

Royaume du Maroc
Académie Hassan II des Sciences et Techniques



ACTES
DE LA SESSION PLÉNIÈRE
Année 2007

Rabat 21-23 février 2007



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

*«Notre souhait est que notre Académie puisse contribuer
à faire de la société marocaine une société productive,
ouverte sur les sciences et les technologies de l'heure...»*

*Extrait du Discours Royal prononcé par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu L'assiste,
le 18 mai 2006 à Agadir à l'occasion de l'installation
de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques*

Royaume du Maroc
Académie Hassan II des Sciences et Techniques



Conférences
données dans le cadre des journées
Les jeunes et la science

29 novembre - 6 décembre 2006

© Académie Hassan II des Sciences et Techniques, Rabat
225, Avenue Mohamed Belhassan Ouazzani
Quartier Ambassador-Souissi
Rabat, Royaume du Maroc

Dépôt légal : 2007 / 2256
ISBN : 9954-8780-1-7

Réalisation : AGRI-BYS S.A.R.L. (A.U)

Achevé d'imprimer : août 2007
Imprimerie Lawne : 11, rue Dakar, Océan, Rabat, Maroc

Sommaire

Avant-propos	5
Les dinosaures, grandeur et décadence (conférence inaugurale) Pr Philippe Taquet	7
Nanomatériaux et nanotechnologies: au-delà de la science fiction Pr Mostapha Bousmina	27
La Recherche face au défi de l'avenir des écosystèmes marins, de la pêche et de l'aquaculture Pr Patrice Cayré	35
La science arabe au cours de l'histoire Pr Ahmed Djebbar	49
Les risques naturels au Maroc : connaissances et perspectives Pr Bouchta El Fellah	75
La physique aujourd'hui : objet, énigmes et défis Pr Omar Fassi-Fehri	85
Une machine peut-elle être intelligente ? Pr Malik Ghallab	95
Pourquoi sommes-nous inégaux face aux maladies infectieuses ? Pr Claude Griscelli	117
Origine et Destin de l'Univers Pr Jean-Pierre Luminet	121
Les sciences du vivant : d'un siècle à l'autre Pr Albert Sasson	135
Energie : l'horizon 2025 Pr Philippe A. Tanguy	139

AVANT-PROPOS

Le 18 mai 2006 Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le glorifie, procédait à Agadir à l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, qui a ensuite poursuivi ses travaux les 18 et 19 mai 2006 à Rabat. Les 21, 22 et 23 février derniers, elle tenait sa session annuelle solennelle 2007 à Rabat sur quatre thèmes :

- Modélisation et mathématiques appliquées,
- La question de l'énergie aujourd'hui : défis scientifiques et techniques,
- Biotechnologies,
- Changements climatiques et problèmes d'environnement.

Au cours de cette session, elle a pu également discuter le rapport d'activité présenté par le Secrétaire Perpétuel ainsi que les plans d'actions de chacun de ses Collèges scientifiques.

Ce sont les actes de l'ensemble des travaux de cette session que nous mettons aujourd'hui à la disposition des lecteurs; ces actes regroupent les conférences et communications présentées à cette occasion, dont nous avons pu obtenir les textes ou des présentations sous forme de diapositives; au prix d'un effort particulier nous mettons également à la disposition du public le compte rendu complet des discussions qui ont eu lieu, en ce qui concerne aussi bien les débats scientifiques que les questions organisationnelles propres à l'Académie.

Les travaux de la session 2007 et la publication de leurs actes contribuent, pensons-nous, à l'une des missions premières de l'Académie en matière de promotion de la recherche scientifique et technique au Maroc, au service du développement du pays, et s'inscrivent tout à fait dans le cadre de l'objectif, fixé par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI que Dieu Le garde, dans son discours d'installation de notre Académie, concernant *«l'importance du rôle que doivent jouer les 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»*.

Le Secrétaire Perpétuel

Rabat, juillet 2007



SÉANCE D'OUVERTURE

Mot du Directeur des séances M. Rachid BENMOKHTAR BENABDELLAH



En ouvrant cette session plénière de 2007 de notre Compagnie, je voudrais avant de passer la parole à Monsieur le Secrétaire Perpétuel, vous souhaiter, à toutes et à tous, la bienvenue et nous souhaiter à tous de très bonnes sessions de travail. Je voudrais tout simplement vous donner quelques informations :

Le programme est entre vos mains, il se déroule sur trois jours et je vous rappelle que la séance de clôture aura lieu le vendredi après-midi entre 16h30 et 17h.

Hier nous nous sommes réunis en session ordinaire, et nous avons pu examiner les travaux réalisés par les différents collèges. La synthèse de ces travaux vous sera présentée par le Secrétaire Perpétuel après la pause. Je voudrais aussi vous dire qu'hier les discussions ont porté sur ces travaux et sur les projets de recherche qui ont été proposés par les différents collèges et en même temps nous avons discuté de manière très précise sur l'amélioration des procédures et la manière de préparer les appels d'offres pour les projets à appuyer à l'avenir.

Voilà ce que, de mon côté, j'ai voulu vous donner comme information. Je voudrais souhaiter à tous et à toutes un excellent séjour parmi nous pour ceux qui viennent de l'étranger et puis à nous souhaiter encore une fois une très bonne session productive. Sans plus tarder, je voudrais passer la parole à Monsieur le Secrétaire Perpétuel qui va faire le discours d'ouverture; la parole est à lui.



Allocution du Professeur Omar FASSI-FEHRI

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



**Excellences,
Mesdames et Messieurs les académiciens,
Mesdames et Messieurs,**

C'est un réel plaisir et une grande joie de se retrouver de nouveau, à l'occasion de l'ouverture de la session plénière solennelle de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques de l'année 2007, dans l'enceinte de l'Académie du Royaume du Maroc, à l'intérieur de cette splendide salle qui symbolise le génie de l'artisan marocain et atteste de l'authenticité de l'architecture marocaine et sous sa magnifique coupole qui a vu la tenue de notre session inaugurale et de multiples rencontres scientifiques nationales ou internationales.

Nous nous remémorons encore avec une grande émotion, l'événement marquant qui reste à jamais gravé dans nos mémoires, celui de l'installation solennelle de l'Académie par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI -que Dieu Le Garde-, et du Discours Royal prononcé à cette occasion, le jeudi 18 mai 2006, au Palais Royal d'Agadir.

Dans Son Discours, Sa Majesté le Roi avait rappelé l'engagement du Royaume du Maroc en faveur de l'acquisition du savoir et Son souhait de voir la recherche scientifique, le développement technologique et l'innovation contribuer à améliorer les conditions de vie des citoyens marocains, et les membres de l'Académie Hassan II des sciences et techniques "contribuer à faire de la société marocaine une société productive, ouverte sur les sciences et les technologies de l'heure, convaincue des valeurs de dialogue entre les cultures".

La solennité avec laquelle il a été procédé à l'installation de notre jeune Académie, la sollicitude royale qui a entouré sa mise en place, Son soutien et Sa bienveillance, traduisent la volonté de Sa Majesté le Roi Mohammed VI -que Dieu Le garde- de voir notre Académie s'acquitter de sa mission et poursuivre les objectifs qui lui sont assignés. Qu'il

me soit permis de nouveau au nom de l'ensemble des académiciens de présenter à Sa Majesté le Roi l'expression de notre profonde reconnaissance et de notre déférente gratitude, en priant le Tout puissant de nous aider à être dignes de la confiance Royale et de Sa bienveillance.

Excellences, Mesdames, Messieurs,

Il y a exactement neuf mois, nous décidions à l'issue des travaux de la session inaugurale, le 19 mai 2006, de tenir notre session plénière 2007 à la fin du mois de février; nous nous retrouvons donc aujourd'hui comme convenu. A cette occasion, je voudrais présenter mes sincères remerciements, à tous les membres de l'Académie présents à cette deuxième session solennelle et particulièrement à ceux d'entre eux, venus de l'étranger qui nous honorent de leur présence. Je remercie également les éminentes personnalités scientifiques qui ont accepté notre invitation et vont présenter des conférences ou des communications scientifiques au cours de cette session.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnalités qui ont bien voulu accepter notre invitation et assister à l'ouverture de cette session plénière solennelle.

Excellences, Mesdames et Messieurs,

Au cours de la session inaugurale, l'Académie a pu constituer ses différents organes directeurs tels que prévus par la loi.

Depuis, le Conseil d'Académie a pu mettre en œuvre le règlement intérieur de l'Académie, examiner son budget pour l'année 2007 et préparer le projet de statut du personnel des services de l'Académie aujourd'hui mis en application, après avoir été soumis à la Haute Appréciation de Sa Majesté, comme le stipule la loi. Le Conseil d'Académie a procédé également à l'examen du plan d'action pluriannuel des six collèges scientifiques, notamment les projets susceptibles de recevoir un appui financier pour les années 2007-2009.

La Commission des travaux s'est de son côté attachée à coordonner les activités des collèges, examiner la question des publications de l'Académie (annuaire, journal scientifique, bulletin d'information, actes de sessions,...), réfléchir à la création d'un site électronique dédié aux activités de l'Académie (en 4 langues arabe, anglais, espagnol, français), et bien entendu préparer la session plénière (du février 2007) en établissant son programme après avoir arrêté les thèmes de la session et les différents intervenants.

Les collèges scientifiques ont pu de leur côté ouvrir une réflexion sur les domaines prioritaires, définir un programme d'action et sélectionner les premiers projets de recherche à proposer pour un appui de l'Académie.

Excellences, Mesdames et Messieurs,

A côté des missions de l'Académie Hassan II des sciences et techniques, visant à contribuer à la réflexion sur la politique nationale de la recherche scientifique, à la définition de ses orientations générales et à son financement et son évaluation, il y a aussi celle de porter

un intérêt particulier aux actions de diffusion de la culture scientifique et de réflexion sur les questions d'éducation et de formation dans les disciplines scientifiques.

C'est pourquoi, et dans le cadre d'une action commune avec le Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur, de la formation des cadres et de la recherche scientifique, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, a décidé que sa première activité publique, après son installation, soit dédiée aux jeunes, dans le but de les sensibiliser et les encourager à s'intéresser au développement des sciences et de la technologie, les amener à s'impliquer dans la politique scientifique nationale, et les intéresser à l'enseignement de la science et à la diffusion de la culture scientifique, en organisant sous le Haut Patronage de Sa Majesté le Roi, des journées sur le thème "les jeunes et la science au service de développement". Une telle manifestation s'est déroulée du 29 novembre au 6 décembre 2006 dans les villes de Rabat, Casablanca, Kénitra, Mohammadia, Salé et Temara, et a vu la participation de plus de 14000 jeunes élèves et étudiants; une telle initiative est la première en son genre dans notre pays; on espère qu'elle deviendra un rendez-vous régulier et annuel, avec une généralisation progressive à toutes les régions du Maroc.

Sur un autre plan, l'Académie, depuis son installation, n'a pas manqué de participer à quelques activités internationales. Elle était en particulier présente aux travaux de l'assemblée générale de l'Inter Academy Panel (IAP), tenue à Alexandrie en novembre 2006.

Elle a également reçu la visite d'un certain nombre de délégations et responsables étrangers, parmi lesquels en particulier Madame Claudia A. Mc Murray, Sous Secrétaire d'Etat américaine pour les Océans, l'Environnement et la Science.

Excellences, Mesdames et Messieurs,

Cette deuxième session plénière solennelle se veut être une tribune scientifique permettant à des académiciens mais aussi à d'éminentes personnalités scientifiques de l'extérieur et de l'intérieur du Royaume, de présenter des conférences ou des communications scientifiques se rapportant aux thèmes déterminés par la Commission des travaux pour cette session, thèmes choisis en tenant compte de leur pertinence et de leur importance quant aux questions de développement humain.

La première séance sera consacrée au thème "modélisation et mathématiques appliquées". La modélisation permet d'analyser les phénomènes réels les plus variés et de faire des prévisions sur toute sorte de questions relatives à la vie, l'économie, la société, les finances. Les modélisations de ces phénomènes utilisent les mathématiques appliquées pour mieux les comprendre et pour faire des prévisions quant à leur évolution.

Le second thème sera consacré à "la question de l'énergie: défis scientifiques et techniques". Aujourd'hui, les perspectives énergétiques renvoient à des enjeux particulièrement importants :

- la sécurité et l'indépendance énergétique;
- l'épuisement progressif des réserves fossiles;
- les risque du réchauffement climatique qui pourrait avoir des conséquences dramatiques sur la planète.

Toutes ces questions vont faire l'objet d'un débat avant d'examiner les enjeux scientifiques et techniques pour trouver les solutions permettant d'éviter les scénarios inquiétants qui s'annoncent.

Le troisième thème traitera des "biotechnologies"; l'essor de cette discipline est dû aux progrès réalisés dans la connaissance de la structure du génome des êtres vivants ainsi que des promesses et défis ouverts par ces avancées. Les exemples des récentes découvertes en génomique et en biologie moléculaire et des opportunités qu'elles peuvent engendrer pour améliorer les conditions de vie des populations, font de la biotechnologie le fer de lance dans les plans de développement scientifique, technologique et socio-économique d'un grand nombre de pays y compris des pays en voie de développement.

Le quatrième et dernier thème abordera la problématique des "changements climatiques et problèmes de l'environnement". C'est un thème d'actualité, tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre prévoient une augmentation des concentrations du dioxyde de carbone, et une élévation de la température moyenne à la surface de la terre ainsi qu'une hausse du niveau de la mer au cours du 21^{ème} siècle. Cependant, malgré ce scénario catastrophe, un certain nombre de phénomènes régulateurs du climat échappent encore à la compréhension des scientifiques. Ces questions seront examinées et débattues au cours de cette session.

Ce sont là, les thèmes retenus pour les travaux de notre session, durant laquelle nous aurons l'occasion d'écouter quatre conférences et vingt-trois communications scientifiques.

Excellences, Mesdames et Messieurs,

Je voudrais, au terme de cette allocution, présenter, en mon nom et au nom de l'ensemble des académiciens, à Sa Majesté le Roi -que Dieu L'assiste-, nos déférents vœux de bonheur et de réussite dans l'accomplissement des nobles desseins qu'Il nourrit à l'endroit de Son peuple et de Son pays. Puisse Dieu Lui prêter longue vie et Le combler en la personne de Son Altesse Royale le Prince Héritier Moulay Hassan, de Son Altesse Royale le Prince Moulay Rachid et de l'ensemble de la Famille Royale.

Merci pour votre attention.

**Rapport sur les activités de l'Académie
au cours de l'année écoulée 2006
présenté par le Secrétaire Perpétuel**



Installation solennelle de l'Académie et Session inaugurale 18 et 19 mai 2006

- *Installation : jeudi 18 mai 2006 matin, par **Sa Majesté Le Roi Mohammed VI**
-que Dieu L'assiste-;*
 - *Travaux de la session : 18-19 mai à Rabat
(Académie du Royaume)*
-

1

Résultats de la session

- *Election de M.Rachid Benmokhtar
Benabdellah Directeur des séances.*
 - *Constitution des organes directeurs de
l'Académie : Conseil d'Académie,
Commission des travaux, constitution
des collèges scientifiques, élection des
directeurs et codirecteurs des collèges.*
 - *Présentation de 8 communications
scientifiques:*
-

2

-
- **Instabilité à la surface du globe terrestre**
Pr. Jean-Michel Dercourt
 - **Impact de la biologie et des cellules souches sur la médecine du 21^{ème} siècle**
Pr. Carlos Martinez Alonso
 - **Les Biotechnologies : progrès, promesses et défis**
Pr. Albert Sasson
 - **Nanomaterials, nanotechnology and Nanoscience: Facts, Challenges and Opportunities for Morocco**
Pr. Mostapha Bousmina
-

3

-
- **Défis et espoirs humanistes pour les sciences et les technologies**
Pr. Malik Ghallab
 - **Les défis énergétiques au XXI^{ème} siècle : un bref aperçu**
Pr. Philippe Tanguy
 - **Savoir et enjeux de l'eau**
Pr. Mohammed Aït Kadi
 - **Roadmap to successful research entreprise in biomedicine and biotechnology**
Pr. Abdelali Haoudi
-

4

Activités

Mai 2006 – Février 2007

5

Rappel des principales activités menées
par l'Académie et ses instances durant
la période mai 2006 - février 2007

6

« Les jeunes et la science »

- Organisation des journées «les jeunes et la science» sous le Haut Patronage de Sa Majesté le Roi Mohammed VI et en collaboration avec le Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur, de la Formation des Cadres et de la Recherche Scientifique.

7

Bilan des journées «les jeunes et la science»

- 21 conférences publiques;
- 12 expositions scientifiques dont 5 interactives;
- 20 rencontres entre personnalités scientifiques et jeunes élèves des lycées et collèges de Casablanca, Mohammedia, Rabat, Temara et Kénitra.

8

Bilan (suite)

- 5 ateliers (manipulations d'expériences scientifiques par les élèves)
- 15 visites guidées dans les établissements scientifiques pour les élèves
- 9 films scientifiques projetés;
- Plus de 14 000 jeunes élèves des lycées et collèges ont participé à ces journées.

9

Bilan (suite)

- 5 ateliers (expériences scientifiques de démonstration)
- 15 visites guidées dans des établissements scientifiques organisés pour les élèves
- 9 films scientifiques projetés;
- Plus de 14 000 jeunes élèves des lycées et collèges ont participé à ces journées.

9

Thèmes de la session 2007

- ❑ «Modélisation et mathématiques appliquées»;
- ❑ «La question de l'énergie aujourd'hui : défis scientifiques et techniques»;
- ❑ «Biotechnologies»;
- ❑ «Changements climatiques et problèmes d'environnement».

11

Le Conseil d'Académie a traité les questions suivantes :

- Mise en œuvre du règlement intérieur de l'Académie;
- Préparation et adoption du statut du personnel des services de l'Académie, validé par Sa Majesté le Roi (31 janvier 2007);
- Examen du budget de l'Académie pour l'année 2007.

12

La Commission des travaux a examiné les points suivants :

- Publications de l'Académie : annuaire (Benyoussef), journal scientifique (Ouazar), bulletin d'information (Aït Kadi M.), actes de sessions,...;
 - Conception du site internet de l'Académie (en 4 langues : arabe, anglais, espagnol, français);
 - Encouragement à l'édition d'ouvrages scientifiques;
-

13

La Commission des travaux a examiné les points suivants (suite) :

- Organisation de la bibliothèque de l'Académie;
 - Archives scientifiques;
 - Soutien aux manifestations scientifiques.
-

14

Manifestations scientifiques soutenues par l'Académie

- La recherche au service du développement; (Université Hassan II, Casablanca, décembre 2006);
- Nano-sciences et nanotechnologie (Université Al Akhawayne, avril 2007);
- Les systèmes dynamiques et systèmes complexes (Université Chouaïb Doukkali, El Jadida, décembre 2006)

15

Manifestations scientifiques soutenues par l'Académie (suite) :

- Ecole de mathématiques sur «modèles aléatoires en finances mathématiques» organisée en collaboration avec le CIMPA (Centre International des Mathématiques Pures et Appliquées) – Université cadi Ayyad, Marrakech avril 2007;
- Efficience des procédures de production des compétences entre employabilité et cohésion socioculturelle (ENSET-Rabat, avril 2006);
- Les compétences pédagogiques : exigences et perspectives de l'enseignement supérieur au Maroc (Ass. Inter. Péda. Univ., Rabat).

16

Activités des Collèges scientifiques

Ils ont tenu plusieurs réunions pour débattre en particulier des points suivants :

- Présentation d'exposés scientifiques;
- Détermination des domaines prioritaires;
- Définition d'un plan d'action;
- Sélection de projets de recherche à soutenir pour 2007-2009.

17

Critères de Sélection des projets de recherche à soutenir

Dégagés à partir des documents remis à la session inaugurale :

1- Synthèse des propositions, en particulier celles concernant les types de soutien, que l'on rappelle :

- Actions stratégiques : promouvoir et favoriser l'émergence
 - d'unités de recherche sur programmes scientifiques pertinents et de regroupements autour de programmes mobilisateurs
 - d'équipes communes recherche-industrie
 - de plates-formes (équipements structurants partagés)

18

Critères de Sélection (Suite)

- Projets avec des objectifs et des livrables pertinents
 - sur appels à propositions
 - sur propositions spontanées
- Réseaux et groupements de recherche
 - consolidation
 - émergence
- Animation et mobilité ciblées

19

Critères de Sélection (Suite)

2- *Modalités de soutien et de promotion de la recherche scientifique et technique*

3- *Critères d'évaluation :*

- excellence scientifique de l'équipe et des chercheurs associés*
- originalité du projet*
- clarté des objectifs en particulier scientifiques avec obligation de publication dans des revues internationales*
- méthodologie*
- échancier*
- évaluation rigoureuse du budget*
- retombées pour le Maroc*

20

Propositions des collèges

21

Collège Etudes Stratégiques et Développement Economique

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
1- Modélisation et prospective économique 2- Croissance économique et développement humain 3- Politique sectorielle, innovation, R&D 4- Développement territorial 5- Ressources naturelles, ressources humaines 6- Institutions et gouvernance économique 7- Enjeux de la mondialisation	1-Création de l'école marocaine de sciences économiques 2-Appui aux jeunes chercheurs (création de prix – octroi de bourses même pour l'étranger, édition des meilleurs travaux) 3-Organisation d'un cycle de conférences

22

Collège des Sciences de la Modélisation et de l'Information

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>1-Mathématiques financières : Finance stochastique, la couverture des options et la gestion du risque.</p> <p>2-Cryptographie : Algèbre, géométrie, théorie des nombres et leurs applications en cryptographie.</p> <p>3-Théorie des systèmes : Modélisation, automatique, analyse numérique, optimisation et contrôle optimal.</p>	<p>1-Organisation d'une Ecole CIMPA (Centre International de Mathématiques Pures et Appliquées) sur modèles aléatoires en finances mathématiques (7-22 avril 2007) avec l'Université Cadi Ayyad et le CIMPA.</p> <p>2-Organisation de cours au profit des praticiens de la finance.</p> <p>3-Organisation de séminaires à l'échelle nationale et internationale.</p>

23

Collège des Sciences de la Modélisation et de l'Information (suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>4-Systèmes embarqués ou enfouis: (Thèmes)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Traitement automatique de la langue arabe • Télécommunications, systèmes et réseaux embarqués • Génie logiciel et systèmes d'information en temps réel • Traitement de l'information multimédia et Applications • Architecture et processeurs 	<p>4-Constitution d'un réseau national de chercheurs travaillant dans le domaine de la cryptographie.</p> <p>5-Création d'un réseau travaillant sur la théorie des systèmes.</p> <p>6-Organisation d'un symposium en 2008 sur théorie des systèmes.</p> <p>7-Développement de relations avec le monde industriel</p>

24

Collège des Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>1-L'eau : (Le défi de l'eau: de la rareté à la sécurité) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Comprendre le cycle hydrologique (changements climatiques, sécheresse, inondations, recharge des nappes, écosystèmes aquatiques) • Accroître et diversifier les offres en eau (gestion des bassins versants, épuration, dessalement) • Combattre la pollution (sources de pollution, qualité des eaux de surface, écotoxicologie) • Gérer les demandes en eau. 	<p>1-Etat de la ressource en eau et son évolution sur les plans quantitatif et qualitatif.</p> <p>2-Impact des changements climatiques sur les ressources en eau et les phénomènes extrêmes (sécheresse).</p> <p>3-Identification, valorisation et présentation du Patrimoine géologique.</p>

25

Collège des Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer (Suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>2-L'Océan et les ressources aquatiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aménagement intégré des ressources et des zones côtières. • Organisation et cadrage de la petite pêche • Biotechnologies marines • Fonctionnement des écosystèmes aquatiques et contrôle de la qualité environnementale 	<p>4-Instaurer une Biennale Internationale de l'Océanographie du Maroc (1^{ère} éditée en 2007, sur le thème : la diversité des écosystèmes marins : un atout pour le développement de l'aquaculture et des biotechnologies marines au Maroc).</p> <p>5-Promotion d'une technologie innovante pour le traitement des eaux usées pour les petites collectivités et sites touristiques ou industriels en zone côtière.</p>

