exemples précis, la pertinence de la recherche scientifique pour le développement et l'avenir du Maroc. Elle avait en particulier noté les progrès incontestables accomplis, mais aussi les faiblesses et surtout une évolution préoccupante depuis 2003-2004. En effet, le texte du rapport, accompagné des données statistiques les plus récentes, alertait les autorités nationales compétentes sur l'urgence de la prise de mesures visant à relancer la recherche scientifique nationale. Le document proposait une série de mesures concrètes et de recommandations tout à fait réalisables; et cela pour donner un nouveau souffle au système de recherche scientifique et technique du Maroc et le mettre résolument au service du développement en définissant une stratégie à l'horizon 2020. Trois ans plus tard, un nouveau rapport intitulé «Développer la recherche scientifique et l'innovation pour gagner la bataille de la compétitivité - Un état des lieux et des recommandations clés» s'interroge sur l'avenir de la recherche nationale, sur la nature des politiques sous-jacentes à son développement.

L'analyse présentée a pour but de contribuer à l'évaluation du système national de recherche avec pour principal objet de susciter les réorientations et réajustements nécessaires. Ce rapport rassure aussi, car malgré la stagnation relative de la recherche nationale et les obstacles à son développement, il met en relief les acquis indéniables et les îlots de grande qualité sur lesquels on peut bâtir l'avenir. Il préconise des choix pour valoriser, au mieux des intérêts de la collectivité nationale, ce potentiel développé à grands frais par le pays. Ce rapport propose enfin des mesures avec réalisme et objectivité; et cela afin de créer les conditions d'une relance de la recherche et de la valorisation de ses résultats. La relance de la recherche nationale nécessite une approche holistique. C'est aussi une œuvre de longue haleine. C'est pourquoi l'Académie propose une série de mesures qui pourront mettre durablement la recherche nationale dans le sens du progrès. Les travaux réalisés pour l'élaboration de ce rapport sont présentés de façon synthétique dans les trois parties suivantes et concernent : les forces et faiblesses du système actuel de recherche; les nouveaux enjeux de la recherche scientifique au Maroc et les défis à relever; les recommandations proposées pour assurer sa relance.

Nous présentons ci-après le sommaire des deux versions (arabe et française) de cette publication.



<b>Introduction</b> .....	9	مقدمة	9
<b>Chapitre I. Etat des lieux : quelques succès à consolider et de nombreuses faiblesses à corriger</b> .....	13	<b>الباب I. واقع البحث العلمي : تعزيز مواطن القوة وتصحيح مواطن الضعف</b> .....	13
A. Le personnel de la recherche-développement.....	14	أ. الموارد البشرية في قطاع البحث العلمي.....	14
B. Ressources financières consacrées à la recherche scientifique.....	27	ب. الموارد المالية المخصصة للبحث العلمي.....	28
C. Production scientifique.....	32	ج. الإنتاج العلمي.....	33
D. Développement technologique.....	39	د. التنمية التكنولوجية.....	40
<b>Chapitre II. Pour une relance de la recherche scientifique et technique au Maroc: défis et opportunités</b> .....	45	<b>الباب II. من أجل نفس جديد للبحث العلمي والتقني في المغرب :</b>	47
A. Les défis.....	45	التحديات والفرص.....	47
B. Plans de développement sectoriel.....	47	أ. التحديات.....	47
<b>Chapitre III. Les trois axes clés de la relance de la recherche scientifique et technique</b> .....	51	ب. المخططات التنموية القطاعية: دور البحث العلمي والابتكار التكنولوجي في إنجاحها.....	49
<b>Axe clé 1</b>		<b>الباب III. ثلاثة مفاتيح لإقلاع جديد للبحث العلمي والتقني في المغرب</b> .....	53
Formation et mobilisation des cadres et des compétences.....	52	المحور - المفتاح الأول	
A. Mesures d'extrême urgence.....	52	تكوين وتعبئة الأطر والكفاءات.....	54
B. Réforme profonde du statut des enseignants chercheurs.....	53	أ. تدابير ذات طابع استعجالي.....	54
C. Intégration de la recherche marocaine dans le contexte mondial.....	55	ب. إصلاح شامل للنظام الأساسي للأساتذة الباحثين..	55
<b>Axe clé 2</b>		ج. إدماج البحث العلمي المغربي في السياق العالمي.....	56
Effectivité du système national de recherche (SNR).....	56	المحور - المفتاح الثاني	
<b>Axe clé 3</b>		تنشيط المنظومة الوطنية للبحث وتقوية فعاليتها.....	58
Enseignement des sciences et diffusion de la culture scientifique.....	62	المحور - المفتاح الثالث	
<b>Conclusion</b> .....	65	تعزيز تدريس العلوم ونشر الثقافة العلمية والاهتمام باللغات الأجنبية.....	64
<b>Annexes</b> .....	69	خاتمة.....	69
		ملحقات.....	73