26

Collège des Sciences et Techniques de l'Environnement, de la Terre et de la Mer (suite)

<i>DOMAINES PRIORITAIRES</i>	<i>ACTIONS</i>
<p>3-La géologie et les risques naturels:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La cartographie • Contexte pétrolier • Risques naturels : cartes des principales zones sensibles, cartes géotechniques, constructions parasismiques 	<p>6-Etude des lagunes marocaines (Cas de la lagune de Oualidia –Sidi Moussa)</p> <p>7-Editer un ouvrage scientifique pour promouvoir les sciences marines</p>

27

Collège des Sciences Physiques et Chimiques

<i>DOMAINES PRIORITAIRES</i>	<i>ACTIONS</i>
<p>1-Matériaux:</p> <p>1.1. Nanomatériaux et nanotechnologies</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Nanoparticules b- Nanocomposites c- Films minces d- Céramiques e- Alliages 	<p>1-Faire un état des lieux de la recherche scientifique en physique et en chimie au Maroc</p> <p>2-Encourager la formation d'étudiants en doctorat (3^{ème} cycle, au Maroc et à l'étranger)</p>

28

Collège des Sciences Physiques et Chimiques(suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>1.2. Matériaux magnétiques et magnétisme</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Films minces et épais b- Bandes c- Capteurs et Antennes d- Aimants moléculaires e- Transformateurs <p>1.3. Semi conducteurs</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Effet photovoltaïque b- Piles à combustible c- Transistors d- Puces 	<p>3- Créer à terme des réseaux d'excellence dans trois domaines (matériaux nouveaux - films minces - énergie) => Contribuer à la création d'INANOTECH (Institut pour les nanotechnologies)</p> <p>4- Contribuer à créer des plates-formes technologiques</p>

29

Collège des Sciences Physiques et Chimiques (suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>1.4. Biomatériaux</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Matériaux polymères fonctionnels b- Céramique c- Alliages d- Nanomatériaux <p>2- Mécanique des milieux multiphasiques:</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Matériaux composites et Nanocomposites b- Fluides complexes c- Milieux solides 	<p>5- Créer des liens avec les industriels autour de projets concrets en rapport avec les domaines retenus</p> <p>6- Organiser des réunions au niveau national sur des thèmes particuliers avec les industriels</p>

30

Collège des Sciences Physiques et Chimiques (Suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
3-Chimie: a- Chimie combinatoire et de coordination b- Chimie supramoléculaire et auto assemblage c- Organométallique d- Chimie organique-inorganique (hybride) e- Catalyse, électrochimie et corrosion f- Chimie inorganique g- Chimie des substances naturelles	7-Organiser en 2011 une conférence internationale sur la mise en œuvre des polymères avec la Polymer Processing Society à Marrakech 8-Organiser en 2009 un grand congrès international sur matériaux et Nanomatériaux Lieu : Marrakech ou Rabat

31

Collège des Sciences Physiques et Chimiques (suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
4-Optique-photonique : a- Films minces b- Polymères fonctionnels c- Optique non linéaire d- Nano et Bio-photonique e- Filtre f- Interaction Laser-Matière	

32

Collège des Sciences Physiques et Chimiques (Suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>5-Physique Théorique, Physique des Hautes Energies et Physiques Nucléaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Physique des réacteurs b- Radiations et rayonnement c- Physique des particules d- Physique statistique e- Théorie des champs et cordes f- Astrophysique 	

33

Collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologiques

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>1- Energie : énergies renouvelables, schistes bitumineux, maîtrise des énergies.</p> <p>2- Eau : utilisation rationnelle de l'énergie pour les technologies de l'eau ; technologies de dessalement de l'eau de mer utilisant en particulier les énergies renouvelables; technologies de traitement des eaux usées,....</p>	<ul style="list-style-type: none"> 1- Evaluer le potentiel national de R&D en matière d'énergie 2- Constitution d'un réseau d'experts relatif à l'axe énergie 3- Etablissement du cahier des charges du programme énergie 4- Lancer une consultation ou appel d'offres relatif au programme énergie 5- Dans le contexte de l'INDH parrainage d'une école secondaire (collège) afin de développer l'esprit scientifique chez les jeunes (avec Académie de Kénitra)

34

Collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologiques (suite)

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>3- Appui à l'émergence de nouvelles industries (matériaux, composants industriels) en soutien à ces secteurs selon le concept de technopôles ou grappes industrielles.</p> <p>4- Les technologies novatrices ayant des retombées positives sur la société marocaine</p>	<p>6- Préparer un rapport sur «Comment favoriser le développement technologique du Maroc» (2007-2008)</p> <p>7- Organisation de séminaires</p> <p>8- Lancement d'un appel à projets sur technologies de l'eau (2008) et d'un autre sur valorisation des ressources naturelles (2009)</p> <p>9- Projet PACTE pour le Maroc (création d'un pôle d'excellence dans le domaine énergétique par Pr. Philippe Tanguy)</p>

35

Collège des Sciences et Techniques du Vivant

DOMAINES PRIORITAIRES	ACTIONS
<p>1- Biotechnologies et santé</p> <p>2- Recherche agricole :</p> <ul style="list-style-type: none"> • amélioration de la productivité • amélioration de la qualité • gestion de l'eau et atténuation de l'effet climatique • meilleure connaissance du milieu naturel • valorisation des espaces pastoraux et forestiers • présentation et valorisation des ressources naturelles 	<p>1- Poursuivre la consultation des experts nationaux et internationaux</p> <p>2- Préparer un appel d'offres pour les futurs projets à soutenir</p>

36

Relations extérieures et partenariat

Participation de l'Académie :

- à l'assemblée annuelle de l'Académie Royale de Suède des Sciences de l'Ingénieur (Stockholm, 26 et 27 octobre 2006);
- aux travaux de l'assemblée générale de l'Inter Academy Panel (IAP) à Alexandrie (4 et 5 décembre 2006); demande d'adhésion présentée par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et acceptée
- à la réunion du Groupe Inter-Académique (GID) pour le Développement, tenue à Rabat (13 septembre 2006).

37

Visites à l'Académie

L'Académie a reçu la visite de :

- *Madame Claudia A. Mc Murray, Sous Secrétaire d'Etat américaine pour les Océans, l'Environnement et la Science (15/11/06);*
- *Monsieur Jean François Girard, président de l'IRD (16/02/06);*
- *Monsieur N. Gourvitch, chargé de l'évaluation de la coopération scientifique maroco-française (04/12/06);*

38

Visites à l'Académie (suite)

- *Monsieur Pierre Auger, membre de l'Académie des Sciences (France) accompagné de M. Guillaume représentant de l'IRD à Rabat (05/01/07);*
- *Une délégation du Colloque Africain sur la Recherche en Informatique (CARI), conduite par le Professeur Bernard Philippe, directeur de recherches à l'INRIA (30/01/07);*
- *Madame Isabelle Maillot du cabinet «Yole développement» (chargée de faire une étude sollicitée par le Ministère de l'Industrie sur la mise en place d'un cluster en nanotechnologies).*

39

Autres activités

- Publication des actes de la session inaugurale;
- Publication du n°1 de la lettre de l'Académie;
- Conception du site internet de l'Académie (en 4 langues);
- Construction du siège de l'Académie (travaux d'étude et de contrôle) : début des travaux juillet 2007

40

Conclusions - Récapitulations

- ❖ L'Enveloppe globale demandée pour les différents projets à soutenir (25) pour la période 2007-2009 s'élève à 79 MDH.

Après examen par la commission des travaux et le Conseil de l'Académie, seulement deux projets sont bien avancés et peuvent être retenus , représentant 22.41 MDH; un 3^{ème} projet présenté directement sollicite seulement une aide de 220 KDH

41

Conclusions - Récapitulations (Suite)

Les collèges sont invités à finaliser tous les autres projets en les classant par ordre prioritaire;

- ❖ Réexaminer les projets qui sont à compléter ou modifier lors de la réunion ordinaire (mai 2007)
- ❖ Envisager pour les années prochaines un appel d'offres sur des thèmes ciblés.

42





De gauche à droite: Pr. Omar Fassi-Fehri, Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques; M. Rachid Benmokhtar Benabdellah, Directeur des Séances; Pr. Abdellatif Berbich, Secrétaire Perpétuel de l'Académie du Royaume et membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.



Vue d'ensemble de la salle des conférences.

DISCUSSION GÉNÉRALE DU RAPPORT D'ACTIVITÉ

Jean-Jacques Bonnet (CSPC)

- les appels à projets de recherche seront-ils l'émanation des différents collèges de notre académie ?
- Le 7^{ème} PCRD (Programme de recherche européen), qui vient de démarrer en janvier 2007, est désormais ouvert aux pays tiers et au Maroc; et donc est-il envisagé qu'il y ait des actions de cofinancement de l'Académie maillées avec des réseaux d'excellence ou des réseaux thématiques du 7^{ème} PCRD ?

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Votre remarque, je la partage. Le travail de notre académie, s'appuie incontestablement sur les collèges. Les thèmes vont être d'abord définis par les collèges et seront arrêtés compte tenu de l'enveloppe budgétaire, des priorités, et de la nécessaire coordination avec les autres structures et instances nationales qui s'occupent de la recherche. Il n'y a pas et ne doit pas y avoir de concurrence. L'Académie complète le travail accompli par le Ministère, par le CNRST, par les Universités, et leur apporte son appui. L'Académie n'est pas là pour apporter un appui total à tous les projets mais plutôt un appui partiel. Sur le 1^{er} appel d'offres, il faut une coordination au niveau des collèges.

Pour les programmes de l'Union Européenne, la communauté scientifique marocaine y participe depuis un certain nombre d'années. Nous encourageons la possibilité de participer au 7^{ème} PCRD surtout qu'il existe un accord de coopération scientifique et de développement technologique signé entre le Royaume du Maroc et l'Union Européenne en juillet 2003.

Noureddine El Aoufi (CESDE)

Je voudrais saluer la démarche pragmatique adoptée par l'Académie dans l'attente de la mise en place des structures, toutefois j'aurais aimé que le Secrétaire Perpétuel fasse allusion aux difficultés rencontrées durant la phase de démarrage de l'Académie.

Notre collège a reçu des propositions de recherche émanant d'équipes de recherche de l'étranger qui proposent de travailler avec des équipes au Maroc sur des thématiques répondant aux priorités arrêtées par l'Académie. Est-ce qu'un projet de recherche peut être domicilié à l'étranger même s'il mobilise des équipes nationales et des doctorants nationaux ? Est-ce qu'il y a une modalité de gestion de ces équipes partenariales ?

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Moi aussi je suis intéressé d'écouter les avis des uns et des autres sur cette question. La domiciliation est quelque chose de formel et la participation d'équipes étrangères est très utile et souhaité, mais il faut que le projet de recherche ait des retombées au niveau national.

Sa Majesté le Roi vient d'accorder son agrément concernant le projet de statut du personnel de l'Académie préparé par le conseil d'Académie et il s'agit maintenant de mettre en place une petite structure administrative chargée de faire le suivi des projets de recherche soutenus par l'Académie. Il sera utile et même nécessaire de dégager des moyens pour apporter un appui logistique aux collèges, ce qui améliorera certainement de manière directe le rendement de l'Académie et ses possibilités d'action.

Albert Sasson (CSTV)

Je voudrais répondre à Jean-Jaques Bonnet au sujet du PCR. Comme l'a dit le Secrétaire Perpétuel, les chercheurs marocains ont l'habitude et savent comment faire. Là où l'Académie pourrait intervenir, quand un projet marocain est conforme à ses objectifs et ses missions d'appui, c'est de se constituer en partenaire qui ne fait pas mais qui fait faire. Cette attitude pourrait s'appliquer au niveau national comme au niveau international.

Philippe Tanguy (CITIT)

Je voudrais, en mon nom personnel et au nom de mon collègue, vous remercier monsieur le Secrétaire Perpétuel pour votre leadership et votre extrême dévouement.

J'ai en fait trois questions assez pratiques, deux qui concernent notre fonctionnement et une qui concerne la nomination de nouveaux membres:

- Comment l'Académie peut soutenir l'organisation de colloques internationaux et je pense en particulier au soutien financier des nationaux marocains qui souhaitent s'inscrire à ces colloques ?
- Ma deuxième question porte sur l'organisation pratique de la transversalité des travaux lorsque plusieurs collèges traitent un même thème sous des angles différents (ex : le thème de l'eau et le thème des matériaux).
- Quelle va être la politique de l'Académie concernant la nomination de nouveaux membres en particulier pour renforcer les collèges les moins dotés en membres ?

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Rien n'empêche l'Académie d'apporter son appui à la participation de chercheurs marocains ou de membres de l'Académie pour peu que ça s'intègre dans les programmes soutenus par l'Académie. A titre d'exemple l'Académie prend en charge les frais de participation de 20 doctorants marocains au colloque organisé en avril 2007 par la Société Marocaine des Sciences Mécaniques. Il faut bien entendu que la demande arrive à l'Académie suffisamment à l'avance pour être étudiée à temps.

Concernant la transversalité entre les collèges, ces derniers sont tous interpellés. Je suggère la tenue de réunions communes entre collèges qui pourraient se mettre d'accord sur un calendrier de dates de réunions communes d'ici la fin de l'année.

La nomination de nouveaux membres résidents ou associés obéit à la procédure prévue par la Loi que nous nous devons d'appliquer scrupuleusement. Pour les membres correspondants, les collègues peuvent faire des propositions au Conseil de l'Académie. Les candidatures peuvent aussi être individuelles.

Khalid Sekkat (CESDE)

Je souscris à la question de comment compléter les collègues. Il serait utile d'avoir des «guidelines» en la matière. A titre d'information pour les jeunes qui souhaitent participer à des conférences internationales en économie, les grandes associations souvent dispensent les jeunes chercheurs des frais d'inscription. Parfois, lorsque les papiers proposés sont de bonne qualité, ces associations fournissent une aide soit pour le transport soit pour le logement. Le soutien de l'Académie ne doit pas toujours être financier mais aussi sous forme de recommandation.

Par ailleurs, je voudrais avoir des éclaircissements sur la question de la domiciliation des projets, surtout pour des chercheurs qui ont fait toute leur carrière à l'étranger et de ce fait n'ont aucun lien académique avec les institutions de recherche nationales. Il faut qu'il y ait des critères clairs comme le seuil du budget à dépenser à l'étranger

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des Séances)

Moi, je voudrais lier la question de domiciliation à la question de publication. Pour nous ce qui est aussi important c'est de mettre en valeur la recherche, les chercheurs marocains et en plus que la publication soit comptabilisée comme production marocaine. La co-domiciliation et la co-publication sont des voies intéressantes. Nous devons nous montrer relativement souples en respectant les critères fondamentaux que ça doit aller dans l'intérêt du Maroc.

Carlos Martinez-Alonso (CSTV)

Il me paraît nécessaire de créer au sein de l'Académie un groupe chargé de faire l'analyse des considérations et des objectifs trans-disciplinaires ou inter-disciplinaires afin d'éviter la duplication. Dans le futur, ce sont les projets inter-disciplinaires qui vont créer une valeur ajoutée et pour cela l'Académie devrait être bien préparée. Ma proposition est de constituer une commission regroupant les directeurs des collèges pour analyser les projets trans-disciplinaires.

Au sujet de la domiciliation des projets, je crois qu'il ne faut exclure aucune possibilité tant il est vrai que la présence de scientifiques marocains en dehors de leur pays peut être un élément important dans la dynamisation de la science marocaine.

Un accent particulier doit être mis sur la coopération internationale avec des institutions d'Europe, des Etats-Unis et d'Amérique Latine.

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Je voudrais surtout remercier tous les collègues pour leurs interventions et leurs propositions qui, incontestablement, enrichissent le débat et nous ouvrent des perspectives intéressantes. La question de la domiciliation est maintenant éclaircie. Aussi, je partage

les points de vue de notre collègue Carlos Martinez sur la question de transversalité, la création d'une commission des directeurs des collèges et l'importance de la coopération internationale.

Zouheir Sekkat (CSPC)

J'ai deux petits commentaires à faire: Le premier sur le financement de congrès internationaux, je pense que ça pourrait se faire dans le cadre du financement de projets de recherche où il est prévu la participation aux congrès. Le deuxième concerne l'attraction de potentialités étrangères qui ne sont pas affiliées officiellement aux instituts ou universités marocains en leur donnant une affiliation dans l'université qui veut bien accueillir leurs activités.

Claude Griscelli (CSTV)

Je voudrais revenir sur un sujet qui n'a pas été encore débattu et qui concerne les vocations scientifiques. Vous avez eu l'heureuse initiative, en collaboration avec le Ministère de l'Education Nationale, d'organiser une semaine de sensibilisation de la Science et je trouve qu'une académie comme la notre doit agir dans un domaine comme celui-ci, parce que c'est l'avenir du pays que l'on traite, c'est le développement économique que l'on considère. J'ai été très enthousiaste par cette organisation et j'en garde un magnifique souvenir d'avoir rencontré des centaines voire plusieurs milliers de jeunes intelligents du Maroc. La deuxième raison pour laquelle j'en parle c'est le problème de la désaffection ou le manque de vocation scientifique. Je suppose que le Maroc est touché par ce phénomène. Globalement, certaines sciences sont épargnées; on voit par contre la physique, la chimie et les mathématiques relativement délaissées. Il serait important de savoir à quel degré le Maroc est touché.

Question à notre secrétaire Perpétuel : pensez-vous utile de renouveler et de quelle manière cette initiative et peut-on optimiser au fond le temps passé par certains d'entre nous ici au Maroc ? Peut-on avoir aussi d'autres actions, d'autres réflexions sur le sujet qui me paraît extrêmement important pour le pays ?

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des Séances)

Le problème de désaffection pour les sciences touche pratiquement tous les pays et même les pays asiatiques commencent à connaître exactement le même problème. La désaffection commence à être très inquiétante, mais elle revêt des aspects extrêmement différents si on analyse les causes. Le problème se complique chez nous par des raisons structurelles au-delà des raisons psychologiques et je partage votre point de vue d'organiser une réflexion sur ce sujet et ce sera tout à l'honneur de notre compagnie.

Mohamed Ait Kadi (CSTETM)

Je voulais intervenir en complément à la réponse que Monsieur le Secrétaire Perpétuel a apportée à la question de notre collègue Philippe Tanguy concernant l'optimisation de la coordination au niveau de l'Académie, faciliter l'interdisciplinarité et favoriser les synergies entre collèges. J'ai le privilège d'être membre de la commission des travaux, ce qui m'a permis de faire une lecture croisée des rapports qui ont été soumis par l'ensemble

des collègues concernant leurs plans de travail. J'ai été particulièrement heureux de voir que justement il existe beaucoup d'opportunités de travail interdisciplinaire et de mobilisation de synergies.

Ayant la lourde tâche qui m'a été confiée de coordonner l'élaboration du Bulletin d'Information de l'Académie, je voudrais dire que la commission des travaux a approuvé un contenu initial de ce bulletin qui, en vertu de l'article 23 du règlement intérieur, sera un bulletin biannuel et il a été retenu que ce bulletin puisse être le reflet de la vie de l'Académie dans l'accomplissement de l'ensemble de ses missions. Ce bulletin ne peut exister que par une appropriation collective et une contribution de tous.

Ali Boukhari (CITIT)

J'estime personnellement que l'avenir de la science dépend de notre jeunesse. Il est donc souhaitable de s'occuper de cette jeunesse au niveau des lycées et je souhaite que l'organisation de l'activité «les jeunes et la science» continue et qu'elle soit généralisée au niveau de notre pays. Je pense que l'Académie peut contribuer à la création d'une cité des sciences et de la technologie.

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des Séances)

À titre d'information concernant le projet de création d'une cité des sciences et de la technologie, il y'a un certain nombre d'associations de la ville de Tanger qui ont étudié un projet avec l'aide de l'UNESCO et je pense que notre Académie pourrait se pencher dessus et apporter son soutien pour encourager la réalisation de ce projet.

Albert Sasson (CSTV)

Il faut laisser à ceux que c'est leur occupation première de faire leur devoir Notre mission première c'est le soutien fort et soutenu à la recherche à travers des projets rigoureux. Oui à des conventions avec des institutions analogues mais toujours dans le même but de soutien à la recherche.

Nadia Ghazzali (CSMI)

La désaffection pour les sciences frappe de plein fouet le Canada. A l'Université Laval, nous avons perdu cette année plus de 30% des étudiants du 1^{er} cycle. J'ai le privilège d'être titulaire d'une chaire pour la promotion des sciences et de génie particulièrement auprès des femmes. Cette chaire est financée par le Gouvernement du Canada (50%) en collaboration avec un partenaire privé (50%) qui est une compagnie d'assurances. Nous sommes disposés à partager nos réflexions avec vous sur le sujet.

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Concernant le projet de la cité des sciences et de la technologie à Tanger, l'Académie est déjà membre du panel qui parraine cette initiative.

Je voudrais, en conclusion de ce débat, remercier tous les collègues pour leurs contributions, leurs suggestions, leur participation active et le souci qu'ils ont tous de faire avancer l'action de notre académie.



COMPTE RENDU DE LA SESSION PLÉNIÈRE 2007

La session plénière solennelle 2007 de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, s'est tenue au siège de l'Académie du Royaume du Maroc, à Rabat, les 21-22 et 23 février 2007.

Séance d'ouverture

Mercredi 21 février 2007 (matin)

Le mercredi 21 février 2007, à 09h, au siège de l'Académie du Royaume du Maroc à Rabat, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a procédé à l'ouverture solennelle de sa deuxième session, en présence des académiciens et des personnalités invitées. La session a été présidée par le Directeur des séances, Mr. Rachid Benmokhtar Benabdellah.

Au cours de la séance d'ouverture, le Secrétaire perpétuel de l'Académie, Pr. Omar Fassi-Fehri, a fait une intervention rappelant les principales actions menées par l'Académie depuis son installation en mai 2006 ainsi qu'une présentation du programme de la session 2007.

Après la séance d'ouverture, l'Académie a entamé ses travaux et procédé à l'examen du rapport d'activités et du programme d'actions et des projets de recherche soumis par les collèges à la commission des travaux en vue d'un soutien éventuel pour la période 2007-2009.

Le rapport d'activité, présenté par le Secrétaire perpétuel, a porté sur toutes les actions entreprises par l'Académie depuis son installation officielle par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI -que Dieu Le garde-, le jeudi 18 mai 2006, au Palais Royal d'Agadir.

Dans ce rapport, le Secrétaire perpétuel a rappelé les différentes activités menées par le conseil d'Académie, la commission des travaux et les collèges scientifiques, en particulier l'organisation sous le Haut Patronage de Sa Majesté le Roi Mohammed VI, des journées sur le thème «les jeunes et la science au service du développement»; il a également rappelé les actions menées par l'Académie sur le plan international et les visites rendues à l'Académie par un certain nombre de personnalités scientifiques.

Par ailleurs, le Secrétaire perpétuel a présenté le programme d'actions et les projets de recherche proposés pour un soutien durant la période 2007-2009, programme élaboré par les collèges scientifiques de l'Académie et examiné par la commission des travaux.

Après cet exposé, les académiciens purent entamer une large discussion qui permit de dégager un certain nombre de recommandations :

- tenir compte de la nécessaire complémentarité entre les priorités en matière de recherche définies par les collèges scientifiques et les priorités définies par les différentes instances nationales;
- mettre en œuvre, rapidement, quelques actions de soutien à la recherche concernant des propositions spontanées;
- procéder dans les meilleurs délais à des appels à proposition plus larges auprès de la communauté scientifique marocaine;
- appréhender le problème de la transversalité des thèmes entre les collèges par la mise en place d'un système assurant une plus grande coordination entre les collèges;
- tenir compte de la composante d'interdisciplinarité dans la sélection des projets de recherche à soutenir;
- soutenir les projets de recherche en tenant compte du budget, des priorités nationales ainsi que du soutien apporté par d'autres instances nationales ou étrangères;
- améliorer les critères et les procédures de sélection des projets et permettre la séquentialité des actions;
- mettre en place une cellule pour suivre l'état de la recherche et en particulier la production scientifique marocaine;
- éviter que l'Académie ne se substitue à d'autres instances et autres structures de recherche. Elle doit veiller à garder sa propre spécificité, tant en ce qui concerne son statut, qu'en ce qui concerne ses missions;
- renforcer les collèges scientifiques encore sous représentés par la nomination de nouveaux membres en respectant et suivant la procédure prévue dans ce cas par la loi de création de l'Académie;
- nommer des experts auprès de l'Académie en s'appuyant sur la possibilité offerte par la loi permettant de nommer de tels experts, et ce dans le but de renforcer en particulier les collèges sous représentés;
- possibilité de soutenir des projets de recherche domiciliés à l'étranger à condition que leurs retombées soient directement profitables à la recherche scientifique marocaine, aux chercheurs marocains et au développement du pays;
- encourager la participation des scientifiques et des jeunes doctorants marocains aux colloques et congrès scientifiques, au Maroc et à l'étranger;
- contribuer à la diffusion du savoir et de la culture scientifique;
- établir et renforcer la coopération internationale en matière scientifique et technologique.

Cette séance a ainsi permis des interactions fructueuses entre l'ensemble des participants et a dégagé des lignes d'action à la fois ambitieuses, concertées, réalistes et concrètes.

A l'issue de cette première séance de travail, l'Académie a entamé le programme arrêté par la commission des travaux concernant les quatre thèmes scientifiques choisis pour

cette session, et qui ont donné lieu chacun à une conférence générale et six communications présentées par des académiciens ou d'éminentes personnalités invitées.

Mercredi 21 février 2007 (après-midi)
Séance sur "Modélisation et mathématiques appliquées"

La première séance a commencé le mercredi après-midi 21 février par le thème consacré à **"modélisation et mathématiques appliquées"**.

L'analyse des phénomènes réels les plus variés et l'appréhension des prévisions sur toute sorte de questions relatives à l'économie, les finances, l'industrie, l'environnement ou le développement durable font appel de plus en plus à la modélisation et aux mathématiques appliquées. L'examen de ce thème et les discussions qui ont eu lieu ont porté sur les modèles mathématiques utilisés dans le domaine des systèmes écologiques avec des applications en ressources halieutiques en traitant le cas du Maroc, ainsi que sur les mathématiques appliquées aux domaines de l'économie, des finances et de la gestion des risques. Des présentations et des discussions ont également eu lieu sur la modélisation des procédés d'éco-conceptions industrielles ainsi que sur la modélisation des procédés industriels en vue de l'amélioration de la compétitivité des entreprises et de la valorisation des résultats de la recherche.

Judi 22 février 2007 (matin)
**Séance sur "La question de l'énergie aujourd'hui :
défis scientifiques et techniques"**

La deuxième séance du jeudi 22 février matin a été consacrée à **"La question de l'énergie aujourd'hui : défis scientifiques et techniques"**.

Aujourd'hui, les perspectives énergétiques renvoient à des enjeux particulièrement importants ; - la sécurité et l'indépendance énergétique, - l'épuisement progressif des réserves fossiles, et - le risque du réchauffement climatique qui pourrait avoir des conséquences inquiétantes sur la planète. Cette séance a permis de traiter de l'état des lieux de la production énergétique, des énergies fossiles en particulier le charbon et les schistes bitumineux, des énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolienne et le potentiel de la biomasse. Au cours de la discussion, les académiciens ont examiné aussi quelles recherches devaient être conduites au regard de l'évolution du climat, et des évolutions inévitables de la production d'énergie, centralisée ou non, produisant ou non des gaz à effet de serre. Une discussion particulièrement riche a porté également sur le concept d'associer l'efficacité économique à l'évolution vers un comportement de prudence écologique et à la volonté de conserver aux générations futures la possibilité d'exercer leurs propres options de développement.

La consommation de l'énergie a été un autre volet de la discussion qui a permis d'examiner toutes les possibilités d'amélioration des rendements des appareils électriques ménagers et des éclairages à froid ainsi que l'importance des technologies légères dans le sens de la production énergétique par l'intermédiaire des centrales thermosolaires.

Au cours de ce débat, quelques pistes ont été également dégagées pour assurer le développement énergétique du Maroc à la lumière des ressources disponibles dans un contexte de développement durable.

Judi 22 février 2007 (après-midi) Séance sur "Biotechnologies"

La troisième séance du jeudi 22 février après-midi a traité le thème des "**biotechnologies**". L'essor de cette discipline est dû aux progrès réalisés dans la connaissance de la structure du génome que des promesses et défis ouverts par ces avancées. Les exemples des récentes découvertes en génomique et en biologie moléculaire dans les pays développés et des opportunités qu'elles peuvent engendrer pour améliorer les conditions de vie des populations, font de la biotechnologie le fer de lance dans les plans de développement scientifique, technologique et socio-économique d'un grand nombre de pays y compris certains pays en voie de développement.

Au cours de cette séance, le débat a porté sur l'apport de la biologie moléculaire et de la génétique au développement des méthodes curatives pour le cancer, de la tuberculose et des maladies neurologiques ainsi qu'à la connexion des biotechnologies avec les domaines de la pharmaceutique et des sciences des matériaux. La discussion a porté aussi sur la nécessité de renforcer la coopération entre les chercheurs et le secteur productif surtout dans le domaine de la santé.

Vendredi 23 février 2007 (matin) Séance sur "Changements climatiques et problèmes d'environnement"

La quatrième séance du vendredi 23 février matin a été réservée à la problématique des "**Changements climatiques et problèmes d'environnement**".

C'est un sujet d'actualité, tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre prévoient une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone, et une élévation de la température moyenne à la surface de la terre ainsi qu'une hausse du niveau de la mer au cours du 21^{ème} siècle.

Le changement climatique semble aujourd'hui inéluctable et la question de l'équilibre entre la prévention, la vulnérabilité et l'adaptation se pose avec acuité. Nous savons aujourd'hui que l'homme a pu influencer le climat. Le débat qui a eu lieu a permis de

confirmer que le changement climatique est devenu aujourd'hui une réalité confirmée par l'observation scientifique. Les questions soulevées ont permis de dégager trois voies de réponses :

- la première consiste à prévenir le changement climatique en limitant les émissions de gaz à effet de serre ce qui revient, pour l'essentiel, à utiliser des sources énergétiques plus pauvres en carbone, à maîtriser les besoins énergétiques, à développer des énergies renouvelables et à procéder à des économies de l'énergie;
- la seconde consiste à capturer et stocker les émissions de gaz à effet de serre (stockage du CO₂);
- la troisième serait de prévenir les conséquences engendrées par le changement climatique à savoir les risques liés à:
 - des inondations;
 - la dégradation des sols;
 - la désertification;
 - des périodes de fortes chaleurs estivales;
 - des tempêtes violentes;
 - et au développement de maladies infectieuses.

La question de gouvernance des conséquences liées aux changements climatiques et la gestion de l'environnement a été également posée.

De même, le changement climatique et les problèmes de l'environnement ont été considérés par les académiciens comme des sujets scientifiques transversaux et des thèmes de recherche interdisciplinaires par excellence.

Par ailleurs, les problèmes de vulnérabilité et d'adaptation ont été aussi soulevés lors de la discussion surtout ceux liés aux phases de sécheresse qui risqueraient de s'accroître avec les changements climatiques.

Face à ces scénarios alarmistes, quelques éléments optimistes ont été également mis en avant, en particulier ceux en relation avec les simulations numériques qui sont devenues de plus en plus prédictives. Par exemple, le modèle de la «planète numérique» présenté à cette séance, a été un excellent modèle numérique multi échelle, multi physique et intégrateur permettant d'aider à la prédiction des scénarios possibles pour les générations futures.

Par ailleurs, ces modèles numériques devenus de plus en plus crédibles et fiables ont un autre attribut est celui de la capacité de visualiser ces prédictions et d'aider à la prise de décisions. Cependant, ces modèles ont fait l'objet d'un débat intense qui a recommandé le devoir absolu de rester sur le plan scientifique prudent et modéré, et toujours attentif à enrichir les modèles proposés.

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques est sollicitée pour maintenir cette question, aussi passionnante et aussi fondamentale, dans son ordre du jour pendant les quelques décennies à venir.

Vendredi 23 février 2007 (après-midi)

Le vendredi 23 février 2007, après-midi, les collègues scientifiques se sont réunis pour discuter et adopter le plan d'action pour l'année 2007. Ensuite, les académiciens se sont retrouvés en réunion à huis clos pour exposer les résultats des réunions tenues au niveau des collèges et débattre des meilleurs moyens en vue d'améliorer le travail de l'Académie et de promouvoir la recherche scientifique au niveau national.

Séance de clôture

La clôture des travaux est intervenue à l'issue de cette séance. Elle a été marquée par la lecture d'un message de loyauté, de gratitude et de remerciement, adressé par l'ensemble des académiciens à Sa Majesté le Roi Mohammed VI - que Dieu Le protège et Le guide dans l'accomplissement de Sa Haute et Noble Mission -.

MINUTES OF THE SECOND ANNUAL PLENARY SESSION

The second annual plenary session of the Hassan II Academy of Science and Technology was held on February 21-23, 2007 in the facilities of the Academy of the Kingdom of Morocco (Rabat).

Opening Session

Wednesday, February 21st, 2007 (Morning)

On Wednesday February 21st, 2007, at 09 Am, the Hassan II Academy of Science and Technology proceeded to the solemn opening of its second annual plenary session, in the presence of the academicians and the invited personalities. The session was chaired by the Director of Sessions, Mr. Rachid Benmokhtar Benabdellah.

During the opening session, the Permanent Secretary of the Academy, Pr. Omar Fassi-Fehri, exposed the principal actions carried out by the Academy since its installation in May 2006 and presented the program of the 2007 session.

After the opening session, the activity report, the action plan and the research projects submitted by the colleges to the Work Committee for an eventual support for the period 2007-2009 were examined.

The activity report, presented by the Permanent Secretary, summarises all the actions undertaken by the Academy since its official inauguration by His Majesty the King Mohammed VI, on Thursday May 18th, 2006, in the Royal Palace of Agadir

In this report, the Permanent Secretary presented the various activities undertaken by the Academy Council, the Work Committee and the Scientific Colleges, in particular the organization, under the High Patronage of His Majesty the King Mohammed VI, of the scientific event on the topic "Youth and Science in service of the development". He also mentioned the actions carried out by the Academy on the international level and the various visits made to the Academy by a certain number of scientific personalities.

In addition, the Permanent Secretary presented the action plan, the proposed projects to be granted for the period 2007-2009 and the program set by the scientific colleges and examined by the Work Committee.

After this presentation, the academicians started a discussion that ended with a certain number of recommendations:

- Take into account of the necessary complementarity between the priorities in terms of research as defined by the Scientific Colleges and those defined by the national relevant circles.
- Implement as soon as possible some actions for the support of the spontaneous proposals.
- Proceed to a broader call for projects within the Moroccan scientific community.
- Apprehend the transversal connections between the topics of the different colleges by a mechanism that can ensure efficient coordination among the colleges.
- Take into account the interdisciplinarity aspect during the selection of the research projects to be granted.
- The financial support of the projects should take into account the budget, the national priorities as well as the support obtained from other national or foreign institutions.
- Improve the rules of evaluation and selection of the projects.
- Set up a working cell aiming at following up the state of research and in particular the national scientific production.
- The Academy should not replace the other existing structures of research. It should rather keep its own specificity with respect to its statute and its missions.
- Reinforce the scientific colleges that are still under represented by nominating new members in accordance with the dispositions envisaged in the law instituting the Academy.
- Appoint experts attached to the Academy in accordance with the dispositions envisaged in the law to reinforce in particular the Scientific Colleges that are under represented.
- Examine the eventuality to support the scientific projects domiciled abroad provided that the benefit of their findings goes directly to the Moroccan scientific research and the development of the country.
- Encourage the national scientific community and doctoral students to participate to national and international meetings and congresses.
- Contribute to the dissemination of science and the scientific culture.
- Establish and strengthen the international co-operation in the field of scientific and technical research.

This session allowed fruitful interactions among the participants and released lines of action which are ambitious, concerted, realistic and concrete.

After this first working session, the Academy started the program adopted by the Work Committee and which is related to the four selected scientific topics. One plenary lecture and six regular communications were presented by both scholars and distinguished invited personalities.

Wednesday, February 21st, 2007 (Afternoon)
Session “Modelling and Applied Mathematics”

The first session started on Wednesday, February 21st in the afternoon by the topic “Modelling and Applied Mathematics”.

The analysis of the various real phenomena and the apprehension of the different questions related to the economy, finance, industry, environment or sustainable development require more and more sophisticated modelling and applied mathematics. The examination of this topic and the related discussions dealt with the mathematical models used in the fields of ecological systems with applications to Moroccan halieutic resources, economy and finance as well as in the field of industrial eco-design processes. Finally, modelling of the non-conventional industrial processes for the improvement of the competitiveness and the valorisation of the research findings was discussed.

Thursday, February 22nd, 2007 (Morning)
Session “Today’s energy problems and scientific and technical challenges”

The second session of Thursday February 22nd morning was devoted to “Today’s energy problems and scientific and technical challenges”.

Nowadays, the energy perspectives refer to important stakes; a- safety and energy independence, b- the progressive exhaustion of the fossil reserves, and c- the risk of the climatic reheating which could have worrying consequences on the planet. Various aspects of the problem were presented and discussed. These include the inventory of energy production resources, fossil energies in particular coal and oil shales, renewable energies such as solar energy, wind energy and the energy potential of the biomass.

During the discussion, the scholars also examined which kind of research should be undertaken with regards to the evolution of the climate and the inevitable evolution the energy production. A particularly rich discussion was made regarding the association of the economic effectiveness to the evolution towards an ecological behaviour of prudence and the will to preserve to the future generations the possibility of exerting their own options of development.

The energy consumption was another part of the discussion during which the efficiency and the output of the domestic electrical devices were analysed as well as the importance of light technologies such as the energy production through thermo-solar stations. During this debate, some guidelines were also suggested to ensure the energy development of Morocco in the light of its available resources in a durable context of development.

Thursday, February 22nd, 2007 (Afternoon)
Session “Biotechnology”

The topic of the third session of Thursday, February 22nd afternoon was related to “biotechnology”. The important advances in this discipline are due to the progress made in the knowledge of the genome structure and to the big challenges and the potential applications.

The recent discoveries in genomics and molecular biology and their impact for improving the life conditions of the populations set biotechnology as one of the highest priorities in the scientific, technological and socio-economic development plans of a great number of countries including some developing countries.

During this session, the debate was related to the contribution of molecular biology and the genetics to the development of curative methods for cancer, tuberculosis and the neurological diseases as well to the connections between biotechnology and the fields of pharmaceuticals and materials science.

The discussion also concerned the need for strengthening the cooperation between the researchers and the productive sectors, especially in the field of health.

Friday, February 23rd, 2007 (Morning)
Session “Climatic changes and problems of environment”

The fourth session of Friday, February 23rd morning was devoted to the “climatic changes and problems of environment”.

This is an important hot topic; all the scenarios of emissions of greenhouse gases envisage an increase of the carbon dioxide concentration and a rise in the average temperature on the surface of the earth and also a rise of the sea level during the 21st century.

The climatic change seems now inescapable and the question of balance between the prevention, the vulnerability and the adaptation arises with acuity. Now, we know that man’s activity had influenced the climate. The debate which took place confirmed that the climatic changes became today a reality confirmed by the scientific observations. Three avenues were proposed:

- The first one consists in preventing the climatic change by limiting the emissions of greenhouse gases, which essentially implies the use of energy sources with low content of carbon, the control energy needs, the development of renewable energies and the energy saving.
- The second consists in capturing and storing the emissions of greenhouse gases (storage of CO₂).
- The third would be to prevent the consequences generated by the climatic changes, namely the risks related to:
 - floods;

- impoverishment of the soil;
- desertification;
- periods of strong aestival heats;
- violent storms;
- development of infectious diseases.

The question of the governorship of the consequences related to the climatic changes and the management of the environment were also discussed.

The climatic change and the problems of the environment were considered by the scholars as transversal scientific areas that require interdisciplinarity and the involvement of different expertises.

On the other hand, the problems of vulnerability and adaptation were also raised during the discussion, especially those related to the phases of dryness which could be accentuated with the climatic changes.

Besides these alarmist scenarios, some optimistic elements were also evoked, in particular those related to modelling and numerical simulations that are becoming more and more predictive. For example, the model of “the numerical planet” presented at this session was an excellent integrated multiscale and multiphysics numerical model that may help the prediction of the possible scenarios for the future generations. In addition, such numerical models and simulations that are becoming increasingly credible and reliable offer also the possibility to visualize the predictions and thus help to take pertinent decisions. However, these models were the subject of intense debate and discussion that pointed out the need of scientific prudence and moderation. In this field, the Hassan II Academy of Sciences and Technology is requested to maintain this question so enthralling and so fundamental in its program during the few coming decades.

Friday, February 23rd, 2007 (Afternoon) The Closing Session

On Friday, February 23th, 2007 in afternoon, the scientific colleges met to discuss and adopt the action plan for the year 2007. Then, the academicians got together in a closed meeting to discuss issues related to the procedures that are able to improve the work of the Academy and to promote the scientific research at the national level.

The end of the session was marked by the reading of a message of loyalty, gratitude and thanks addressed by the academicians to His Majesty the King Mohammed VI.



Pr. Driss Khalil et Pr. Abdellatif Ben Abdeljalil, membres de l'Académie du Royaume, présents à la cérémonie d'ouverture.



Photo de groupe

SESSION 1

**MODÉLISATION ET
MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES**

MÉTHODES D'AGREGATION DE VARIABLES AVEC APPLICATION EN HALIEUTIQUE CAS DE LA SARDINE MAROCAINE



Pierre AUGER¹, Najib CHAROUKI² & Nadia RAÏSSI³

¹ IRD, UR 079 GEODE, membre de l'Académie des Sciences, France

² Laboratoire des Approches et Méthodologies, INRH, 2 rue de Tiznit, Casablanca, Maroc

³ Laboratoire SIANO, Faculté des Sciences, Université IbnTofaïl, BP 133, Kénitra, Maroc

Résumé

Une approche classique de la modélisation en biologie consiste à construire et à étudier un système dynamique non linéaire comme par exemple, un système d'équations différentielles ordinaires, un ensemble d'équations aux différences, ou encore un système d'équations aux dérivées partielles. Les modèles mathématiques utilisés dans le domaine des systèmes écologiques comportent en général un grand nombre de variables couplées. Il s'agit de systèmes dynamiques non linéaires qui sont en général difficiles à étudier analytiquement. Les "méthodes d'agrégation de variables" ont été utilisées. Elles ont pour but de construire à partir d'un modèle détaillé, un modèle réduit ne gouvernant que quelques variables globales à long terme. Cette méthode est basée sur la constatation que les systèmes écologiques présentent une organisation "hiérarchique" en niveaux d'organisation emboîtés, du plus macroscopique au plus microscopique, avec des échelles de temps, caractéristiques de chacun de ces niveaux, différentes. Des applications dans le domaine de la modélisation de la dynamique spatialisée de pêcheries ont été testées. Il s'agit de modèles de dynamique de populations de poissons et des flottes de pêche dans un milieu constitué par un ensemble de sites discrets correspondant à des zones de pêches, qui sont connectés par des migrations des bancs de poissons et des déplacements des flottes de pêche. Les effets de déplacements rapides et stock-dépendants des bateaux de pêche entre les zones sur la stabilité de la pêcherie ont été analysés. Dans le cas de déplacements à taux constants, nous montrerons qu'il existe une répartition de l'effort de pêche sur les zones de pêche qui optimise l'activité totale de la pêcherie. Ces modèles seront confrontés à des données en cours d'acquisition qui seront fournies par l'INRH (Institut National de la Recherche Halieutique) et qui concernent la pêche de la sardine le long de la côte Atlantique du Maroc.

1. AGRÉGATION DE VARIABLES ET SYSTÈMES DYNAMIQUES HIÉRARCHISÉS

Une approche classique de la modélisation en écologie consiste à utiliser un système dynamique comme par exemple un système d'équations différentielles ordinaires non linéaire. Cependant, ces modèles doivent souvent comporter un grand nombre de variables d'état et de paramètres. De ce fait, ils sont généralement difficiles à étudier de façon analytique et il est donc rarement possible d'obtenir des résultats généraux les concernant. Ainsi, des travaux ont été réalisés pour tenter de réduire la complexité des modèles.

1.1. Réduction de la complexité des modèles mathématiques biologiques

Puisque la difficulté du traitement de systèmes écologiques complets provient dans une large mesure du grand nombre de variables qu'implique leur modélisation, il est logique de chercher à construire un modèle réduit ne gouvernant plus que quelques variables globales. On doit au groupe d'Iwasa et Levin (Iwasa *et al.*, 1987, 1989) l'idée d'appliquer à ce problème une méthode, déjà classiquement utilisée en économie, qui permettait de construire un modèle réduit à partir du modèle du système complet. Ce fut le début de "l'agrégation de variables" pour le traitement de systèmes biologiques complexes, expression qui a maintenant pris la signification générique de «méthode de réduction de la dimension» en dynamique des populations. Cependant, l'agrégation parfaite, qui consisterait à effectuer un changement de variables permettant de réécrire le modèle complet sous forme réduite, n'est utilisable pratiquement que pour quelques valeurs particulières des paramètres du modèle. Au début des années 1980, nous avons proposé une méthode alternative, basée sur la constatation que les systèmes biologiques qui nous intéressent présentent une organisation "hiérarchique" (i.e. en niveaux d'organisation emboîtés, du plus macroscopique au plus microscopique), qui revenait à prendre en compte les échelles de temps caractéristiques de chacun de ces niveaux pour aboutir au modèle réduit que l'on recherchait.

Le niveau de description le plus microscopique reste le plus complet. Mais, techniquement il n'est pas accessible à la mesure (dans un gaz, on ne peut pas connaître le comportement cinétique de chacune des molécules qui le constituent), et, se pose le problème de rechercher comment passer des propriétés d'un certain niveau d'organisation à celles d'un autre niveau, plus macroscopique ou plus microscopique. La physique statistique a déjà traité ce type de problème, en parvenant en particulier à expliciter les grandeurs (e.g. pression et température) caractéristiques d'un système macroscopique gazeux à partir de caractéristiques microscopiques (e.g. distribution en niveaux d'énergie) des molécules qui le constituent.

Toutefois, il n'intervenait dans ce cas que deux niveaux d'organisation (le gaz et la molécule gazeuse), alors qu'il en intervient beaucoup plus dans le cas biologique [i.e., biosphère, communautés, populations, organismes, tissus et organes, cellules, organites subcellulaires, associations moléculaires, molécules] et que, de plus, il existe des possibilités d'interactions multiples entre ces niveaux. En conséquence, toute modification à un niveau donné d'organisation biologique est susceptible de faire émerger des propriétés nouvelles dans tout autre niveau plus macroscopique, comme elle est aussi susceptible de provoquer des changements dans des niveaux plus microscopiques.