## **Nouvelles des Académiciens**



## Le Secrétaire Perpétuel participe à un séminaire consacré à «La Recherche scientifique au service du développement régional»

S'exprimant lors d'un séminaire organisé par l'Université privée de Marrakech (UPM), placé sous le thème «*La recherche scientifique au service du développement régional*», le Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Omar Fassi Fihri, a relevé que «*la recherche scientifique et l'innovation sont à la base de tout développement social et humain*», tout en soulignant que «*le développement, la richesse et l'essor économique vont de pair avec le développement de la recherche scientifique*». «*Pour réussir la pleine intégration dans l'économie du savoir, il est primordial de disposer d'un système de formation performant*», a-t-il ajouté, notant que le Maroc a consenti de grands efforts dans le domaine de la recherche scientifique, même si les résultats ne sont pas encore à la hauteur des ambitions, faisant référence à la mise en place d'un système national de recherche scientifique ainsi que d'instances institutionnelles compétentes en la matière.

Le séminaire a été l'occasion pour les orateurs de souligner que dans le contexte de la politique de régionalisation avancée, pour laquelle le Maroc a opté, le développement de la recherche scientifique n'est plus un choix, mais une nécessité incontournable. En outre, l'ancrage du Maroc dans la mondialisation passe nécessairement par l'évolution de son système universitaire censé être la locomotive du développement régional, ont-ils ajouté. Pour ce faire, le Maroc doit développer la recherche scientifique et en faire un levier pour la qualification des ressources humaines dans le but de répondre aux besoins régionaux du développement, ont relevé les intervenants. (d'après MAP, 20 avril 2013).

## Le professeur Daoud AIT KADI Lauréat du Prix Brockhouse du Canada pour la recherche interdisciplinaire en sciences et en génie

Le Prix Brockhouse du Canada pour la recherche interdisciplinaire en sciences et en génie vise à reconnaître les réalisations d'excellentes équipes de chercheurs canadiens provenant de différentes disciplines, qui ont uni leur expertise et leurs efforts pour apporter une contribution importante dans les domaines des sciences naturelles ou du génie au cours des six dernières années.

L'équipe du consortium FORAC a reçu, le 27 février 2013, ce très prestigieux lors d'une cérémonie qui a eu lieu à la résidence du gouverneur général du Canada à Rideau Hall, Ottawa. L'Université Laval est la première université québécoise à recevoir ce prix honorable octroyé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), depuis sa création, en 2004.



Le Pr Daoud Ait Kadi félicité par Son Excellence le Gouverneur Général du Canada.

[http://www.nserc-crsng.gc.ca/Prizes-Prix/Brockhouse-Brockhouse/Index-Index\\_fra.asp](http://www.nserc-crsng.gc.ca/Prizes-Prix/Brockhouse-Brockhouse/Index-Index_fra.asp)

## Le professeur Albert SASSON fait Commandeur de l'Ordre du Mérite civil espagnol

Le professeur Albert Sasson, membre de l'Académie Hassan II des sciences et techniques, a reçu, mardi 02 avril à Rabat, des mains de l'ambassadeur d'Espagne au Royaume, Alberto Navarro, la croix de Commandeur de l'Ordre du Mérite civil espagnol.