Le point de départ de notre raisonnement est que les échelles de temps (et d'ailleurs aussi d'espace) des processus se déroulant dans les différents niveaux d'organisation biologiques sont en général très différentes. C'est ainsi qu'en écologie, par exemple, on peut donner, comme ordre de grandeur de temps caractéristiques, la journée pour les changements de comportement des individus, l'année pour les modifications d'effectif de populations animales ou végétales, et des durées encore plus considérables pour l'évolution des communautés. Une part déterminante du travail de notre équipe a donc consisté à développer des formalisations mathématiques permettant de construire des modèles réduits ne gouvernant que quelques variables globales à une échelle de temps lente, à partir de la prise en compte des changements à échelles de temps rapides qui s'opéraient dans les niveaux sous-jacents.

1.2. Principe de la formalisation théorique

Les articles d'Auger & Poggiale (1996, 1998) et d'Auger & Bravo de la Parra (2000) présentent de manière assez générale la méthode d'agrégation de variables, illustrée par des exemples simples en dynamique de populations. Le système étudié présente une organisation hiérarchique. On appelle "groupe" les éléments d'un niveau d'organisation donné d'un système hiérarchisé, ces groupes étant eux-mêmes constitués de sous-groupes, et ainsi de suite. C'est ainsi que les communautés sont des groupes d'espèces, et les populations des groupes d'individus. Pour la formalisation théorique, l'hypothèse fondamentale est que les interactions intra-groupe sont fortes en comparaison des interactions inter-groupe, ou, ce qui revient au même, que les interactions intra-groupe sont rapides par rapport aux interactions inter-groupe.

Dans la méthode d'agrégation, la dynamique intra-groupe, dont les invariants définissent des variables globales pour chaque groupe, est conservative. Il est également nécessaire que les interactions intra-groupe atteignent leur «équilibre» stable (c'est-à-dire qu'elles cessent de se modifier) ou tendent vers un «attracteur». On aboutit ainsi au modèle réduit (encore appelé "modèle agrégé") en faisant l'approximation que les variables rapides se trouvent à l'équilibre. Ce modèle réduit ne comporte plus que quelques variables globales (i.e. macroscopiques) caractérisant chaque groupe, et il décrit l'évolution du système à une échelle de temps lente, au lieu du modèle complet, qui, lui, prenait en compte l'ensemble des variables et des équations caractéristiques des interactions existant dans le système hiérarchisé.

Alors que le modèle complet décrivait la dynamique du système en prenant en compte la totalité des variables et de leurs interactions, le modèle agrégé, lui aussi, ambitionne de décrire la même réalité en n'utilisant qu'un petit nombre de variables macroscopiques. Encore, faut-il s'assurer que le comportement qualitatif des deux modèles est bien le même. En collaboration avec quelques mathématiciens, nous avons montré que l'on retrouve effectivement les mêmes équilibres et les mêmes propriétés de stabilité avec le modèle complet qu'avec le modèle agrégé. Auger & Roussarie (1994) et Poggiale & Auger (1995) ont montré que la présente méthode d'agrégation de variables rentrait dans le cadre du théorème de la variété centre de Fenichel. La méthode suivie, initialement basée sur des systèmes d'équations différentielles ordinaires en temps continu, a été étendue à de nouveaux systèmes dynamiques basés sur des équations aux dérivées partielles, puis

à des modèles en temps discret (modèles les plus utilisés par les biologistes). Poggiale & Auger (1995), Sanchez *et al.* (1997), Bravo de la Parra *et al.* (1995, 1999) et Sanz & Bravo de la Parra (1999), ont proposé une manière originale d'introduire les différentes échelles de temps dans les modèles en temps discret. Des théorèmes de convergence des dynamiques des modèles complets et agrégés ont été démontrés dans les différents contextes envisageables (modèles en temps continu et en temps discret, dans les cas linéaire et non linéaire, autonome et non autonome, et pour des modèles déterministes ou stochastiques).

2. APPLICATIONS EN HALIEUTIQUE: CAS DE LA SARDINE MAROCAINE

Il s'agit d'un exemple en cours de développement (Mchich *et al.*, 2002; 2005; 2006) avec Najib Charouki de l'INRH et Nadia Raïssi de l'Université de Kénitra. Le but est de modéliser la pêcherie de sardines le long de la côte marocaine qui est divisée en deux grandes zones de pêche, la zone 1 de Cap Cantin à Cap Boujdor et la zone 2 de Cap Boujdor à Cap Blanc (Figure 1).

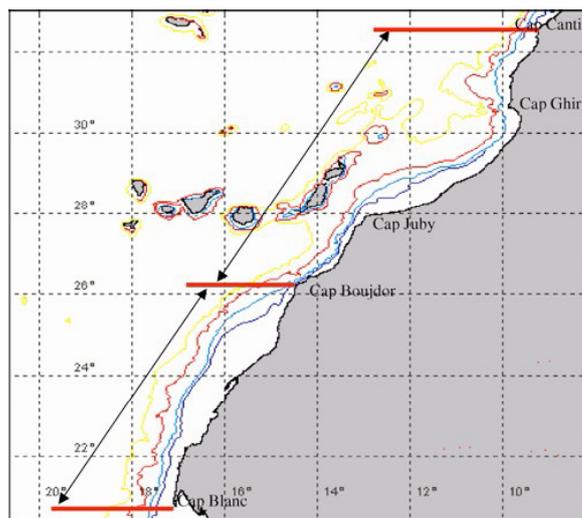


Figure 1. Présentation des deux zones de pêche le long de la côte marocaine, zone 1 entre Cap Cantin et Cap Boujdor et zone 2 entre Cap Boujdor et Cap Blanc (copyright INRH)

Le modèle prend en compte les stocks de sardines sur les deux zones n_1 et n_2 qui croissent selon une loi logistique avec un taux de croissance r_1 sur la zone 1 (resp. r_2 sur la zone 2) et une capacité limite K_1 (resp. K_2 sur la zone 2). La flotte de pêche est représentée par deux types de navires, les navires de petit tonnage (flotte côtière) qui ne peuvent pas changer de zone de pêche et des navires de fort tonnage qui peuvent se déplacer rapidement d'une zone à l'autre. L'effort de pêche des navires de la flotte côtière est représenté par la

variable E_1 sur la zone 1 (resp. E_2 sur la zone 2). L'effort de pêche des navires de grand tonnage est représenté par la variable e_1 sur la zone 1 (resp. e_2 sur la zone 2). a_1 est le taux de capture sur la zone 1 (resp. a_2 sur la zone 2). c_1 est le coût par unité d'effort de pêche sur la zone 1 (resp. c_2 sur la zone 2). p est le prix moyen d'une unité de biomasse de sardine capturée. m et \tilde{m} sont les taux de déplacement de la flotte de fort tonnage entre les deux zones de pêche. ε est un petit paramètre sans dimension qui traduit le fait que les déplacements des bateaux sont supposés être rapides par rapport à la reproduction du stock de poissons, sa capture et le renouvellement des flottes de pêche qui est supposé dépendre du bénéfice de la pêcherie. Le modèle fait l'hypothèse que si la pêcherie est rentable, les armateurs vont augmenter la flotte de cette pêcherie alors que dans le cas contraire, ils vont diminuer l'effort de pêche investi dans cette pêcherie.

$$\begin{aligned}\frac{dn_1}{d\tau} &= \varepsilon \left(r_1 n_1 \left(1 - \frac{n_1}{K_1} \right) - a_1 n_1 e_1 - a_1 n_1 E_1 \right) \\ \frac{dn_2}{d\tau} &= \varepsilon \left(r_2 n_2 \left(1 - \frac{n_2}{K_2} \right) - a_2 n_2 e_2 - a_2 n_2 E_2 \right) \\ \frac{dE_1}{d\tau} &= \varepsilon (-c_1 E_1 + p a_1 n_1 E_1) \\ \frac{dE_2}{d\tau} &= \varepsilon (-c_2 E_2 + p a_2 n_2 E_2) \\ \frac{de_1}{d\tau} &= (m e_2 - \tilde{m} e_1) + \varepsilon (-c_1 e_1 + p a_1 n_1 e_1) \\ \frac{de_2}{d\tau} &= (\tilde{m} e_1 - m e_2) + \varepsilon (-c_2 e_2 + p a_2 n_2 e_2)\end{aligned}\tag{1}$$

Il est possible d'appliquer la méthode d'agrégation des variables pour ce modèle et d'agréger le modèle précédent ce qui conduit au modèle suivant (2) :

$$\begin{aligned}\frac{dn_1}{dt} &= n_1 \left(r_1 \left(1 - \frac{n_1}{K_1} \right) - a_1 v_1^* e - a_1 E_1 \right) \\ \frac{dn_2}{dt} &= n_2 \left(r_2 \left(1 - \frac{n_2}{K_2} \right) - a_2 v_2^* e - a_2 E_2 \right) \\ \frac{dE_1}{dt} &= E_1 (-c_1 + p a_1 n_1) \\ \frac{dE_2}{dt} &= E_2 (-c_2 + p a_2 n_2) \\ \frac{de}{dt} &= e \left(-(c_1 v_1^* + c_2 v_2^*) + p a_1 v_1^* n_1 + p a_1 v_2^* n_2 \right)\end{aligned}\tag{2}$$

Dans ce modèle réduit, la flotte de fort tonnage est représentée par une variable agrégée $e=e_1+e_2$ qui représente la flotte totale de fort tonnage sur les deux zones. L'agrégation de variables résulte du fait qu'il existe un équilibre rapide stable pour le déplacement des bateaux avec une proportion de l'effort de pêche v_1^* sur la zone 1 et v_2^* sur la zone 2.

L'étude de ce modèle est en cours de réalisation. Mais, les premiers résultats analytiques montrent que dans ce modèle et selon les valeurs des paramètres du modèle :

- la pêcherie n'est pas viable,
- la pêcherie est rentable et l'exploitation du stock peut se faire durablement.

Tous les paramètres du modèle sont en cours d'estimation par l'INRH. Nous envisageons de rechercher des conditions sur les paramètres économiques du modèle tels que les coûts (taxes gouvernementales...), ou les paramètres déterminant la répartition des efforts de pêche sur les zones ainsi que les termes de capturabilité (qui pourraient être imposés par le gouvernement marocain), permettant de maintenir une activité de pêche rentable et optimale.

CONCLUSION

La présente étude analyse un aspect de la modélisation des pêcheries de sardines au Maroc. Divers modèles théoriques ont déjà été réalisés dans le cadre de la thèse de Mchich (Mchich *et al.*, 2002, 2005, 2006) et de la thèse de Charouki (Mchich *et al.*, 2006). Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'équipe du Professeur Raïssi de l'Université de Kénitra et portaient également sur l'utilisation des méthodes du contrôle optimal appliquées aux pêcheries marocaines.

Nous voulons également et avant tout mentionner les travaux que nous réalisons en collaboration avec l'équipe du Professeur Hassan Hbid de l'Université de Marrakech qui a initié la collaboration avec l'INRH dans le cadre de la thèse d'Azzedine Ramzi. L'IRD et l'unité de recherches 079 de l'IRD sont engagés dans une collaboration très active et de longue durée avec le LMDP (Laboratoire de Mathématiques et Dynamique de Populations) de Marrakech dont l'un des axes de recherche principal est constitué par l'étude et la modélisation des pêcheries au Maroc en collaboration avec l'INRH.

Par ailleurs, l'INRH possède également des données sur une dizaine d'années concernant la distribution en classe de taille des sardines échantillonnées le long de la côte marocaine. Une thèse est actuellement en cours avec monsieur Mansour Serghini, chercheur de l'INRH, sur ce sujet. Ce travail a pour but de réaliser des modèles de type Leslie spatialisés permettant de prendre en compte la structure démographique des espèces exploitées.

Les méthodes d'agrégation de variables continuent à donner lieu à des travaux de mathématiques dans les systèmes d'équations aux dérivées partielles (Arino *et al.*, 2000) et dans les équations à retard (Sanchez *et al.*, 2006).

RÉFÉRENCES

- Arino O., Sanchez E., Bravo de la Parra R. & Auger P. (1999) A model of an age-structured population with two time scales. *SIAM J Appl. Math.*, 60: 408-436
- Auger P., Bravo de la Parra R. (2000) Methods of aggregation of variables in population dynamics. *CR. Acad. Sci.*, 323: 665-674
- Auger P. & Roussarie R. (1994) Complex ecological models with simple dynamics : From individuals to populations. *Acta Biotheoretica*, 42: 111-136.
- Auger P. & Poggiale J.C. (1996) Emergence of population growth models: fast migration and slow growth. *J. Theor. Biol*, 182 : 99-108
- Auger P. & Poggiale J.C. (1998) Aggregation and emergence in systems of ordinary differential equations. *Math. Comput. Modelling*, 27(4) : 1-21
- Bravo de la Parra R. & Sanchez E. (1998) Aggregation methods in population dynamics discrete models. *Math. Comput. Model*, 27: 23-39
- Bravo de la Parra R., Sanchez E., Arino O. & Auger P. (1999) A discrete model with density dependent fast migration. *Math. Biosci.*, 157 : 91-109
- Bravo de la Parra R., Sanchez E. & Auger P. (1995) Aggregation methods in discrete models. *Journal of Biological Systems*, 3/2 : 603-612
- Caswell H. (2001) Matrix population models: construction, analysis, and interpretation, 2nd Ed. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts.
- Iwasa Y., Andreasen V. & Levin S.A. (1987) Aggregation in model ecosystems I. Perfect aggregation. *Ecol Model*. 37: 287-302
- Iwasa Y., Levin S.A. & Andreasen V. (1989) Aggregation in model ecosystems II. Approximate aggregation. *IMA. J. Math. Appl. Med. Bio*. 6 : 1-23
- Mchich R., Auger P., Bravo de la Parra R. & Raïssi N. (2002) Dynamics of a fishery on two fishing zones with fish stock dependent migrations Aggregation and control. *Ecological Modelling*, 158: 51-62
- Mchich R., Auger P. & Raïssi N. (2005) The stabilizability of a controlled system describing the dynamics of a fishery. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Biologies*. 329 : 337-350
- Mchich R., Charouki N., Auger P., Raïssi N. & Ettahiri O. (2006) Optimal spatial distribution of the fishing effort in a multi fishing zone model. *Ecological Modelling*, 197(3/4) : 274-280

Poggiale J.C. & Auger P. (1995) Perturbations of the classical Lotka-Volterra System by Behavioral Sequences. *Acta Biotheoretica*, 43 : 27-39

Sanchez E., Auger P. & Bravo de la Parra R. (1997) Influence of individual aggressiveness on the dynamics of competitive populations. *Acta Biotheor*, 45: 321-333

Sanchez E., Bravo de la Parra R., Auger P. & Gomez-Mourelou P. (2006) Time scales in linear delayed differential equations. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 323 : 680-699

Sanz L. & Bravo de la Parra R. (1999) Variables aggregation in a time discrete linear model. *Math. Biosci.*, 157: 111-146



FINANCE STOCHASTIQUE ET GESTION DU RISQUE

Youssef OUKNINE

Université Cadi Ayyad, Marrakech
Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

1. INTRODUCTION

La finance stochastique est une activité en pleine expansion. L'émergence de nouveaux produits bancaires, actuaires, boursiers... complexes où intervient l'aléatoire et, par suite, le risque, appelle à construire des théories complexes qui nécessitent des mathématiques sophistiquées à même de répondre à la complexité du réel.

Actuellement, bien des instituts de recherche et développement ainsi que des laboratoires de recherches travaillent d'arrache pied pour suivre l'évolution du domaine.

Les pays, comme le Maroc, ont grandement besoin de suivre et contribuer à cette évolution de la finance qui se mondialise de jour en jour.

L'objectif de cette présentation est de fournir quelques éléments pour se faire une idée sommaire sur ce nouveau champ de connaissance. Après quelques rappels historiques, on présentera en détail un modèle célèbre utilisé dans toutes les places boursières, à savoir le modèle de Black et Scholes.

Dans la préface de son ouvrage, sur les éléments d'économie politique pure ou théorie de la richesse, publié à Lausanne en 1900, Léon Walras écrit :

"Toute cette théorie est une théorie mathématique, c'est-à-dire que si l'exposition peut s'en faire dans la langue ordinaire, la démonstration doit s'en faire mathématiquement" et il ajoute plus loin, "Il est à présent bien certain que l'économie politique est, comme l'astronomie, comme la mécanique, une science à la fois expérimentale et rationnelle".

L'introduction des mathématiques dans une théorie est généralement perçue comme signe de rigueur, de quantification et d'exactitude...

On peut toujours soutenir une chose et son contraire tant que ce n'est pas quantifiable.

2. HISTORIQUE

Louis Bachelier (1900) soutient une thèse qui conclut que "La bourse ne croit ni à la hausse ni à la baisse". Ce qui explique la nature aléatoire de la bourse. D'un autre côté, Brown (XIX) découvre le mouvement brownien; viennent ensuite Einstein & Smoluchovski (1906) puis Norbert Wiener (1926-1930) (l'intégrale de Wiener vue comme bénéfice du trader) et surtout Kioshi Ito (1945-1960) (Prix Gauss, 2006) développe sa théorie de "Calcul stochastique de Ito" qui a été l'origine du modèle de Black-Scholes-Merton (1973) (Prix Nobel d'économie en 1997) et qui a joué le rôle de véritable big-bang dans le domaine de la finance mathématique.

La contribution de ces auteurs a permis d'élaborer de nouveaux produits tels que :

- Dérivés de taux d'intérêts
- Dérivés de crédit
- Dérivés climatiques...

En finance il n'y a pas de limite à la créativité, tant qu'il y'a un vendeur, un acheteur et un inventeur de contrat.

3. LE MODÈLE DE BLACK & SCHOLES

Plaçons nous dans le cadre d'un marché financier comportant deux actifs:

- un actif risqué (action)
- un actif sans risque (obligation) de rendement r définissant le taux d'intérêt sans risque (exemple : obligation convertible).

3.1. Principales hypothèses du modèle Black & Schole

3.1.1. Hypothèse 1 (Hypothèse fondamentale de la finance)

Absence d'opportunités d'arbitrage (AOA) : un arbitrage est un moyen de gagner de l'argent sans prendre de risque. Partant d'un coût initial nul, Il est impossible d'acquérir une richesse certaine dans une date future quoiqu'il arrive. (On n'a rien pour rien). C'est grâce à cette hypothèse que l'on détermine de façon exacte le prix des options (option européenne, américaine, asiatique, exotique...)

3.1.2. Hypothèse 2

Le rendement de l'actif risqué S est caractérisé par une tendance ($\mu\Delta t$) et une composante aléatoire modélisée par un mouvement brownien ($\sigma\Delta W_t$) ; plus la volatilité σ est grande plus la composante aléatoire est importante.

Le modèle associé est donc pour une variation infinitésimale du rendement :

$$dS_t/S_t = (\mu dt + \sigma dW_t)$$

où (W_t) est un mouvement brownien ; μ la tendance et σ la volatilité sont des constantes. (Le processus de prix suit une loi log-normale).

3.1.3. Hypothèse 3

Le taux d'intérêt de l'actif non risqué est constant dans le temps (les taux d'emprunt et de prêt sont égaux).

3.1.4. Hypothèse 4

Il n'y a pas de coût de transactions ou de taxes.

3.1.5. Hypothèse 5

La cotation des actifs se fait en temps continu (on peut exercer en temps continu).

3.2. Formule de Black et Scholes

Il s'agit de la célèbre formule qui donne le prix d'un "call européen".

Si on considère une option européenne d'achat de prix d'exercice K et de maturité T , alors son prix C_0 à l'instant 0 est :

$$C_0 = E^*[\exp(-rT) (S_T - K)^+]$$

où l'espérance mathématique est prise par rapport à la probabilité risque neutre.

3.2.1. Prix explicite d'un Call européen à l'instant t

$$C = SN(d_1) - K e^{-r(T-t)} N(d_2)$$

Où

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r + \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}$$

et

$$d_2 = \frac{\ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}$$

• Volatilité stochastique

La volatilité est le paramètre clé en finance car elle sert à mesurer le risque associé au rendement de l'actif sous jacent.

Contrairement au modèle de Black & Scholes qui considère la volatilité constante, les observations réelles au sein des marchés changent de façon aléatoire avec le temps et varient aussi en fonction du prix d'exercice (Strike).

Dans le cadre du modèle de Black & Scholes tous les paramètres sont connus (K, T, t) ou observables (S, r) sauf la volatilité qui doit être estimée. Pour ce faire, on peut citer deux approches :

- se servir des méthodes empiriques utilisant des données historiques sur les cours (d'ouverture, de fermeture, le plus haut...); c'est la volatilité historique;

- Utiliser des méthodes implicites basées sur l'observation des prix des options et des cours des sous-jacent; c'est la volatilité implicite.

• Volatilité historique

Cette méthode utilise les estimateurs standards de la variance par unité de temps du logarithme du cours du sous-jacent, qui suit un mouvement brownien avec dérive.

On utilise des données régulièrement espacées de δ et on introduit :

$$S_{(j+1)\delta} = S_{j\delta} e^{\mu\delta - \sigma(W_{(j+1)\delta} - W_{j\delta})}$$

On pose

$$\tilde{\mu}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \ln\left(\frac{S_{(j+1)\delta}}{S_{j\delta}}\right)$$

$$\tilde{\sigma}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \left(\ln\left(\frac{S_{(j+1)\delta}}{S_{j\delta}}\right) - \tilde{\mu} \right)^2$$

$\tilde{\sigma}_n$ observé est l'estimateur de σ appelé volatilité historique

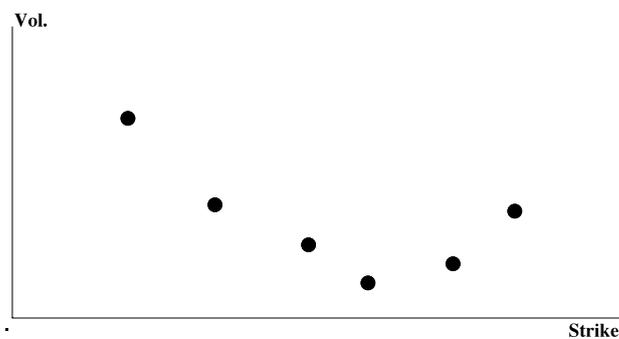
• Volatilité implicite

La volatilité implicite est obtenue en inversant la formule qui donne le prix du Call, c'est à dire qu'à un prix du Call et à un niveau de cours donnés, on associe la valeur de σ , qui introduite dans la formule de Black & Scholes, donne comme prix celui du Call observé sur le marché.

$$C^{\text{obs}}(t, x, T, K) = C^{\text{BS}}(t, x, T, K, \sigma^{\text{impl}})$$

• Smile de la volatilité

On peut calculer à partir des prix de calls de même maturité, et de prix d'exercice différents, les valeurs de la volatilité implicite. Son graphe est représenté par une courbe convexe assez caractéristique que l'on appelle le Smile de volatilité :



3.3. Imperfections du modèle de Black et Scholes

- Le modèle de Black & Scholes repose sur des hypothèses qui ne sont pas valables sur les marchés. En pratique il y a des coûts de transactions et la vente à découvert n'est pas autorisée sans limite.
- Queues épaisses ou excès du Kurtosis:

Les études empiriques ont montré que le prix de l'actif sous-jacent subit des fluctuations larges et soudaines contrairement au modèle de B. & S. où les lois sont gaussiennes. Ce phénomène est expliqué par la notion de l'excès du Kurtosis (ou queues épaisses). C'est la raison principale pour faire des modélisations avec des processus avec sauts.

Afin de mesurer le comportement de ces queues épaisses on fait appel au Kurtosis qui est défini par :

$$\frac{E[(X - \mu_X)^4]}{\text{Var}[X]^2}$$

Kurtosis

- Pour la distribution normale (mesokurtic) ; le Kurtosis vaut 3.
- Si la distribution a un sommet aplati (platykurtic) ; le Kurtosis est inférieur à 3.
- Si la distribution a un sommet aigu (leptokurtic) ; le Kurtosis est supérieur à 3.

3.4. Les gros défauts du Modèle de Black et Scholes

- Les taux d'intérêts ne sont pas constants, existence d'une structure par terme des taux d'intérêts
- Choisir suivant la maturité de l'option, le bon taux.
- La volatilité n'est pas constante dans le temps, existence d'une structure par terme de la volatilité
- La volatilité n'est pas constante suivant les strike: existence de smile de volatilité

Pourtant ce modèle continue à être utilisé par les opérateurs de marchés, en raison de sa simplicité à implémenter (tous les paramètres sont connus).

Il existe, bien entendu, d'autres modèles moins utilisés en raison de l'implicité des paramètres qu'ils font intervenir.

4. CONCLUSION

De nos jours, de nouveaux produits bancaires avec des concepts de base très différents font apparition sur des places financières tels, la Malaisie, les pays du golfe. La notion de « taux d'intérêt » cède la place à celle de "partage du risque", cela donne lieu à une

panoplie de nouveaux produits parfois dits "islamiques". La finance stochastique sera appelée à jouer un rôle de première importance tant pour les investigations que pour l'usage courant de ces nouveaux produits. Le Maroc est bien placé pour contribuer au développement de ce genre de recherches. La formation de cadres de haut niveau est à la portée. Il suffit de s'y mettre.

5. RÉFÉRENCES

Bouleau N. (2005) Mathématiques financières sans larmes CIREC

Jouini E. (1998) Mathématiques et finance, Matapli, *revue de la SMAI*

Musiela M., M. Rutkowski. Martingale Methods in Financial Modelling, *Applications of Mathematics* 36, Springer



DESIGN FOR SUSTAINABILITY / LIFE CYCLE ENGINEERING

Daoud AIT-KADI

Faculty of Science & Engineering, Université Laval
Resident member of the Hassan II Academy of Science and Technology

1. INTRODUCTION

Product design and manufacture in the 21st century will inevitably require the consideration of sustainable product/process design and its implementation within manufacturing systems. A paradigm shift from the traditional approach of only attending to functionality, cost and time-to-market to an integrated environmentally and socially conscious design and manufacturing approach is occurring. These changes are hastened by new environment-friendly legislations adopted in Europe and by the United Nations Agencies. For example, the European Parliament agreed on 11 October 2002 on a Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment (2002/96/EC) and on a Directive on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (2002/95/EC).

The Directives entered into force on 13 February 2003, when they were published in the Official Journal. As a consequence, the product responsibility of manufacturers of electrical and electronic equipment that is required by the provisions is of central importance. In accordance with this, the Member States have to ensure that the manufacturers set up systems for the treatment and recovery of all waste equipment within given deadlines, that they comply with the set recovery targets (quotas) and that they assume responsibility for financing the collection at least from the return points as well as for the treatment, recovery and environmentally sound disposal. This also includes a very important provision on the obligation of manufacturers to guarantee the financing of a final disposal of equipment before they place a new product on the market.

Moreover, the strongest push towards change comes from customers who are becoming increasingly aware of their power in the marketplace and are increasingly exercising product choice, taking into account such factors as product functionality, usability, appearance, environmental impact and social cost (Charter & Tischner, 2001).

Therefore, the new era of product design and manufacturing will require greater knowledge and integration of life-cycle, sustainable product/process designs and their implementation in manufacturing engineered products. This will apply to both consumer products (high volumes and small varieties) and highly customized products (low volumes and large varieties). This paradigm shift in product design and manufacturing requires optimized methodologies incorporating environmentally conscious, energy-efficient, hazard-free, lean manufacturing methods involving human interfaces with product maintenance, disassembly, recycling and re-manufacturing considerations. It promotes systems thinking in the design of new products and processes and calls attention to the interests of all stakeholders in our living environment. It requires devising new design methodologies, manufacturing processes, and enterprise resource planning in order to simultaneously achieve the multiple objectives of improving a company's profitability, bringing new products to market rapidly, conserving natural resources, and attending to environmental compatibility, thus providing a sustainability balance.

Addressing those issues requires the consideration of many aspects such as: toxic materials, waste and wastewater, emissions and greenhouse gases, energy usage, material and product recycling, people's health and safety, ethics, ecology and biodiversity. Furthermore, at the core of all these matters are people-people with different values, goals and needs, and people from different backgrounds and generations. The development of an environmental-economical-social strategy needs to address all of these questions and translate their results into an effective course of actions.

Life cycle engineering (LCE) has emerged as an efficient approach to address the central long-term dilemma of manufacturing: how to achieve economic growth while protecting the environment? The conflict is fundamentally rooted in:

- the materials conversion process, which takes from the earth and gives to the customer,
- the economical expectations of the stockholder and those who make a living or derive support from this enterprise,
- the consumerism, which focuses on current needs often with disregard for the future in terms of social and environmental aspects. The resolution of this conflict is a serious issue for the society to address or in the near future it will threaten its well-being and even survival. The key question then for manufacturers is how to incorporate both economical, social and environmental concerns and interests into their business operations.

In general, companies develop strategies that are compatible with their national strategies, while multinational companies need to respond to the strategies of many countries. However, it seems that many people in manufacturing sector are not yet aware of the potential magnitude of the effect that the environment will have on their business.

Therefore, much need to be done to inform manufacturers and the public, and to educate university students. Future engineers need both more depth and more breadth in terms of environmental issues. This can only happen with the generation of new knowledge that can symbolically represent the complex issues of LCE.

In conclusion, views on how products are going to be designed and manufactured have to change. Social and Environmental performance along with current economic concerns tend to address the new challenges for business in the near future. Increasing pressure from environmental legislations and market demands complete the scenario for new competitive game. As a consequence, companies must be prepared to improve their businesses performance towards sustainability.

2. LIFE CYCLE ENGINEERING

According to the European Commission (2001), in spite the “products are fundamental to the wealth of our society and the quality of life we all enjoy, the rising consumption of products is however, directly or indirectly, also at the origin of most of the pollution and depletion of resources our society causes”.

Hence, the linkage between products and environment impacts is completely clear. The more products we consume and dispose, the higher impact they will have on the environment. Thus remarkable reductions on the current levels of environment impacts are one of the prerequisites for sustainability, the reduction of product related environment impacts play essential role toward sustainability, and Life Cycle Engineering (LCE) deals exactly with this challenge.

In essence, all products, services, and processes have a life cycle. For products, the life cycle begins when raw materials are extracted or harvested. Raw materials then go through a number of manufacturing steps until the product is delivered to a customer. The product is used, then disposed of or recycled, reused or remanufactured.

As a consequence, current product development in industry should be a multi-faceted activity, often characterised by a large organisational structure, based on the involvement of a lot of people, and a multitude of disciplines such as research & development, design, marketing, production and management.

Life Cycle Engineering (LCE) is defined as “a process to develop specifications to meet a set of performance, cost, and environmental requirements and goals that span the product, system, process, or facility life cycle” (Jeswiet *et al.*,). In line with that, Stuart & Sommerville (1998) state that LCE is a methodology centered on the design and production of products that have minimal environmental impact during their entire life cycle.

According with the United States Environmental Protection Agency (2006), the LCE process is an ongoing, comprehensive examination with the goal of minimizing adverse environmental implications throughout the life cycle providing means to:

- Communicate the relationship between environmental implications and engineering requirements and specifications
- Assess the environmental implications of alternatives, and
- Identify improvement opportunities throughout the life cycle.

LCE depends on understanding performance, cost, and environmental implications and translating them into engineering requirements, goals, and specifications (EPA, 2006). Hence, LCE deals with the challenge to fulfil the product-related human needs in line with the sustainable development principles based on the cycle economy perspective and competition approach.

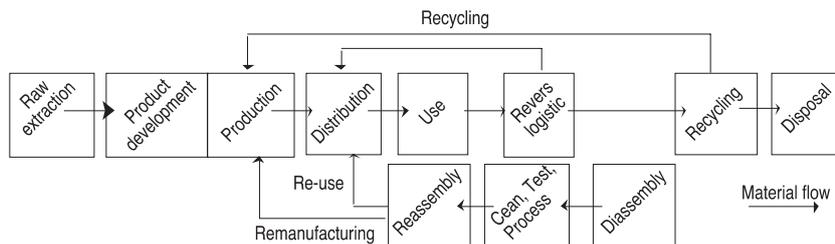


Figure 1. Life Cycle Engineering

As it can be seen in figure 1, LCE is concerned with the entire product life-cycle from raw material extraction to product disposal considering aspects such as product development, manufacturing, using, disassembling, re-using, recycling and remanufacturing. As a consequence, the life cycle embodies material and energy use and waste throughout four conceptual stages:

Stage 1. Material Production

Material production includes raw material extraction and processing. Raw material extraction involves all activities related to the acquisition of natural resources. This may include mining, non-renewable material and harvesting biomass. Material processing is related to the processing of raw material by reaction, separation, purification, and alteration steps in preparation for the manufacturing stage.

Stage 2. Manufacturing

Manufacturing involves the creation of parts and their assembly into the products.

Stage 3. Use, Support and Maintenance

At this stage, products, systems, processes and facilities are used, maintained, and repaired.

Stage 4. Disassembling and Material Recovery Strategies and Disposal

At the end of their life, products are disassembled and their parts and components are cleaned and selected for re-use, recycling and remanufacturing. That will depend on the most suitable recovery strategy to be used in each case.

By analyzing the product's life cycle, it is possible to eliminate or reduce the environmental impacts when looking at each process associated. As stressed by Hauschild *et al.* (2005) "LCE is a conglomeration, which includes many topics, it is engineering work, which includes product design, manufacture, profitability, social impact and the environment". This means that LCE is related to many aspects from environmental protection (in a broader view) up to product life cycle or design for environment (in a closer view) as proposed in figure 2.

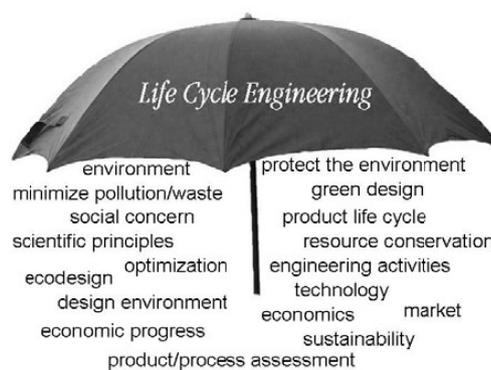


Figure 2. Life Cycle Engineering related keywords (Haushild *et al.*, 2005)

As a consequence, Life Cycle Engineering provides benefits in a number of areas. These include tangible benefits in the form of reduced environmental burdens at the location where the primary activity takes place. However, by understanding the whole life cycle, the engineering team can often identify and realize additional benefits upstream in the supply chain and downstream in customer organizations or during end-of-life management. Many times these situations are positive both within the decision-making organization and outside of it.

Many practitioners of LCE find that environmental impact reduction and cost savings are not mutually exclusive. Even when the benefits occur in supplier or customer organizations, it is possible to negotiate shared savings in the form of price reductions for raw materials or waste handling, as an example. The key to providing incentives for the LCE team is finding ways to recognize and reward their efforts to realize the benefits of LCE regardless of where they occur. In order to do this, it may be necessary to catalogue the external benefits using measures other than monetary indicators.

REFERENCES

- Charter M. & Tischner U. (2001) "Sustainable Product Design" *in*: Charter, M. & Tischner, U. (Editors) "Sustainable Solutions -Developing Products and Services for the future" Greenleaf Publishing, Sheffield, UK, 2001]

Commission of the European Communities (2001) COM 68 final. Green paper on integrated product policy. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2001/com_2001_0068en01.pdf

EPA (2006) Environmental Protection Agency Handbook.

Hauschild M., Jeswiet J. & Alting L. (2005) From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. *Annals of the CIRP* 54/2

Jeswiet J., Dufloy J., Dewulf W., Luttrup C. & Hauschild M. A Curriculum for Life Cycle Engineering Design for the Environment. 1st Annual CDIO Conference

Stuart J. A. & Sommerville R. M. (1998) Materials selection for life cycle design. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, Oak Brook, IL, 4 – 6 May, pp. 151 – 157



MÉTHODES MATHÉMATIQUES POUR LE MARCHÉ FINANCIER MAROCAIN

Ali ALAMI IDRISSE

OPTIMA FINANCE Consulting, Casablanca, Maroc

Le système financier se compose de cinq principaux acteurs: marchés financiers, institutions financières, ménages, entreprises et administrations, assure le rôle moteur entre l'épargne et l'investissement. Les différents acteurs interagissent entre eux. Les ménages, à titre d'exemple, disposent d'une épargne qu'ils placent auprès des banques sous forme de dépôts à vue ou de dépôts à terme, et auprès des compagnies d'assurance sous forme d'épargne retraite. Ils placent également une partie de leur épargne sur les marchés financiers en achetant des actifs cotés et assurent également à travers le paiement des taxes et impôts des ressources aux administrations. Les institutions financières - établissements de crédit, compagnies d'assurance et organismes de prévoyance -, quant à elles, mobilisent l'épargne publique et financent l'Etat (en achetant des bons du Trésor), financent directement les entreprises pour leurs projets d'investissement et de développement et interviennent également sur les marchés financiers -financement indirect des entreprises-. Ainsi, le système financier assure le rôle de transfert de l'épargne vers l'investissement et assure également un autre rôle aussi fondamental qui est celui de transfert et de mutualisation des risques entre les acteurs économiques.

1. ÉVOLUTION DE LA THÉORIE FINANCIÈRE

La théorie de la finance a connu une profonde mutation durant les trois dernières décennies. Trois principaux facteurs y ont largement contribué:

- **l'environnement économique-financier** a connu pendant les années 70 et 80 un véritable bouleversement lié à des chocs macro-économiques et à des changements dans les politiques économiques: le passage d'un système de taux de change fixe à un système de taux de change flottant en 1971, les deux crises pétrolières de 1973 et 1979, la libéralisation des économies et la mondialisation des échanges, l'augmentation de la concurrence, les vagues de déréglementation, la très forte instabilité et variabilité des taux d'intérêt. Ces différents facteurs ont engendré une recrudescence des risques qui a poussé les agents économiques à chercher des produits et des instruments de couverture. Les institutions financières ont alors commencé à commercialiser de nouveaux produits financiers (produits dérivés) répondant ainsi à la demande croissante en matière de couverture des risques. Seulement, ces nouveaux produits -qui n'étaient pas encore totalement maîtrisés- ont eux-mêmes généré de nouvelles sources de risques inconnues jusqu'à cette date. Cette augmentation «incontrôlée» des risques a généré de nombreuses

catastrophes et faillites financières. à titre d'exemples : la faillite de près de 500 caisses d'épargne américaines (les savings&loans) pendant les années 80, la perte de \$1,7 milliard de l'Organe County (Comté californien) en 1994, la faillite de la Barings en 1995, la faillite de sept des dix principales compagnies d'assurances japonaises à la fin des années 90... et la liste est malheureusement très longue. Cette série de catastrophes financières a eu pour principale conséquence une prise de conscience générale sur la complexité des risques, de leur interdépendance et sur la nécessité de mettre en place des dispositifs et des mécanismes pour les gérer. Cette prise de conscience a concerné aussi bien les acteurs économiques que les autorités de tutelle.

En effet, les établissements de crédit, les compagnies d'assurance et les organismes de prévoyance ont mesuré l'impact d'une mauvaise gestion des risques et l'émergence de nouveaux types de risques induits par certains contrats (de crédit, d'assurance-vie...) et liés à la présence d'options cachées (remboursement anticipé, possibilité de passer d'un taux fixe à un taux variable, clauses de rachat,...). Ces établissements ont rapidement mis en place des structures de risques, chargées d'identifier, de mesurer et de gérer les différents types de risques.

Les autorités de tutelle ont elles aussi mesuré l'impact de ces risques sur la stabilité du système financier et de l'économie de manière générale. Elles ont instauré un cadre réglementaire strict et des règles prudentielles pour le secteur bancaire et celui des assurances et de la prévoyance sociale. Des comités et des organismes internationaux et supranationaux -CE- ont vu le jour. Ils ont été chargés d'établir des recommandations pour une meilleure efficacité et sécurité du système financier: Bâle II, Solvency II, CAD 3 – Directive européenne-...

La mise en place de dispositifs de gestion et de couverture des risques a été favorisée par le développement et la diversité des nouveaux produits financiers (dérivés), à partir de la fin des années 80 notamment, qui offraient une solution efficace et flexible de transfert et de mutualisation des risques.

- **Les avancées conceptuelles en théorie de la finance.** Jusqu'en 1960, et si l'on excepte les travaux de Bachelier¹ (1900), le recours aux mathématiques en finance était très limité et les méthodes utilisées étaient élémentaires. Ce n'est qu'à partir des années 60 avec les travaux de Markowitz² (1959) sur l'optimisation de portefeuille, de Sharpe³ (1964) et Linter⁴ (1965) sur la détermination de modèles d'évaluation des actifs financiers, de Black & Scholes⁵ (1973) et de Merton⁶ (1973) sur le pricing d'options, que l'on a commencé à avoir recours à des méthodes mathématiques plus sophistiquées dans la modélisation des problèmes financiers. Ces auteurs pionniers ont mis en place des

¹ L. Bachelier, "Théorie de la spéculation", Ann. scientifiques de l'ENS, (1900)

² H. Markowitz, "Portfolio selection", Journal of Finance Marsh 1959 77-91

³ W. Sharpe, "Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk", Journal of Finance, september 1964, 725-742

⁴ J. Linter, "The valuation of risk assets and the selection of risky investments in stock portfolio and capital budgets", The Review of Economics and Statistics, February 1965, 13-37

⁵ F. Black & M. Scholes, "The pricing of options and corporate liabilities", Journal of Political Economy, S1, 637-654 (1973)

⁶ R.C. Merton "Theory of rational option pricing", Bell Journal of Economics and Management Science, 4, 141-183 (1973)

concepts et des principes d'analyse qui ont servi de référence pour le développement de la théorie financière. Nous pouvons citer le critère (rentabilité, risque) ou paradigme (moyenne, variance) ou encore le -très important- concept de l'absence d'opportunité d'arbitrage (AOA) sur lequel se base une partie importante de la finance moderne. Selon ce principe, dans un marché efficient, il n'est pas possible de réaliser des gains sans prendre de risque, ce que les anglo-saxons qualifient de principe de «No free lunch».

- **Les progrès en matière de technologies de l'information** qui ont largement facilité l'accès et la manipulation de larges bases de données. Ils ont également permis de réduire de manière très significative les coûts des transactions favorisant ainsi l'augmentation des échanges.

Ces trois facteurs ont été déterminants dans le développement de la théorie de la finance moderne.

Il y a lieu d'insister encore une fois sur cette forte demande des établissements financiers, à partir de la fin des années 70 aux US et des années 80 en Europe, pour les nouveaux produits financiers (produits dérivés ou "Derivatives") afin de couvrir leurs expositions aux risques. Quelles sont donc les particularités de ces produits ?

Les produits dérivés sont des instruments financiers dont la valeur dépend de celles d'autres variables aléatoires sous-jacentes. Ces variables aléatoires peuvent être des prix des actions, des taux d'intérêt, des taux de change, des indices, des prix de matières premières...

Il est possible de classer les produits dérivés en quatre familles : i) les contrats à terme (forwards / futures), ii) les swaps, iii) les produits optionnels (options) et iv) les produits dérivés structurés. Malheureusement, nous n'avons pas le temps de détailler les caractéristiques et les propriétés de ces différentes classes d'actifs et je donnerai juste un exemple illustratif d'une option d'achat, qui est l'un des produits optionnels les plus utilisés.

Une option d'achat (appelée « call ») est un actif financier conditionnel qui donne à son détenteur le droit, mais non l'obligation, d'acheter un actif (financier ou physique) déterminé, appelé l'actif support (ou sous-jacent) à un prix convenu à l'avance (prix d'exercice) à une date déterminée⁷ (appelée maturité). Pour acquérir ce droit, l'acheteur doit payer au vendeur une prime qui dédommagera ce dernier de son obligation éventuelle de livrer le titre si l'acheteur l'exige.

Prenons l'exemple d'un gestionnaire d'actifs qui voudrait acquérir l'action ONA dans 3 mois. Il craint cependant une hausse du prix de l'action ONA et voudrait se couvrir contre ce risque de hausse du prix. A l'instant t_0 , le prix de l'action ONA est de 1600 Dhs. Le gestionnaire, pour se couvrir, va acheter -moyennant une prime- une option

⁷ C'est la définition d'une option européenne. Si l'acheteur peut acheter l'actif à n'importe quelle date jusqu'à la maturité, l'option est dite américaine.

d'achat sur l'action ONA à 1750 Dhs (par exemple) de maturité 3 mois ; i.e. qu'il achète le droit d'acheter l'action ONA à 1750 Dhs dans 3 mois. à la date de maturité ($T = 3$ mois), le gestionnaire va observer le prix du titre sur le marché:

- si le prix de l'action ONA est supérieur à 1750 Dhs, le gestionnaire va exercer son option, i.e. exiger du vendeur de lui céder le titre ONA à 1750 Dhs
- si le prix de l'action ONA est inférieur à 1750 Dhs, le gestionnaire abandonnera l'option, et achètera l'action directement sur le marché.

Il est possible de faire le raisonnement symétrique pour un gestionnaire d'actifs (d'une caisse de retraite par exemple) qui aurait dans son portefeuille des actions et craindrait une baisse éventuelle de leur prix et donc de la valeur de son portefeuille. Pour se couvrir le gestionnaire achèterait une option de vente (appelée "put"⁸). Cet exemple très simple illustre une façon de couvrir le risque "action". Il est possible de couvrir d'autres types de risques : taux d'intérêt, change, crédit, prix de matières premières,... ou encore une combinaison quelconque de ces risques⁹. Il est bien évident que dans ce dernier cas le type de produits dérivés à mettre en place pour la couverture ne serait pas aussi simple que dans l'exemple précédent.

Nous voyons donc l'importance et l'intérêt indéniable de ce type d'instruments pour la couverture des risques. Ce qui justifie l'engouement toujours croissant des banques, compagnies d'assurances mais aussi d'entreprises industrielles et commerciales pour ce type de produits.

Les produits dérivés occupent aujourd'hui une place importante dans le paysage financier international, et connaissent depuis une décennie une croissance moyenne annuelle qui avoisine les 30%, comme le montrent les tableaux 1 et 2.

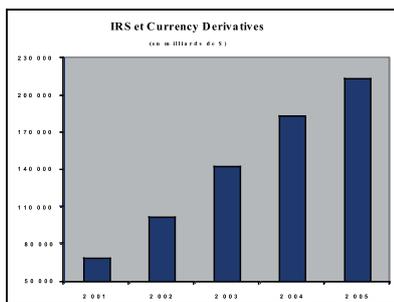


Tableau 1

Source ISDA

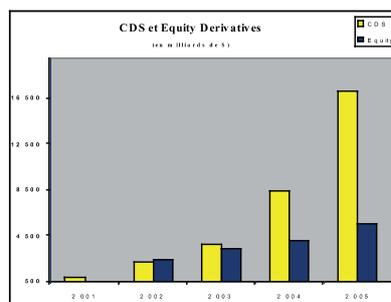


Tableau 2

Source ISDA

⁸ Une option de vente est un actif financier conditionnel qui donne à son détenteur le droit, mais non l'obligation, de vendre un actif (financier ou physique) déterminé, appelé l'actif support (ou sous-jacent) à un prix convenu à l'avance (prix d'exercice) à une date déterminée (appelée maturité).

⁹ Les produits dérivés sont également utilisés par les opérateurs pour des fins de spéculation et d'arbitrage.