Cette distinction, décernée pour l'ensemble de son œuvre, symbolise pour lui «*Un point d'arrivée car je m'efforce depuis l'indépendance de notre pays, à améliorer et renforcer la coopération entre le Maroc et l'Espagne dans les domaines des droits de l'Homme, des sciences et de la technologie, en raison de l'amitié, du voisinage et de l'histoire commune qui lient nos deux pays*», a souligné le scientifique marocain.

M. Navarro a tenu, dans une déclaration similaire, à saluer le parcours singulier d'Albert Sasson, qui a fait de lui un homme œuvrant pour le rapprochement des communautés scientifiques des deux pays. Il a souligné les différentes étapes de la carrière de Sasson, à la fois en tant que scientifique au Maroc mais également au sein de l'UNESCO, qui l'ont conduit à en occuper le poste de sous-directeur général, formant le vœu de le voir continuer son œuvre pour une meilleure coopération entre les deux pays, notamment à travers sa présidence de l'association BioEurolatina.



Le Professeur A. Sasson lors de la cérémonie organisée en son honneur.

## Missions au Japon et en Afrique du Sud du professeur Driss OUAZAR

Le professeur Driss Ouazar, membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, a séjourné au Japon du 13 au 19 Juin 2013 pour animer plusieurs conférences et discuter des projets de recherche, notamment la modélisation numérique des risques naturels (inondations et tsunamis).



Le Pr. D. Ouazar dans le bureau du Président de Tsukuba University

Par ailleurs le Pr. Driss Ouazar a été l'invité, du 25 au 30 Juin 2013, de l'African Institute for Mathematical Science (AIMS Next Einstein Initiative, South Africa) Global Alumni Reunion. Son programme, outre l'animation de quelques conférences, a notamment concerné la possibilité d'installation au Maroc d'un institut type AIMS et des possibilités de collaboration en matière de recherche.

## Renouvellement du mandat du professeur Mohammed BESRI au sein du Comité technique sur les alternatives au Bromure de Méthyle

Le professeur Mohammed Besri, membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, a été nommé, pour la troisième fois consécutive et pour une nouvelle période de 4 ans, Vice-Président du Comité technique sur les alternatives au Bromure de Méthyle (Methyl Bromide Technical Option committee MBTOC) ([http://ozone.unep.org/new\\_site/en/list\\_of\\_members.php?body\\_id=6&committee\\_id=6](http://ozone.unep.org/new_site/en/list_of_members.php?body_id=6&committee_id=6)).



Membres du TEAP

(Technology and Economic Assessment Panel).

Deuxième rang, et deuxième à partir de la droite : Pr Mario MOLINA, prix Nobel de chimie (1995) qui a formulé pour la première fois, avec le Pr Sherwood ROWLAND, la théorie de l'appauvrissement de la couche d'ozone sous l'impact des ChloroFluoroCarbones (CFC) et divers autres gaz.



## **Actualités scientifiques**



## Global Innovation Index 2013

### Maroc : performance mondiale en matière de marques mais très grande faiblesse en matière de relation université-entreprise

Le 2 octobre 2013, en collaboration avec l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI), l'Office Marocain de la Propriété Industrielle et Commerciale et R&D Maroc, ont organisé une conférence nationale sur les outils de mesure de l'innovation à travers notamment le Global Innovation Index (GII), édition 2013. Cette conférence a été tenue à Casablanca, en présence du Ministre de l'Industrie, du Commerce et des Nouvelles Technologies et de nombreuses personnalités du monde socio-économique, académique et des responsables des administrations en charge de la gestion de la recherche-développement et de l'innovation.

Lors de cet événement, les résultats de l'édition 2013 du Global Innovation Index (GII) sur le thème «la dynamique locale pour favoriser l'innovation dans un territoire», ont été présentés par deux auteurs du rapport dans le cadre :

- D'un séminaire d'une journée destinée à une soixantaine de représentants des institutions publiques ou privées présents, concernés par chacun des 84 indicateurs étudiés par le GI.
- D'une conférence en fin de journée à laquelle ont pris part de nombreuses personnalités du monde économique, académique, les représentants des administrations, les membres de R&D Maroc et les lauréats de la 8<sup>ème</sup> édition du concours national de l'innovation, de la recherche développement et de la technologie et les représentants de la presse nationale.