Les montants des nominaux sur lesquels portent ces instruments sont donnés dans le tableau 3. Ils traduisent l'importance des volumes de transactions :

Tableau 3. Montants des nominaux

Produits dérivés	en milliards de \$ US
Dérivés de taux (swaps et options)	250 800
Dérivés de crédits	26 000
Dérivés des actions	6 400

Source: ISDA 2006 S1

En acquérant une option, l'acheteur a tout simplement transféré une partie (ou la totalité) de son exposition au risque au vendeur. Pour ce faire, l'acheteur a payé d'une prime. Se pose alors deux problématiques pour le vendeur :

- comment déterminer le montant de cette prime ? c'est le problème de valorisation (pricing)
- comment gérer (ou couvrir) la vente de cette option ? c'est le problème de couverture (hedging)

2. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE EN FINANCE

Afin de répondre aux deux problématiques précédentes (pricing et hedging) il est nécessaire de procéder à une modélisation. De manière générale, la modélisation mathématique en finance a pour principaux objectifs de:

- comprendre les processus d'évolution des prix et des taux d'intérêt, et essayer de prévoir leur évolution dans les cadres univarié et multivarié -portefeuilles – avec intégration des interactions¹⁰
- comprendre la dynamique des processus de volatilité, de sorte à prévoir la flambée des cours, les crises
- valoriser les actifs financiers et tarifier les contrats
- quantifier les expositions aux risques individuelles et globales
- développer des stratégies de couverture
- mettre en place de nouveaux produits

Dès 1900, L. Bachelier s'était intéressé à la dynamique des prix des actions cotées à la Bourse de Paris :

"Il est possible d'étudier mathématiquement l'état statistique du marché à un instant donné, i.e. d'établir la loi de probabilité des variations des cours qu'admet à cet instant le marché..." Bachelier (1900), "Théorie de la spéculation".

¹⁰ Un des objectifs fondamentaux en modélisation est de connaître la dynamique des prix des actifs pris individuellement et celle de ces mêmes actifs pris conjointement (portefeuille). De nombreuses modélisations relient les deux premiers moments conditionnels (l'espérance de rentabilité et la variance) pour traduire l'idée qu'une augmentation des risques sera compensée par une augmentation de l'espérance de rentabilité.

En cela, Bachelier est considéré comme un précurseur et par certains comme le fondateur des mathématiques financières. Seulement, ses travaux ont été ignorés jusqu'en 1973, où furent publiés deux articles de recherche, celui de Black and Scholes "The pricing of options and corporate liabilities" et celui de Merton "Theory of rational option pricing". Ces articles ont donné naissance à la théorie de la finance moderne et ont été également un catalyseur pour la dynamisation des marchés financiers.

L'objectif n'étant pas ici d'aborder les aspects techniques, je me contenterai donc, à titre d'illustration, de trois exemples de modélisations communément utilisées en finance:

- Dans leur cadre d'analyse de l'évaluation des options, Black & Scholes (1973) ont retenu pour représenter la dynamique du prix de l'actif sous-jacent une équation différentielle stochastique :

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t \quad \text{Eq. [1]}$$

où S_t est le cours du sous-jacent en t , μ terme de tendance, σ volatilité du sous-jacent supposée constante et W_t est un mouvement brownien standard

En divisant l'équation [1] par S_t , ils décomposent le rendement de l'actif (sur un intervalle de temps dt) en un terme déterministe qui représente le rendement instantané espéré et un terme stochastique.

$$\frac{dS_t}{S_t} = \mu dt + \sigma dW_t \quad \text{Eq. [2]}$$

En notant $V_t = V(S, t)$ le prix de l'actif dérivé et en appliquant le lemme d'Itô ils arrivent à l'équation différentielle de "Black&Scholes" qui doit être vérifiée par le prix V_t de tout actif dérivé :

$$\frac{\partial V_t}{\partial t} + rS_t \frac{\partial V_t}{\partial S_t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_t}{\partial S_t^2} \sigma^2 S_t^2 = rV_t \quad \text{Eq. [3]}$$

Cette équation admet plusieurs solutions (selon les conditions aux bornes), tout dépend du type d'options à valoriser. Les différentes options se différencient alors par leur valeur terminale (payoff). Dans les cas simples, il est possible d'avoir des formules explicites mais pour des options plus complexes, le recours au calcul numérique ou aux simulations de Monte Carlo s'impose.

- L'évaluation de tout actif financier basé sur les taux d'intérêt (obligations, obligations convertibles, produits optionnels de taux, swaps de taux d'intérêt...) dépend de la structure par terme des taux d'intérêt retenue dans l'évaluation. La détermination de cette dernière est d'une importance capitale dans la bonne évaluation des produits. Plusieurs approches existent dans la littérature. Par exemple, Vasicek¹¹ (1977) utilise un processus d'Ornstein-Uhlenbeck dans la modélisation de la dynamique du processus de taux d'intérêt :

$$dr(t) = a(b - r(t))dt - \sigma dW_t \quad \text{Eq. [4]}$$

où a , b et σ sont constants.

Le modèle inclut une force de rappel vers un taux moyen d'équilibre (de long terme)

- Les deux exemples précédents se sont intéressés à la dynamique des prix en supposant le paramètre de volatilité constant. Or la variabilité de la volatilité joue un rôle central

en finance. Et bien que la variabilité de la volatilité des changements de prix d'actifs financiers ait été perçue depuis bien longtemps (Mandelbrot¹² (1963), Fama¹³ (1965)), ce n'est qu'en 1982 qu'Engle¹⁴ a introduit les processus ARCH (AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity) pour modéliser la dynamique des moments conditionnels d'ordre 2. Ces processus ARCH pour la dynamique de la volatilité, permettent d'exprimer la variance conditionnelle, à un instant donné, comme une fonction de l'information disponible à cet instant. Dans sa forme la plus simple, la modélisation ARCH suppose que la variance conditionnelle s'exprime comme une combinaison linéaire des carrés des innovations passées. Ces processus ARCH ont été généralisés par Bollerslev¹⁵ (1986), sous l'appellation GARCH (Generalized AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity), et ont été par la suite largement étudiés (et appliqués) dans la littérature statistique et financière.

Un processus GARCH(p,q) s'écrit :

$$\begin{aligned} y_t &= f(y_{t-1}, x_t) + \varepsilon_t \\ \varepsilon_t &= \sqrt{h_t} u_t \\ h_t &= \omega + \sum_{i=1}^p \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q \beta_j h_{t-j} \end{aligned} \quad \text{Eq. [5]}$$

Pour conclure, la finance moderne se base sur des méthodes mathématiques, statistiques et économétriques avancées. Ainsi, l'optimisation non linéaire, la programmation dynamique, le contrôle optimal -les équations de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB)-, l'analyse numérique, le calcul différentiel stochastique (Itô), les équations aux dérivées partielles -Feynman-Kac-,... sont autant de domaines mathématiques que l'on retrouve au centre des développements en finance. De même, les modèles et techniques statistiques et économétriques récents : classes de modèles GARCH, modèles de volatilité stochastique, modèles non linéaires, modèles factoriels, régressions multivariées, filtre de Kalman, simulations de Monte Carlo, ... trouvent un large champ d'applications en finance.

De nombreux mathématiciens et statisticiens se sont convertis à la finance. Leur apport théorique dans le domaine a trouvé la reconnaissance de la communauté scientifique internationale, en témoigne le nombre de prix Nobel en économie attribués durant les deux dernières décennies (Haavelmo (1989), Markowitz, Miller et Sharpe (1990), Scholes et Merton (1997), Mc Fadden et Heckman (2000), Engle et Granger (2003)). Cependant,

¹¹ O. Vasicek, « An equilibrium characterization of the term structure », *Journal of Financial Economics*, 5, 177-188, (1977)

¹² Mandelbrot B. (1963), «TheVariation of Certain Speculative Prices», *Journal of Business*, 36, pp 394-419.

¹³ Fama (1965), «The Behavior of Stock Market Prices», *Journal of Business* 38, pp 34-105.

¹⁴ Engle, R. F. (1982), « Autoregressive Conditional HeteroskedasticityWith Estimates of the Variance of U.K. Inflation », *Econometrica*, 50, 987-1008.

¹⁵ Bollerslev, T. (1986), «Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity», *Journal of Econometrics*, 31, 307-327.

une question importante mérite d'être posée : cet intérêt pour la modélisation mathématique en finance est-il seulement théorique ?

La réponse est "non". L'intérêt pour la modélisation mathématique a trouvé également un grand écho auprès des établissements financiers, compagnies d'assurances, caisses de retraite et fonds de pensions qui s'attachent de plus en plus les services des mathématiciens et statisticiens (et même des physiciens). En effet, la concurrence acharnée entre les établissements financiers et la complexité toujours croissante des produits proposés aux clients – de plus en plus avertis et exigeants – font que ces établissements doivent recourir à des modélisations mathématiques complexes et ne peuvent se permettre des erreurs de pricing et de couverture de leurs positions au risque d'essuyer des pertes très conséquentes. C'est ainsi que l'on trouve dans les salles de marchés étrangères et les départements d'ingénierie des établissements financiers une forte concentration d'ingénieurs et de chercheurs. Et de nombreux établissements ont opté pour des collaborations avec des laboratoires de recherche universitaires.

3. APPLICABILITÉ AU MARCHÉ FINANCIER MAROCAIN

Quid du marché marocain ? Sommes-nous concernés par cette évolution de la théorie financière et avons-nous besoin de ces produits dérivés et de ces modélisations mathématiques complexes ?

Le système financier marocain a connu de nombreuses évolutions durant les quinze dernières années : loi bancaire de 1993, instauration d'un marché des changes en 1996, démarrage effectif des OPCVM en 1996, mesures de dynamisation du marché financier, loi bancaire 2006... Ces évolutions ont permis aux intervenants et acteurs d'acquérir une certaine maturité. Les entreprises industrielles et commerciales, au même titre que les établissements financiers et les organismes d'assurance et de prévoyance sont conscients des risques encourus dans le cadre de l'exercice de leurs activités et ont une forte demande pour des produits (dérivés) de couverture.

Des produits dérivés (simples) existent déjà sur le marché marocain¹⁶ : les contrats à terme sur le marché des changes existent depuis 1996, les swaps de devises (2002), les contrats à terme pour la couverture contre le risque de fluctuations de certains produits de base (2004), les options de change (2004) et un marché à terme (produits de taux) organisé est prévu pour fin 2007.

Cependant, il est vrai que le marché des produits dérivés au Maroc est encore dans une phase embryonnaire, et ne pourra que se développer très rapidement. Les établissements financiers spécialisés seront amenés à proposer à leurs clients des produits structurés de couverture de plus en plus complexes (certains établissements ont déjà commencé) et basés sur des produits dérivés. La tarification de ces produits passe inévitablement par des modélisations mathématiques plus ou moins complexes. Les départements d'ingénierie et les salles de marchés marocaines n'auront d'autre choix que de faire appel à des ingénieurs maîtrisant parfaitement les méthodes mathématiques et statistiques. Il en va de la rentabilité et de la survie financière de ces établissements.

¹⁶ L'achat et la vente de ces produits sont soumis à la réglementation de Bank Al Maghrib



MODELISATION DES PROCEDES NON CONVENTIONNELS : APPLICATION AUX PROCEDES DE FABRICATION DU SUCRE ET DE TRANSFORMATION DES PHOSPHATES

Tijani BOUNAHMIDI

Laboratoire d'Analyse et Synthèse des Procédés Industriels (LASPI),
École Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat, Maroc
Membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Résumé

En vue de contribuer à l'amélioration de la compétitivité des secteurs des industries de transformation, de production de l'énergie à partir de combustibles fossiles, du dessalement de l'eau de mer et de traitement de l'eau potable et des eaux résiduaires, dont la contribution au PIB national est de l'ordre de 25%, le Laboratoire d'Analyse et Synthèse des Procédés Industriels (LASPI) de l'École Mohammadia d'Ingénieurs de l'Université Mohammed V-Agdal développe depuis plus de vingt ans des travaux visant la maîtrise et l'optimisation des procédés exploités par ces industries. La présente communication décrit les travaux effectués sur les procédés de fabrication de sucre et de transformation des phosphates qui correspondent à deux secteurs industriels d'une grande importance socioéconomique pour le Maroc et dont l'intérêt pour la recherche en Génie des Procédés est indéniable. Les résultats de ces travaux permettent de dégager une méthodologie rationnelle pour la modélisation des procédés non conventionnels. Ceux-ci étant relativement complexes et de phénomènes relativement peu connus, des efforts de recherche intenses ont été déployés pour atteindre cet objectif. Les travaux effectués ont été réalisés en collaboration étroite avec les secteurs industriels concernés. Le transfert des résultats vers ces secteurs a été réalisé grâce à cette collaboration qui a permis d'avoir un impact significatif mutuellement bénéfique. Les performances de plusieurs unités industrielles ont été optimisées ou améliorées, de même que le volume de travail effectué a permis la formation de plusieurs dizaines d'étudiants dans le cadre de préparation de mémoires de formation par la recherche. Un système de formation alternée a été mis en place au profit des élèves-ingénieurs du Département Génie des Procédés de l'EMI dans ce cadre. L'expérience vécue a mis en évidence des limitations structurelles pour la collaboration entre un laboratoire universitaire et les secteurs industriels. Celles-ci se reflètent dans la difficulté de pérenniser les effets des actions entreprises. Des recommandations sont proposées pour faire de cet axe de recherche non seulement un levier pour la compétitivité des secteurs industriels concernés, mais aussi une thématique de développement de savoirs et de technologies à même de rehausser le rayonnement scientifique et technologique du Maroc au niveau international, comme en témoignent certains travaux déjà effectués au LASPI .

INTRODUCTION

Selon une étude récente (1), le fait que le Maroc n'arrive pas à réaliser une forte croissance de ses exportations malgré les nombreuses mesures entreprises par les pouvoirs publics (simplification des procédures douanières, mise en place d'un système de financement favorable aux exportations, ajustement de la parité du dirham,...), ainsi qu'un change globalement favorable depuis avril 2001, est dû aux facteurs "hors coût" ou "hors prix" qui ont un effet sur l'amélioration de la qualité des produits par la technologie, alors que les autres facteurs précités sont des facteurs "coût" ou "prix". En effet, le positionnement au sein de l'économie mondiale dépend de plus en plus de sa "compétitivité technologique", c'est-à-dire de sa capacité d'innover ou d'utiliser des nouvelles technologies.

Malgré l'amélioration significative de la part des produits manufacturiers dans les exportations totales du Maroc, celle-ci reste inférieure de 9 points à sa valeur mondiale. Les importations manufacturières de l'Union Européenne vis-à-vis du Maroc, malgré leur augmentation ces dernières années, leur part de marché n'est que de 0,2%, alors que cette part est de 0,3% pour la Tunisie, de 1,1% pour la Turquie et de 4,7% pour la Chine (1). En 2005, selon le rapport du Forum Economique Mondial relatif à la compétitivité, le Maroc occupe la 74ème place parmi 104 pays, loin de la Turquie (52ème place) et de la Tunisie (58ème place), marquant ainsi un net retard de compétitivité (1).

Le système de l'OCDE de classification des exportations manufacturières selon leur niveau technologique permet de distinguer quatre classes : les industries de faible technologie ; celles de moyenne-faible technologie ; les industries de moyenne-haute technologie ; et celles de haute technologie. Cette classification incorpore deux types d'intensité de R&D : directe et indirecte. La première évalue la technologie produite par l'industrie en termes de dépenses en R&D rapportées à la production ou au chiffre d'affaires. La seconde mesure la technologie incorporée dans les intrants (biens intermédiaires ou en capital) (1). La valeur de la part des exportations des industries manufacturières marocaines pour chacune des quatre classes de ce système est de 36 ; 4 ; 23 et 10, respectivement.

Au Maroc, les industries minérales (phosphates et autres minerais) et agroalimentaires (sucre et d'autres produits) constituent une part importante des exportations des industries manufacturières dont la compétitivité dépendra de plus en plus de leur intensité technologique, celle de R&D en particulier.

La présente communication décrit les travaux réalisés au Laboratoire d'Analyse et de Synthèse des Procédés Industriels (LASPI), du Département Génie des Procédés de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (EMI), dans le but de développer une méthodologie rationnelle susceptible d'être utilisée pour l'optimisation des procédés industriels non conventionnels. Il s'agit d'un procédé dont les phénomènes mis en jeu sont peu connus et auquel l'approche systémique, bien rodée en génie des procédés, est très rarement appliquée.

Le choix de cet axe de recherche par le LASPI a été dicté par deux considérations complémentaires : la première est liée à un objectif de contribution au développement

d'une ingénierie nationale au service des industries de transformation, en mesure de permettre une mise en œuvre optimale des procédés industriels exploités au Maroc, dans le but de les rendre plus compétitifs à l'échelle internationale et de minimiser leurs nuisances pour l'environnement ; la deuxième considération est liée à un contexte d'évolution du génie chimique, à l'échelle internationale, au milieu des années 80, vers la généralisation de l'application de ses méthodes à d'autres secteurs des industries de transformation que les industries chimiques classiques, de raffinage de pétrole et de pétrochimie. Dans ce sens, le LASPI a opté pour le choix de deux grands secteurs industriels d'une grande importance pour l'économie nationale pour lesquels l'utilisation des techniques avancées d'optimisation de procédés, appliquées avec succès aux procédés pétrochimiques par exemple, a rarement été envisagée auparavant. Il s'agit de l'industrie sucrière et des industries de valorisation des phosphates.

Vu la nature industrielle très marquée de l'axe de recherche en question, il était indispensable de le mener en étroite collaboration avec les industries concernées. Pour des raisons méthodologiques, notre intérêt a porté tout d'abord sur les procédés de fabrication de sucre. Un volume de travail considérable a été consacré durant une quinzaine d'années à l'étude très approfondie de ces procédés en vue de leur optimisation. Comme il sera décrit ultérieurement dans le présent rapport, ce volume de travail se chiffre à plus de 70 années -chercheur . L'approche employée dans les recherches menées sur ces procédés de fabrication de sucre était essentiellement de type phénoménologique basée sur une connaissance approfondie des phénomènes mis en jeu. Cette approche, largement inspirée de celle utilisée en raffinage de pétrole et en pétrochimie, a débouché sur des résultats originaux publiés dans des revues d'une grande renommée internationale et exploitée par des communautés scientifiques et industrielles à l'échelle mondiale.

Malheureusement, les techniques liées à l'approche phénoménologique ne peuvent pas s'appliquer à des procédés d'une grande complexité des phénomènes mis en jeu, et qui souffrent de lacunes de connaissances, dues à l'insuffisance de travaux de recherche menés selon l'approche rationnelle du génie des procédés. C'est le cas de la plupart des procédés exploités pour la valorisation des phosphates. Pour ces procédés, d'autres techniques basées sur une exploitation rationnelle de l'information collectée sur les sites industriels concernés, combinées à une connaissance partielle des phénomènes mis en jeu, ont fait l'objet d'investigations dans notre laboratoire. Ces dernières ont permis de développer une approche d'optimisation complémentaire à l'approche phénoménologique élaborée à partir de l'étude des procédés de fabrication de sucre.

La présente communication décrit d'une manière succincte les travaux réalisés, avec des renvois aux références bibliographiques publiées par le LASPI. Elle est constituée de deux parties: dans la première partie, nous présentons les travaux menés par le LASPI sur les procédés de fabrication de sucre effectués dans le but d'élaborer une méthodologie rationnelle d'optimisation de procédés. Cette méthodologie, ainsi que le logiciel SCAPE ("Software for Computer Assisted Process Engineering") aidant à sa mise en œuvre, en développement au LASPI, seront présentés dans cette partie; la deuxième partie décrit des travaux effectués sur des procédés des industries de valorisation de phosphates en appliquant la méthodologie élaborée sur les procédés de fabrication de sucre.

1. PRÉSENTATION DES TRAVAUX RELATIFS AUX PROCÉDÉS DE FABRICATION DE SUCRE

1.1. Concepts généraux

Les procédés industriels sont des systèmes complexes constitués de multitudes d'opérations unitaires généralement très diversifiées (réacteurs, séparateurs, échangeurs, chaudières, turbines, pompes, compresseurs, ...) et interconnectées. Le comportement d'un procédé dépend de celui de chacune de ses unités et des interactions qui existent entre elles. A cause de la complexité des phénomènes mis en jeu, l'analyse de ce comportement pour les besoins de conduite ou de conception de procédés présente beaucoup de difficultés.

Jusqu'à il y a une trentaine d'années, cette analyse était effectuée presque exclusivement par expérimentation à différentes échelles : laboratoire, banc d'essais, pilote, commerciale et industrielle.

Si cette façon de faire a permis d'obtenir le savoir faire nécessaire au développement et à la conduite des procédés de l'époque et d'un grand nombre de procédés d'aujourd'hui, elle ne permet pas pour autant, de réaliser ces tâches de manière optimale.

Une autre approche basée sur la quantification des phénomènes mis en jeu et qui nécessite l'utilisation de l'ordinateur est de plus en plus utilisée depuis une trentaine d'années. Cette approche est dénommée, dans ce qui suit, "Etude de Procédés Assistée par Ordinateur" (EPAO).

Les techniques de cette approche se basent sur la modélisation des opérations unitaires mises en jeu dans les procédés en question. Lesquels modèles, pour être fiables, doivent être de type physico-chimique permettant de rendre compte des principaux phénomènes qui régissent le fonctionnement du procédé concerné.

Si de tels modèles existent pour un procédé donné, ils pourraient être utilisés pour analyser, calculer, contrôler et optimiser ce procédé. La conduite de celui-ci, par ordinateur en ligne, peut aussi être réalisée.

En général, les phénomènes mis en jeu dans les procédés peuvent être parmi les types suivants : les phénomènes de transfert de matière et de chaleur au sein d'une même phase ou entre phases ; les phénomènes liés à la cinétique chimique ou biologique des réactions mises en jeu ; les phénomènes de mélange dans les appareils ; et enfin, les phénomènes thermodynamiques régissant les équilibres physico-chimiques et les propriétés physiques de la matière.

Pour obtenir le modèle mathématique du procédé, il est nécessaire de disposer d'une connaissance suffisante des phénomènes qui s'y déroulent.

Cette connaissance ne peut être disponible que si les phénomènes en question ont fait l'objet de programmes de recherche visant leur analyse en vue de quantifier leurs effets sur le comportement du procédé. Des recherches menées à l'échelle internationale depuis

plus d'une quarantaine d'années ont permis de connaître de mieux en mieux une bonne partie des phénomènes précités. Cependant, cet effort de recherche n'a pas été généralisé à tous les domaines de procédés.

Ainsi, les industries pétrochimique et de raffinage de pétrole, peut être à cause de leur prospérité, étaient plus dynamiques pour intéresser les laboratoires de recherche universitaires et industriels. C'est pour cela qu'actuellement on dispose de modèles très fiables pour les procédés de ces industries. Cela n'a pas été le cas d'autres secteurs industriels tels que ceux des industries minérales, agroalimentaires et pharmaceutiques.

Il faut cependant souligner qu'une activité de recherche importante existe dans ces domaines depuis plusieurs dizaines d'années, mais très peu de recherches ont visé la modélisation des phénomènes. Cela est peut être dû au fait que le Génie Chimique ou l'actuel Génie des procédés ne s'est ouvert à ces procédés que depuis très peu de temps.

Les travaux présentés dans la présente partie ont pour objectif d'étendre l'application de la méthodologie (EPAO) aux procédés de fabrication de sucre.

Cet objectif ne peut être atteint que si des efforts de recherche intenses sont déployés. En effet, en faisant le point bibliographique sur les recherches menées à l'échelle internationale sur les procédés de fabrication de sucre, on constate que la connaissance disponible sur les phénomènes mis en jeu n'est que partielle et est généralement très empirique. Ci-après, nous passons en revue quelques éléments de cette connaissance opération par opération.

C'est ainsi qu'au niveau de l'opération d'extraction du sucre, si la cinétique d'extraction du saccharose est relativement bien évaluée, celle de l'extraction des impuretés est très mal connue et nécessite davantage d'investigation. Au niveau de l'opération d'épuration des jus sucrés tout reste à faire. La modélisation de l'atelier d'épuration nécessite un effort de recherche très intense. Les performances d'un atelier d'évaporation dépendent des propriétés physiques du jus et des phénomènes de dégradation de la matière au cours de l'évaporation. Des corrélations empiriques sont disponibles pour les propriétés physiques mais l'utilisation d'une approche basée sur des modèles thermodynamiques permettrait d'obtenir une meilleure estimation des propriétés nécessaires. Cette approche n'a à notre connaissance jamais été utilisée. C'est ainsi qu'un effort de recherche sur ces aspects est plus qu'indispensable. Les phénomènes de dégradation de la matière rencontrée au cours de cette opération et de toutes les autres, nécessitent d'être bien quantifiés en fonction des conditions opératoires. Enfin, pour l'opération de cristallisation, il est nécessaire de pouvoir estimer la solubilité du saccharose en milieu industriel ainsi que l'effet des impuretés sur la vitesse de cristallisation de celui-ci. C'est là certains éléments relatifs au manque de connaissance fondamentale sur les phénomènes mis en jeu dans les procédés de fabrication de sucre. Ce manque doit être rattrapé à l'aide d'un programme de recherche approprié en vue de mieux modéliser les différents ateliers de sucreries.

Afin de participer à l'amélioration de cette connaissance et d'appliquer celle-ci à l'optimisation de la conception et de la conduite de sucreries, un programme de recherche

en trois volets a été conçu au LASPI : recherches visant la modélisation des phénomènes physico-chimiques mis en jeu ; recherches relatives à la modélisation des opérations unitaires de ces procédés ; recherches sur les techniques de simulation, de validation de mesures et d'optimisation de procédés, ayant pour objectif l'élaboration d'un logiciel permettant une conduite optimisée de procédés de fabrication de sucre. Ce programme prévoit l'application des résultats de ces recherches à l'amélioration des performances de sucreries nationales et ce, au fur et à mesure de leur élaboration.

1.2. Bilan des travaux relatifs à l'amélioration de la connaissance des phénomènes physico-chimiques

Ces travaux visent l'amélioration de la connaissance relative aux phénomènes physico-chimiques concernant les procédés de fabrication de sucre, classés ci-après en trois catégories: phénomènes thermodynamiques régissant les propriétés de solutions sucrées ; phénomènes concernant l'épuration des jus sucrés ; phénomènes de dégradation du saccharose ainsi que ceux liés à son extraction, simultanément avec les impuretés, à partir de la betterave, et à sa cristallisation. Leur but principal est de permettre une meilleure quantification des phénomènes étudiés en vue d'appliquer l'approche EPAO aux procédés de fabrication de sucre. En effet, les performances de ces procédés sont très sensibles à l'effet des phénomènes précités.

Ces travaux sont tous achevés et leurs résultats sont exploités, comme il sera décrit ultérieurement, dans l'élaboration de modèles des opérations unitaires mises en jeu dans les procédés de fabrication de sucre. Nous en décrivons, ci-après, les principaux résultats, en les regroupant par type de phénomènes.

1.2.1. Propriétés physiques des solutions sucrées

L'estimation des propriétés physiques de mélanges à l'aide de méthodes fiables est indispensable pour l'application de l'approche EPAO aux procédés. De telles méthodes n'étant pas disponibles pour les procédés de fabrication de sucre, il était nécessaire de concentrer beaucoup d'efforts sur cet aspect.

1.2.1.1. Modélisation des équilibres liquide-vapeur

Après avoir testé positivement l'équation d'état de Peng-Robinson pour l'estimation de la température d'ébullition des solutions sucrées synthétiques saccharose-glucose-fructose-eau (2) l'application de cette équation a été étendue aux solutions sucrées industrielles en caractérisant ces dernières à l'aide d'une composition en "pseudo-composés" suivants : sucres, acides aminés, acides carboxyliques et cendres en solution dans l'eau (3).

Cette notion de "pseudo-composés" empreintée au domaine de raffinage de pétrole et de pétrochimie, où elle a été utilisée avec succès pour l'estimation de propriétés physiques de mélanges d'hydrocarbures, est d'usage en industrie sucrière depuis longtemps. En effet, beaucoup de corrélations empiriques relatives aux procédés de fabrication de sucre s'expriment en fonction de la teneur des solutions sucrées en sucre, non-sucre et eau, où

le constituant non-sucre représente toutes les impuretés présentes dans la solution sucée industrielle, c'est-à-dire un pseudo-composé.

L'originalité de notre travail réside dans l'utilisation de la notion des "pseudo-composés" en relation avec l'équation d'état de Peng-Robinson et en caractérisant le constituant non-sucre à l'aide de trois pseudo-composés susceptibles de mieux rendre compte des propriétés d'équilibres liquide-vapeur de solutions sucrées industrielles. Il s'agit du pseudo-composé acides-aminés, du pseudo composé acides-carboxyliques et du pseudo-composé cendres. Cette méthode nous a permis d'obtenir une estimation de la température d'ébullition des jus sucrés industriels de betterave et de canne avec une erreur inférieure à 0,3% (3).

La méthode prédictive UNIFAC a été aussi testée sur les jus synthétiques saccharose-eau, glucose-eau et fructose-eau (4). Si l'application de cette méthode à l'estimation des coefficients d'activité et des températures d'ébullition de ces solutions a pu mettre en évidence quelques anomalies de prédiction, l'utilisation de la méthode UNIFAC-LARSEN a pu permettre, quant à elle, d'obtenir de bonnes estimations des grandeurs précitées. Cette dernière méthode suppose que les paramètres d'interaction entre groupes dépendent de la température, alors que dans la méthode de base, ces paramètres sont supposés constants.

1.2.1.2. Modélisation des équilibres liquide-solide

La méthode UNIFAC de base a été aussi testée pour la prédiction des équilibres liquide-solide dans les systèmes saccharose-glucose-eau et saccharose-fructose-eau (5), et ce, en introduisant deux nouveaux groupes : glucose et fructose. Ces derniers permettent de rendre compte de la nature cyclique des molécules sucrées mises en jeu dans les solutions étudiées. L'identification des paramètres entre ces nouveaux groupes et les autres a été effectuée à partir de données de solubilités relatives à des systèmes binaires. L'utilisation de ces paramètres dans la méthode UNIFAC a permis d'obtenir de très bonnes prédictions des équilibres liquide-solide des systèmes saccharose-glucose-eau.

Le modèle UNIQUAC a été aussi appliqué avec succès pour la prédiction de la solubilité du saccharose dans les mêmes systèmes ternaires cités ci-avant (6). De nouveaux paramètres d'interaction relatifs aux sucres ont été identifiés pour ce modèle.

Pour tester l'effet des cendres sur la solubilité du saccharose, le modèle de CHEN a été appliqué à une solution synthétique saccharose-KCl-eau (7).

Des expériences d'équilibre liquide-vapeur utilisant un hygromètre ont été effectuées et employées pour identifier les paramètres d'interaction intervenant dans ce modèle. Les ajustements effectués permettent de constater que le modèle de CHEN rend compte de façon satisfaisante des données expérimentales obtenues.

L'étude des équilibres liquide-solide a été étendue aux sirops sucrés industriels ; l'objectif étant de développer un modèle d'estimation de la solubilité du saccharose dans ces sirops

en fonction de la composition de ces derniers caractérisée à l'aide de pseudo-composés. Un tel modèle permettrait de faire une estimation fiable de la solubilité du saccharose à une température donnée, dans un sirop de betterave ou de canne connaissant la composition de ces sirops en pseudo-composés suivants : sucres réducteurs, acides aminés, acides carboxyliques et cendres.

De tels modèles n'existaient pas encore et sont indispensables si l'on veut prédire l'effet de la variation de la composition de la matière sur les performances de l'atelier de cristallisation d'une sucrerie. En effet, les tables ou les corrélations disponibles dans la littérature ont été pour des sirops spécifiques de canne ou de betterave et pour une composition moyenne de ceux-ci. Ce qui ne permet pas d'étudier l'effet de variation de la qualité de matière première. L'application basée sur la caractérisation de la composition des sirops industriels à l'aide de pseudo-composés est une extension de celle que nous avons déjà appliquée à l'étude des équilibres liquide-vapeur de jus sucrés industriels. Le modèle développé dans ce dernier cas a permis, comme il sera décrit ultérieurement dans ce rapport, de bien simuler le comportement de l'atelier d'évaporation d'une sucrerie nationale.

Dans une première étape (8), la solubilité du saccharose a été déterminée dans des solutions contenant plusieurs impuretés minérales et organiques prédominantes dans les sirops sucrés industriels. Des expériences, réalisées selon le plan d'expérience de Box-Wilson, ont été exploitées à l'aide de la technique de surface de réponse pour dégager les impuretés dont l'effet sur la solubilité du saccharose est statistiquement significatif. Le modèle UNIFAC-Pitzer-Debye-Hückel (UNPDH) a été utilisé pour la prédiction de cette solubilité dans les solutions étudiées. De nouveaux paramètres d'interactions binaires ont été identifiés à partir de données d'équilibre liquide-vapeur et liquide-solide relatives aux solutions sucrées. L'écart moyen de prédiction est de l'ordre de 3%.

Le nombre très important de paramètres d'interactions entre groupes fonctionnels, intervenant dans le modèle UNPDH pour la prédiction de la solubilité du saccharose dans des solutions synthétiques complexes, rend l'emploi de ce modèle, pour les mêmes prédictions dans les sirops industriels, presque impossible à envisager. Pour réduire le nombre de paramètres mis en jeu, le modèle UNIQUAC-Pitzer-Debye-Hückel (UNIPDH) a été utilisé pour la prédiction de la solubilité du saccharose dans des solutions sucrées complexes saccharose-glucose-fructose-acide aspartique- acide citrique-KCl-NaOH-eau et dans les sirops sucrés industriels en les caractérisant à l'aide de pseudo-composés : sucres réducteurs-acides carboxyliques -acides aminés et cendres, en solution de saccharose dans l'eau. Tous les paramètres d'interaction nécessaires ont été identifiés et l'écart moyen de la prédiction obtenu est de 3% (6).

1.2.1.3. Modélisation des propriétés thermiques des jus sucrés

Les travaux correspondant visent l'extension de l'application de l'équation d'état de Peng-Robinson à l'estimation des propriétés thermiques des jus sucrés industriels : enthalpie, entropie et exergie, nécessaires à l'évaluation des bilans thermique et exergétique des ateliers d'évaporation de sucreries.

Un premier travail (6) a été effectué pour appliquer cette équation aux solutions sucrées synthétiques : saccharose-glucose-fructose-eau ; les paramètres d'interaction binaires étant ceux identifiés pour les mélanges précités à partir des données expérimentales d'équilibre liquide-vapeur (2).

Les chaleurs spécifiques à l'état gaz parfait, des corps purs mis en jeu, ont été déterminées expérimentalement à l'aide d'une méthode calorimétrique. Les valeurs obtenues ont été confrontées avec succès, à celles estimées à l'aide de la méthode de contribution de groupes de RIHANI.

Un autre travail (9) a été effectué pour appliquer l'équation d'état de Peng-Robinson, adaptée à l'estimation des équilibres liquide-vapeur de jus sucrés industriels, au calcul des propriétés thermiques de ces jus. L'estimation des chaleurs spécifiques à l'état gaz parfait, des pseudo-composés synthétiques a été effectuée dans ce travail à l'aide des méthodes de contribution de groupe de RIHANI et de JOBACK.

L'estimation de la chaleur spécifique, à l'état gaz parfait, des pseudo-composés industriels a été effectuée en corrélant celle-ci aux données de caractérisation des structures moléculaires des corps purs formant chaque pseudo-composé (6). De telles corrélations sont de même type que celui des corrélations développées pour les paramètres de l'équation d'état de Peng-Robinson (3).

1.2.2. Phénomènes liés à l'épuration des jus

Les performances d'un procédé de fabrication de sucre, dépendent dans une large mesure de celles de l'atelier d'épuration dont les méthodes de conception et de conduite restent très empiriques et très sensibles aux variations de la qualité de la plante sucrière utilisée. Ce qui fait de cet atelier un goulot d'étranglement pour les possibilités d'amélioration des performances du procédé de fabrication de sucre utilisé.

Le manque de maîtrise des opérations d'épuration des jus sucrés industriels est dû à la complexité des phénomènes physico-chimiques mis en jeu dans ces opérations. Très peu de recherches ont été menées de façon rationnelle, à l'échelle internationale, sur ces phénomènes.

Nos travaux au LASPI sur ce thème visent l'analyse des principaux phénomènes mis en jeu en utilisant l'approche systémique qui constitue l'un des points forts de la méthodologie rationnelle du Génie des procédés.

Les premiers phénomènes que nous avons explorés dans ce cadre sont ceux relatifs aux réactions de précipitation. Celles-ci se déroulent essentiellement pendant le préchauffage où une partie des impuretés précipite pour former des noyaux sur lesquels viennent s'agglomérer d'autres impuretés.

Ensuite, une analyse globale de toutes les réactions mises en jeu dans les procédés d'épuration de sucreries a été entreprise à l'aide des modèles de tendances.

Nous présentons ci-après les résultats obtenus grâce à ces différents travaux.

1.2.2.1. Etude des réactions de précipitation de phosphates de calcium lors de l'épuration des jus de canne

Un premier travail a été effectué sur la précipitation des phosphates de calcium lors du préchauffage des jus de canne ((10),(11)). Ce travail, mené en trois étapes :

- 1- sur un jus synthétique ;
- 2- en présence de certaines impuretés ;
- 3- sur le jus de canne) a permis de mettre en évidence un schéma réactionnel de la précipitation des phosphates de calcium en deux stades : formation d'un précipité de phosphate de calcium amorphe ; transformation de ce précipité en une phase apatitique par un processus autocatalytique. La durée de la période d'induction séparant les deux stades est très influencée par les conditions opératoires et par la présence des impuretés.

Il a été constaté qu'en présence d'ions Mg^{2+} , le phosphate de calcium amorphe est stabilisé et sa transformation en apatite n'est pas observée. Ce très important constat nous a permis d'interpréter les résultats expérimentaux observés sur un jus de canne : à cause de nombreuses impuretés présentes dans ce jus, seul le premier stade de la précipitation a lieu durant le préchauffage. Les concentrations en CaO utilisées dans ce travail sont plus importantes que celles employées dans l'industrie. A cause de ces valeurs élevées, la cinétique du premier stade de la précipitation est très rapide et n'a pas pu être suivie.

Dans un deuxième travail (12) l'étude de la cinétique de précipitation de l'amorphe a été visée et ce, en réduisant la valeur de la concentration en CaO utilisée. Ce travail a débouché sur des résultats très intéressants permettant la mise en évidence du schéma réactionnel de Holt. Le travail expérimental a été mené selon le plan d'expériences de Box-Wilson de premier ordre. Un autre travail (12) a été effectué pour réaliser et exploiter les résultats des points de second ordre du plan d'expériences de Box-Wilson.

1.2.2.2. Modélisation des réactions mises en jeu dans les ateliers d'épuration de jus de betterave

L'objectif des travaux relatifs à cette rubrique, est de développer un modèle physico-chimique permettant une meilleure conduite des ateliers d'épuration de sucreries de betterave. A ce propos, nous tenons à souligner que la conduite optimisée des procédés de fabrication de sucre dépend principalement de la maîtrise du fonctionnement de l'atelier d'épuration. La complexité de la composition des jus sucrés industriels, sa variation aléatoire, due à la nature de la matière première, et la difficulté de débarrasser ces jus de toutes les impuretés, font que les méthodes de conduite utilisées actuellement ne sont pas satisfaisantes. Dans ce travail, nous cherchons à développer de nouvelles méthodes basées sur les pseudo-composés, les modèles de tendances et le contrôle auto-adaptatif.

Afin de réduire la complexité des solutions sucrées industrielles, celles-ci sont caractérisées, comme dans le cas des jus traités dans l'atelier d'évaporation et des sirops traités dans l'atelier de cristallisation, à l'aide d'une composition en pseudo composés. La

stœchiométrie et la cinétique des réactions, mises en jeu lors de l'épuration des jus de betterave entre les pseudo composés, sont représentées à l'aide de modèles globaux, décrivant de façon satisfaisante les principaux phénomènes mis en jeu, appelés modèles de tendances. Les paramètres de ces modèles sont identifiés sur la base de données expérimentales. Les modèles de tendances obtenus sont exploités pour l'optimisation du point de fonctionnement de l'atelier d'épuration de SUNABEL ainsi que pour maintenir cet atelier dans les conditions de marche désirées, en testant la mise en œuvre des techniques de commande auto-adaptative pour faire face à des variations non maîtrisées de la composition du jus à traiter.

Un travail (13) a été conçu pour appliquer cette méthodologie au préchauffeur qui est l'appareil clé de l'atelier d'épuration de sucreries de betteraves. Dans ce travail, des essais expérimentaux ont été effectués dans un réacteur discontinu parfaitement agité et isotherme pour étudier la cinétique de la transformation chimique, mettant en jeu l'action de la chaux sur les différents constituants du jus de diffusion industriel dans les conditions du pré chaulage. Les résultats expérimentaux ont été exploités pour identifier les coefficients stœchiométriques des différents pseudo composés, les énergies d'activation et les facteurs de fréquence relatifs à chaque pseudo réaction, selon l'approche "Modèles de tendance". La transformation chimique met en jeu dix pseudo constituants [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], matière minérale (MM), matière organique dissoute (MOD), matière organique azotée colloïdale (MOAC), sucres réducteurs (SR), acides organiques (AO), sels de chaux (SC), floculat (Floc), précipité (P) et matière colorante (Col)] dans cinq pseudo réactions. Le modèle stœchio-cinétique identifié présente un écart relatif moyen entre concentrations mesurées et calculées de l'ordre de 9%.

1.2.3. Étude de la cinétique de cristallisation du saccharose dans les solutions sucrées impures

Ce travail (14) a pour objectif de développer un modèle cinétique de cristallisation du saccharose susceptible de rendre compte de l'effet des impuretés présentes dans les sirops industriels. Une méthode expérimentale a été mise au point en comparant deux méthodes. La première est basée sur la mesure du poids de la phase cristalline obtenue durant un intervalle de temps de 15 mn, la seconde permet d'estimer la vitesse de croissance cristalline à partir de la courbe de variation du Brix du sirop en fonction du temps durant l'essai de cristallisation. La comparaison de ces deux méthodes a permis d'opter pour la seconde. En effet, à cause de la valeur importante de la viscosité de la masse cuite, la filtration de celle-ci devient longue et difficile, rendant ainsi le poids des cristaux obtenus à l'aide de la première méthode, non reproductible. L'appareil utilisé pour la cristallisation est une cuve agitée munie d'une double enveloppe thermostatée.

Les essais réalisés selon le plan d'expériences de Box-Wilson, ont permis de déterminer la vitesse de cristallisation du saccharose dans le système saccharose- glucose- fructose- acide aspartique- acide glutamique- acide succinique- acide citrique- KCl - KNO_3 - K_2SO_4 - eau. L'analyse des résultats expérimentaux à l'aide de la technique de surface de réponse a permis de dégager les variables opératoires ayant un effet significatif sur cette vitesse qui s'est avérée indépendante de la taille des cristaux pour les conditions opératoires utilisées.

Deux types de modèles cinétiques de croissance des cristaux de saccharose dans les solutions étudiées ont été testés: les modèles empiriques de croissance cristalline, et les modèles phénoménologiques caractéristiques des modes de croissance cristalline. C'est le modèle polynucléaire qui s'avère décrire convenablement la croissance étudiée.

1.3. Bilan des travaux relatifs à la modélisation et la simulation des opérations unitaires de sucreries

Les travaux réalisés par le LASPI, dans le domaine de la modélisation et la simulation des opérations unitaires de sucreries, ont visé les ateliers suivants: l'atelier de diffusion type RT2 de sucreries de betteraves; le préchauffeur, type Brieghel-Müller, de sucreries de betteraves; les ateliers d'évaporation; les fours à chaux de sucreries de betteraves; les ateliers de cristallisation à cuites discontinues; les ateliers de cristallisation à cuites continues;

1.3.1. Modélisation et simulation de l'atelier de diffusion type RT2

Dans les travaux concernés ((15), (16)), un modèle physico-chimique a été développé en vue de simuler le fonctionnement statique de l'atelier d'extraction à diffuseur RT2, d'une sucrerie de betteraves. Ce modèle tient compte de la diffusion en régime transitoire et de la non-idéalité de l'écoulement au sein du diffuseur. Les paramètres du modèle ont été estimés à l'aide de corrélations relevées dans la littérature et à l'aide de l'expérimentation. Le modèle a été confronté aux mesures effectuées sur l'installation industrielle de la sucrerie des Doukkala. Ce modèle a été utilisé pour étudier les possibilités d'amélioration des performances d'une sucrerie nationale.

Les simulations effectuées ont permis de mettre en évidence les principales variables de fonctionnement de l'atelier d'extraction: le découpage, le soutirage et le temps de séjour. L'effet du découpage sur les pertes en sucre de l'atelier s'est avéré de loin le plus important. Une valeur de 12 pour l'indice de Siline permettrait d'obtenir une nette amélioration des performances de l'atelier.

1.3.2. Modélisation et simulation de l'atelier de préchauffage

Dans ce travail (13), le modèle stoechio-cinétique des réactions chimiques mises en jeu lors du préchauffage (13), a été exploité pour modéliser le préchauffeur d'une sucrerie nationale, en adoptant un modèle d'écoulement, au sein de cet appareil, de type cuves parfaitement mélangées en série avec rétro-mélange et distribution latérale de l'alimentation en chaux.

La simulation du préchauffeur à l'aide du modèle développé permet de suivre l'évolution de tous les pseudo-constituants du jus de diffusion et permet de restituer un profil de pH comparable à celui obtenu sur l'installation industrielle. L'étude d'optimisation de cette installation en employant ce modèle a permis de dégager pour chaque type de qualité de betterave, les conditions opératoires optimales.

1.3.3. Modélisation et simulation d'ateliers d'évaporation de sucreries

Plusieurs modèles de simulation d'évaporateurs de sucreries sont publiés dans la littérature. Ces modèles sont tous basés sur des corrélations empiriques pour l'estimation des propriétés physiques. De telles corrélations sont difficiles à extrapoler et rendent les possibilités d'utilisation des modèles en question très limitées. Nous avons, nous aussi, développé antérieurement un modèle faisant partie de cette catégorie (17).

Les modèles visés par les travaux que nous présentons, ici (18), sont de nature tout à fait différente : ils sont développés en se basant sur la théorie générale des équilibres liquide-vapeur en mettant en œuvre l'équation d'état thermodynamique de Peng-Robinson adaptée dans notre laboratoire aux jus sucrés industriels en caractérisant ces derniers à l'aide de pseudo-composés. Les modèles recherchés sont utilisés pour la simulation en employant l'approche séquentielle modulaire. Selon cette approche, la simulation d'un système est effectuée en décomposant celui-ci en sous-systèmes qui seront simulés en suivant un ordre bien déterminé qui peut être établi à l'aide de règles appropriées telles que celles de Motard.

L'atelier d'évaporation étant constitué d'une série de caisses d'évaporation interconnectées à l'aide de mélangeurs, de diviseurs et de ballons d'auto-évaporation, sa simulation nécessite en plus des modèles du mélangeur et du diviseur, ceux d'une caisse d'évaporation et d'un ballon d'auto-évaporation. Les modèles de ces deux derniers appareils sont basés essentiellement sur les équations d'équilibre liquide-vapeur utilisant l'équation d'état de Peng-Robinson en relation avec les pseudo-composés.

Concernant le travail relatif à la modélisation dynamique des ateliers précités, l'approche de simulation globale de tout l'atelier a été adoptée (19). Dans ce travail, un modèle dynamique non linéaire pour les ateliers d'évaporation de sucreries, basé sur l'équation d'état de Peng-Robinson adaptée aux jus sucrés industriels dans notre laboratoire, a été développé. L'approche utilisée dans ce modèle est celle généralement employée dans les principaux simulateurs commerciaux, ce qui facilitera sans doute son implantation dans ceux-ci.