Le GI met l'accent sur l'importance des infrastructures, des moyens et des relations entre universités, entreprises et institutions. Présenté comme «la source de référence internationale en matière d'innovation pour les décideurs publics et privés ainsi que les chercheurs», le GI est, certes, un classement parmi tant d'autres, mais qui a en plus le mérite de fournir des pistes de réflexion et d'amélioration intéressantes.

Le Global Innovation Index est réalisé par la Johnson Cornell University, l'Institut Européen d'Administration des Affaires (INSEAD) et par l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI), appuyés par un comité consultatif composé d'éminents experts internationaux. Le GI se compose de deux sous index, les "inputs" et les "outputs" de

l'innovation eux mêmes construits autour de 7 piliers et de 84 indicateurs. L'édition 2013 a traité un total de 142 pays pour lesquels un profil de synthèse est produit avec une mention particulière aux points forts et faibles de chaque pays.

Ainsi et grâce à ses 84 indicateurs, l'indice mondial de l'innovation (GI) apporte une appréciation sur les capacités d'innovation et sur les résultats acquis par chacun des pays évalués.

En 2013, le classement du Maroc dans l'indice mondial de l'innovation (GI), a régressé de la 88<sup>ème</sup> place en 2012 à la 92<sup>ème</sup> place.

Son classement au niveau de la région MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord) le place à la 14<sup>ème</sup> place sur les 19 pays concernés, l'Algérie, la Tunisie, Les Emirats Arabes Unis se classent respectivement à la 138<sup>ème</sup>, la 70<sup>ème</sup> et la 38<sup>ème</sup>. Relevons que le Sénégal arrive à la 96<sup>ème</sup> place. En tête de liste on trouve les champions : la Suisse (1<sup>er</sup>), la Suède (2<sup>ème</sup>) le Royaume-Uni (3<sup>ème</sup>), la Hollande (4<sup>ème</sup>), les Etats-Unis (5<sup>ème</sup>), Finlande (6<sup>ème</sup>), la France (20<sup>ème</sup>) et la Chine (35<sup>ème</sup>).

Le GI met également l'accent sur les points forts et les points faibles de chaque pays.

Ainsi, le Maroc tient une place honorable en matière de dépenses dans l'éducation, le nombre de diplômés en sciences et ingénierie, les infrastructures globales, le crédit au secteur privé, la croissance du PIB par personne, et occupe la 5<sup>ème</sup> position dans le monde en matière de création et de dépôts de marques nationales par habitant et par PIB.

En termes de dépôts de brevets d'invention à l'échelle nationale par habitant, le Royaume arrive à la 69<sup>ème</sup> position.

Du côté des indicateurs les moins performants, le GI relève notamment la faiblesse du taux d'encadrement (6,8% seulement des salariés sont des managers, ingénieurs ou techniciens).

Les universités marocaines se classent à la 68<sup>ème</sup> position (QS University ranking), à la 73<sup>ème</sup> position en terme de recherche-développement et à la 113<sup>ème</sup> en terme de collaboration université/industrie dans le domaine de la recherche.

Le marché de l'innovation reste très faible, le Maroc occupant la 135<sup>ème</sup> place.

Pour améliorer la place du Maroc selon cet indice, un séminaire s'est tenu en marge de cette conférence, destiné aux principaux acteurs concernés par les indicateurs de l'Indice Mondial de l'Innovation en vue d'élaborer des mesures concrètes pour l'amélioration de l'écosystème de l'innovation au Maroc et par voie de conséquence, la place du Maroc en matière d'innovation.

Dans le même sens, un «Focus Groupe», piloté par R&D Maroc et l'OMPIC a été constitué par les principaux acteurs concernés par le «Global Innovation Index» pour le suivi des recommandations émises lors de cette manifestation. Une première réunion de ce groupe s'est tenue le 3 octobre 2013 au siège de l'OMPIC pour définir une feuille de route pour l'analyse des indicateurs forts et faibles concernant le Maroc à la lumière des résultats de cet indice.



Présentation des résultats de l'édition 2013 du Global Innovation Index