La validation du modèle a été prouvée en confrontant des historiques de fonctionnement observé et simulé de l'atelier d'évaporation sur une période de 47 min. Le modèle a été ensuite utilisé pour maîtriser le comportement dynamique de l'atelier d'évaporation en question face aux principales perturbations et actions de conduite généralement rencontrées dans ce type d'atelier. Ce qui démontre, une fois de plus, la fiabilité qualitative de ce modèle.

Différentes fonctions de transferts caractérisant, pour un point de fonctionnement donné, la dynamique de l'atelier d'évaporation par des systèmes de premier ordre plus retard, ont été générées à partir du modèle dynamique précité. Ce qui donne déjà une idée sur un bon mariage entre variables contrôlées et manipulées. Ces fonctions de transferts peuvent être directement injectées dans des algorithmes de contrôle linéaire pour tester des stratégies de conduite basées sur l'approche de modélisation "boîte noire"(20). Néanmoins, le modèle dynamique non linéaire a aussi été utilisé pour développer des stratégies de conduite non linéaire de l'atelier d'évaporation en question (21).

1.3.4. Modélisation et simulation de fours à chaux de sucreries

Ce thème vise le développement d'un modèle mathématique pour l'analyse du fonctionnement et la conduite de fours à chaux de sucreries de betteraves.

Dans un premier travail réalisé dans le cadre d'un projet de fin d'études (22), l'analyse des principaux phénomènes mis en jeu dans ce four a permis de constater que ce dernier est un système très complexe où les réactions de combustion de coke et de décomposition de la pierre à chaux sont couplées aux phénomènes de transferts de matière (CO_2), à travers les couches de CaCO_3 et du CaO formé, et de chaleur par convection, conduction et rayonnement. Ce couplage rend le four fortement non-linéaire et de comportement très sensible aux variations des conditions opératoires et des paramètres physico-chimiques (paramètres cinétiques des deux réactions précitées et coefficients de transferts de chaleur et de matière).

Peu de données fiables relatives à ces phénomènes sont disponibles dans la littérature : des déterminations expérimentales sont donc nécessaires au préalable pour pouvoir simuler le fonctionnement du four. Certaines de ces déterminations ont été envisagées dans le cadre de ce travail, mais d'autres, telles que les paramètres cinétiques des réactions de combustion du coke et de la décomposition de la pierre à chaux ne peuvent être envisagées que dans le cadre de travaux de recherche de durées plus longues. Pour ces données, nous nous sommes contentés, dans le cadre de ce travail de fin d'études de tester la fiabilité des valeurs prises dans la littérature. Un modèle mathématique basé sur l'analyse des phénomènes précités a été développé. Ce modèle est obtenu en décomposant le four en trois zones : La zone de préchauffage, la zone de combustion et la zone de refroidissement.

Afin d'améliorer le modèle cinétique de la combustion du coke et de décomposition de la pierre à chaux, un travail de recherche de plus grande haleine a été effectué ((23) à (25)). La partie expérimentale de ce travail est basée sur les techniques ATG et ATD. Ce travail a débouché sur un modèle cinétique, pour chacune des deux réactions étudiées, couvrant une large gamme de conditions opératoires.

1.3.5. Modélisation et simulation des ateliers de cristallisation à cuites discontinues

Le but des travaux correspondants est de modéliser et simuler l'opération de cuisson employée dans les procédés de fabrication de sucre.

Pour ce faire, et en vue d'élaborer un modèle de simulation d'un appareil de cristallisation discontinu assez fiable, une analyse approfondie des phénomènes physico-chimiques mis en jeu a été effectuée. Cette analyse a permis, après avoir adopté un ensemble d'hypothèses simplificatrices assez bien justifiées et en faisant des bilans matière, thermique et de population, pour chacune des séquences du cycle de fonctionnement du cristalliseur, d'aboutir au modèle décrivant le comportement de cet appareil durant tout ce cycle. Les paramètres intervenant dans les équations de ce modèle ont été estimés moyennant des corrélations relevées dans la littérature scientifique. Ce modèle a été validé dans un premier temps sur une cuite, conduite manuellement, de premier jet d'une sucrerie nationale de betterave. Ensuite, il a été utilisé avec succès pour simuler une cuite automatisée de la

raffinerie d'une sucrerie de canne (26). Enfin, il a été validé sur les cuites de tout l'atelier de cristallisation discontinu d'une sucrerie de betteraves (27).

Suite à toutes ces validations, on peut conclure qu'un modèle de simulation, représentant les différents modes de fonctionnement (manuel, semi-automatique ou avec conduite par ordinateur en ligne) des cristallisoirs discontinus de tous les jets d'une sucrerie de betteraves et de raffineries de sucreries de canne, est maintenant disponible. Ce modèle permet de rendre compte de l'évolution, en fonction du temps, des principales variables de fonctionnement de ces cuites (pourcentage en cristaux, distribution de tailles des cristaux, Brix et pureté de la masse cuite et de la solution mère). Il pourra donc être intégré aux logiciels de supervision, pour une conduite assistée par ordinateur en ligne, des cristallisoirs en question.

1.3.6. Modélisation et simulation des ateliers de cristallisation à cuites continues

Les travaux concernés ont les mêmes objectifs que ceux décrits au paragraphe 3.5 relatifs aux ateliers de cristallisation discontinus, à la seule différence que les cristallisoirs mis en œuvre dans les ateliers continus sont de type continu. Ces appareils, qui sont moins fréquemment utilisés que les cristallisoirs discontinus, sont constitués d'une série de compartiments alimentés latéralement en sirop à cristalliser, avec un débit qui varie d'un compartiment à l'autre, selon le profil de sursaturation désiré le long de la cuite. En régime stationnaire, les paramètres sont fonction de l'espace et non du temps comme c'est le cas pour les cristallisoirs discontinus.

Une étude de l'écoulement au sein d'un cristallisoir continu type Fives Cail Babcock (FCB) a été menée en utilisant la technique expérimentale des traceurs (28). La distribution des temps de séjour (DTS) obtenue a permis de montrer que le modèle de cuves parfaitement mélangées en série, avec distribution latérale de la matière, peut correctement décrire l'écoulement dans la cuite en question. Ce modèle d'écoulement a été, ensuite, exploité pour élaborer un modèle de simulation de la cristallisation dans cet appareil à partir des bilans de matière, de chaleur et de population. Les paramètres caractéristiques des propriétés physico-chimiques de la matière, intervenant dans les équations du modèle sont décrits par les mêmes expressions que celles que nous avons employées dans le modèle de cristallisoirs discontinus. La même procédure de validation que celle employée pour ces derniers, a été employée. Le modèle a été d'abord testé avec succès sur une cuite continue du 1er jet d'une sucrerie de canne et d'une sucrerie de betteraves (29). Il a été aussi validé sur les cuites 2ème et 3ème jet de cette dernière sucrerie, moyennant un choix adéquat de l'équation de vitesse de cristallisation, en fonction de la pureté au sein du cristallisoir (30).

1.3.7. Modélisation et simulation des ateliers de préparation des eaux d'extraction du sucre

En vue d'assurer un meilleur contrôle du pH des eaux acidifiées utilisées pour l'extraction du sucre à partir de la betterave, un modèle dynamique physico-chimique a été développé pour l'installation de préparation de ces eaux (31). Pour mettre en évidence la performance de ce modèle, il a été confronté à un modèle neuronal multicouches développé à cet effet

par le LASPI pour la sucrerie SUNABEL. Cette confrontation ne s'est pas limitée à l'analyse du comportement dynamique de l'installation, mais elle s'est étendue aux performances du contrôle de pH obtenues en utilisant un PID, dont le réglage des paramètres a été effectué en utilisant le modèle physico-chimique, et un contrôleur à réseau neuronal inverse (32).

1.4. Bilan des travaux relatifs à la simulation, à l'analyse des mesures et à l'optimisation des procédés de fabrication de sucre

Après avoir présenté les résultats des travaux concernant l'amélioration de la connaissance relative aux phénomènes mis en jeu dans les procédés de fabrication de sucre, et ceux liés à l'exploitation de ces résultats pour l'élaboration de modèles susceptibles de décrire le comportement des principaux ateliers de ces procédés, nous analysons dans le présent paragraphe jusqu'à quel degré ces outils de base ont été utilisés pour optimiser, sinon améliorer les performances des installations industrielles concernées et ce, en employant un ensemble de techniques avancées telles que celles utilisées pour l'analyse des mesures, la simulation, l'optimisation et le contrôle des procédés. Ci-après, une description de ces travaux classés en fonction de leur nature.

1.4.1. Travaux relatifs à l'analyse des mesures

1.4.1.1. Concepts généraux

La conduite et l'analyse des performances d'un procédé ne peuvent être effectuées que si l'on dispose d'une connaissance fiable de l'état de celui-ci. Cette connaissance ne peut être acquise que si le procédé est muni d'une instrumentation suffisante permettant de mesurer le plus grand nombre possible de variables qui le caractérisent. L'idéal serait de mesurer toutes les grandeurs. Cependant, à cause de difficultés technologiques ou de coût élevé des capteurs, certaines de ces variables ne sont pas mesurées.

Lorsque le nombre de variables mesurées diminue, le coût de l'instrumentation et le degré de connaissance de l'état du procédé diminuent aussi. De ce fait, un compromis doit être recherché entre le degré de fiabilité de la connaissance de l'état du procédé et le coût des instruments nécessaires. Le choix de ce compromis doit être effectué en tenant compte de la nature du procédé et des conditions relatives à la sécurité de fonctionnement de celui-ci. Si les variables qui décrivent un procédé ne peuvent pas être toutes mesurées, il est nécessaire d'évaluer les variables indéterminées à l'aide des mesures effectuées. Trois problèmes se posent alors :

Le premier est relatif à la détermination du nombre minimum de variables à mesurer pour que le procédé soit observable. Un procédé est dit observable, si ses variables non mesurées sont calculables à l'aide de variables mesurées en utilisant les équations de contraintes imposées au procédé. La précision de l'estimation de l'état du système dépend de celles des mesures brutes utilisées. Plusieurs combinaisons de variables de procédés peuvent aboutir à la détermination de celui-ci. Le choix entre elles doit être effectué en tenant compte des prix des capteurs et des besoins de contrôle et de conduite du procédé en question. L'étude de ce premier problème doit déboucher sur le classement des variables selon l'observabilité.

Le deuxième problème posé par l'estimation de l'état du procédé à partir des mesures est celui de l'amélioration de la précision de cette estimation. Lorsque le nombre de variables mesurées dépasse le seuil minimum nécessaire à l'observabilité du procédé, et à cause des erreurs de mesures, les équations de contraintes imposées au procédé ne sont jamais satisfaites. Des mesures en surplus, appelées mesures redondantes doivent être réconciliées (ou validées) de manière à satisfaire les contraintes qui en dépendent. De quel nombre de variables redondantes doit-on disposer ? et quelles sont ces variables qui permettent la validation des principales variables d'intérêt ? la résolution du deuxième problème va permettre de répondre à ces deux questions, et ce en classant les variables selon la redondance.

Le troisième problème posé par l'estimation de l'état du système est celui de la réconciliation (validation) des mesures redondantes.

Ces techniques de l'analyse des mesures permettent d'obtenir un état cohérent du procédé et de réaliser, le cas échéant, le diagnostic de celui-ci en détectant des incohérences, des capteurs en défaut ou la présence des fuite(s) de matière(s) ou d'énergie.

Plusieurs logiciels commerciaux permettant la résolution des problèmes liés à l'analyse des mesures, ont été développés durant ces trente dernières années: BELSIM - VALI, DATREC, BILCO, EUTERP...

1.4.1.2. Résultats des travaux réalisés

L'approche rationnelle adoptée par le LASPI pour l'analyse des procédés en vue de leur optimisation rend indispensable l'emploi des techniques d'analyse de mesures, décrites ci-dessus, aux procédés de fabrication de sucre. Malheureusement, les logiciels commerciaux disponibles sont associés à des environnements particuliers qui n'incluent pas celui de l'industrie sucrière. En effet, leur intérêt généralement orienté vers les industries de raffinage de pétrole et de pétrochimie, n'a pu nous permettre d'envisager l'utilisation de l'un d'entre eux que pour traiter un atelier aussi universel qu'une chaudière. Ainsi, plusieurs études d'analyse de mesures ont été menées par le LASPI sur des chaudières de sucreries ((33) à (38)) en utilisant le logiciel BELSIM - VALI, acquis par ce laboratoire dans le cadre d'une convention avec la société BELSIM S.A. Pour utiliser ces techniques aux autres ateliers de sucreries, il était nécessaire d'envisager le développement d'un logiciel intégrant l'environnement de l'industrie sucrière. Cette décision a été prise à contre cœur par le responsable du LASPI car, la plupart des algorithmes mis en jeu dans ces techniques sont connus et que la seule contribution possible résultant de ces travaux serait le progiciel lui-même qui ne sera valorisé que si sa commercialisation est possible. Bien entendu, aussi important que soit l'intérêt des dites techniques pour la formation de l'étudiant qui travaillerait sur ces travaux, l'intérêt pour la recherche en est presque complètement absent. Pour contourner cette difficulté, il a été décidé d'affecter, les premiers stades de ces développements au moins, à des élèves ingénieurs dans le cadre de projets de fin d'études. Pour ces élèves ingénieurs, la maîtrise de telles techniques est un atout d'une grande valeur pour une carrière en gestion de production. Ainsi, plusieurs travaux ont été effectués au LASPI pour développer un tel progiciel ((39) à (42)).

1.4.2. Travaux relatifs à la simulation des procédés

Les mêmes considérations développées ci-avant pour l'analyse des mesures s'appliquent à la simulation des procédés de fabrication de sucre. Seules les chaudières de sucreries ont pu être simulées, au LASPI, directement à l'aide de logiciels commerciaux (43).

Cependant, grâce aux travaux de modélisation et de simulation menés par le LASPI et présentés au paragraphe 3, la majorité des ateliers de sucreries ont été simulés. Il restait bien sûr à mettre tous ces modèles dans une structure de simulation susceptible de permettre la simulation de l'ensemble d'un procédé de fabrication de sucre à la manière dont on peut le faire, pour un procédé chimique par exemple, à l'aide d'un logiciel commercial. Un choix facile s'offrait à nous qui est celui qui consisterait à utiliser la structure d'un simulateur existant, à laquelle on pourrait intégrer tous les modèles développés pour les procédés de fabrication de sucre.

Cette solution a l'avantage de profiter d'un environnement de développement souvent confortable, mais nécessite à ce que le logiciel commercial en question soit assez ouvert et facilite l'accès aux sources des programmes informatiques constituant ce logiciel. à supposer que cette facilité existe dans notre cas, les possibilités de valorisation de tous les résultats obtenus par le LASPI sur les procédés de fabrication de sucre seraient très minimales à cause des très faibles valeurs des "royalties" accordées aux développeurs par les fournisseurs de ces logiciels. Sachant que l'effort nécessaire pour développer une telle structure nécessite, dans notre cas, moins de 10% de l'effort total consacré au projet "sucre" et que, une fois développée, cette structure servira à accueillir d'autres modèles de simulation pour des procédés d'autres types d'industries très peu représentées dans les logiciels commerciaux disponibles, la stratégie qui s'imposait au LASPI était bien sûr celle de développer son propre logiciel d'ingénierie de procédés assistée par ordinateur, selon une approche rationnelle, originale, visant la conduite optimale par ordinateur en ligne. C'est cette stratégie qui a été finalement adoptée par le LASPI. Le logiciel qui en résultera est dénommé SCAPE "Software for Computer Assisted Process Engineering".

1.4.3. Travaux relatifs à l'optimisation des procédés

L'optimisation de la gestion d'un procédé de fabrication de sucre d'une sucrerie en général, et d'une sucrerie de betteraves en particulier doit tenir compte des objectifs suivants: i) maximiser la récupération du saccharose de la matière première dans le produit fini; ii) minimiser la consommation d'énergie. Cet objectif est valable même pour les sucreries de canne, qui utilisent la bagasse comme combustible, car la capacité de la centrale thermique étant limitée, il est nécessaire d'optimiser la gestion de l'énergie pour pouvoir répondre aux pointes de la cadence de traitement de la matière première; iii) minimiser la consommation d'eau, vue la rareté de cette ressource dans notre pays à cause des aléas climatiques; iv) minimiser les rejets gazeux, liquides et solides;

Un ensemble de travaux ont été réalisés au LASPI visant ces objectifs, partiellement, ou globalement :

- minimisation des pertes en sucre dans les pulpes de betteraves en optimisant le choix du point de fonctionnement de l'atelier de diffusion ((15), (16)) ;

- optimisation du point de fonctionnement d'un séchoir de pulpes de betteraves en vue de maximiser sa capacité (44) ;
- optimisation du point de fonctionnement du préchauffeur d'une sucrerie de betteraves (13) ;
- minimisation de la consommation de vapeur d'une sucrerie de betteraves en optimisant la distribution des prélèvements de vapeur sur les différents corps de l'atelier d'évaporation (45) ;
- optimisation de cristalliseurs discontinus de sucreries et de raffineries de sucre ((25), (46), (47)) ;
- minimisation des rejets liquides et gazeux, ainsi que la consommation d'eau d'une sucrerie de betteraves (48) ;
- étude des possibilités de valorisation des écumes de sucreries de betteraves dans la fabrication des matériaux plastiques et pour la désulfuration des fumées de chaudières (49).

1.5. Application des résultats à l'industrie sucrière

Les travaux de recherche menés au LASPI sur les procédés de fabrication de sucre visant une conduite optimisée de ces procédés, il était indispensable d'associer le secteur industriel à ces travaux. C'est ainsi qu'une collaboration a été établie entre le LASPI et les sociétés suivantes :

AGA-INGENIERIE; Sucrerie des Doukkalas; SUBM; SUNAT; SUTA SUCRAFOR ; SUNABEL; SURAC. Nous présentons ci-après les travaux réalisés dans le cadre de ces collaborations.

1.5.1. Collaboration LASPI-AGA-INGENIERIE

AGA-INGENIERIE, bureau d'études dont une bonne part de l'activité est consacrée à l'industrie sucrière, est la première société avec laquelle le LASPI a développé une collaboration fructueuse pour ses activités de recherche concernant les procédés de fabrication de sucre. C'est grâce à cette collaboration que plusieurs études visant l'application des résultats de recherche obtenus par le LASPI ont été entreprises. Une convention entre le LASPI et ce bureau d'études a été signée en avril 1990 pour rendre plus efficace cette collaboration.

1.5.2. Collaboration LASPI-Sucrerie des "Doukkalas"

Les premiers travaux réalisés au LASPI sur la modélisation des opérations unitaires de sucreries ont été effectués en collaboration avec la sucrerie des Doukkalas et avec la participation de AGA-INGENIERIE. Ces travaux ont eu pour objectif le développement des modèles de simulation en régime stationnaire des ateliers d'évaporation (17), de cristalliseurs discontinus (50) et de diffusion (15). Les modèles développés ont été testés sur les ateliers correspondants, de la sucrerie des Doukkalas. Ces travaux ont débouché sur des recommandations relatives à l'amélioration des performances de ces ateliers. Plusieurs stages des élèves ingénieurs, ayant effectué ces travaux, ont eu lieu au sein de la sucrerie en question.

1.5.3. Collaboration SUNAT-LASPI

Dans le cadre de la collaboration AGA-INGENIERIE-LASPI, deux études ont été effectuées pour le compte de la SUNAT. L'une relative à l'étude d'amélioration du séchoir de pulpes (44) et l'autre relative à la validation des mesures collectées sur les chaudières ((33), (34)). La première a permis de déterminer les possibilités d'augmentation de la capacité du séchoir et la seconde de faire le diagnostic des chaudières tout en analysant l'observabilité de celles-ci et la redondance des mesures collectées. Des propositions relatives à la gestion de maintenance des instruments de mesures et à leur placement ont été effectuées.

1.5.4. Collaboration LASPI-SUBM

Le modèle de simulation d'ateliers de diffusion RT2, développé en collaboration avec la sucrerie des Doukkalas a été aussi appliqué à l'atelier de diffusion de la SUBM pour améliorer ses performances dégradées suite à une augmentation de capacité de l'usine. Ce travail effectué avec l'aide de AGA-INGENIERIE, a permis de déboucher sur plusieurs recommandations relatives à l'amélioration des performances de l'atelier étudié ((51), (52)). Une étude sur la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUBM a été aussi effectuée par le LASPI ((37), (38)).

1.5.5. Collaboration LASPI-SUTA

Toujours dans le cadre de la collaboration LASPI-AGA-INGENIERIE, une étude relative à la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUTA, analogue à celle menée pour le compte de la SUNAT, a été effectuée par le LASPI au profit de la SUTA ((35), (36)).

1.5.6. Collaboration LASPI-SUCRAFOR

Un travail relatif à l'intégration énergétique de procédés de fabrication de sucre a été effectué par le LASPI, en collaboration avec SUCRAFOR, en vue d'une optimisation énergétique du procédé utilisé par cette société (53). Dans ce travail, la technique du point de pincement "Pinch technology" a été utilisée. Des recommandations relatives à l'amélioration du réseau énergétique du procédé étudié ont été émises à l'issue de ce travail. Un autre travail a été réalisé sur la conduite.

1.5.7. Collaboration LASPI-SUNABEL

SUNABEL a été intéressée par le programme de recherche mené au LASPI sur les sucreries et a décidé de s'y associer pour mettre à profit ses résultats pour la modélisation des ateliers de son procédé de fabrication et pour la gestion optimale de ce dernier et ce, en signant une convention avec l'EMI. Selon cette convention, l'EMI, par l'intermédiaire du LASPI, s'est engagée à : i) adapter pour SUNABEL, les modèles de simulation des unités de sucreries, en cours de développement au LASPI ; ii) utiliser ces modèles pour étudier les possibilités d'amélioration des ateliers de fabrication de SUNABEL; iii) développer

des logiciels d'optimisation, par ordinateur en ligne, des principaux ateliers du procédé de SUNABEL ; iv) assister cette dernière aux différentes étapes à entreprendre pour l'acquisition et l'exploitation des nouvelles technologies ; v) établir des programmes de perfectionnement au profit des ingénieurs, cadres et personnel de SUNABEL.

Une grande partie des travaux cités dans la présente communication ont été réalisés par le LASPI dans le cadre de la collaboration avec la société SUNABEL. Grâce à ces travaux, SUNABEL était l'une des premières sucreries au monde à maîtriser la conduite de son procédé par ordinateur en ligne.

1.5.8. Collaboration LASPI-SURAC

Une convention a été établie entre le LASPI et la SURAC pour réaliser les mêmes objectifs que ceux prévus par la convention LASPI-SUNABEL. Une bonne partie des travaux cités dans la présente communication sont effectués dans le cadre de cette collaboration.

2. PRÉSENTATION DES TRAVAUX RELATIFS AUX PROCÉDÉS DE VALORISATION ET DE TRANSFORMATION DES PHOSPHATES

2.1. Introduction

Dans la description des travaux relatifs à cette deuxième partie, nous allons chercher à éviter les redondances par rapport à celle des travaux de la première partie. Seuls les concepts spécifiques aux travaux concernés seront donc présentés ici. La présentation des travaux sera effectuée de manière à mettre en évidence, étape par étape, les différents éléments de la méthodologie rationnelle d'optimisation des procédés, de manière générale, et des procédés non conventionnels, en particulier.

Le choix du secteur des industries de valorisation et de transformation des phosphates est, à notre avis, très édifiant pour dégager une méthodologie générale d'optimisation et ce, à cause de la diversité de la nature et de la complexité des procédés mis en jeu.

En effet, le procédé de fabrication d'acide sulfurique, utilisé généralement pour transformer les phosphates en acide phosphorique, peut être considéré, selon notre approche, comme étant un procédé conventionnel, car il traite des matières fluides relativement faciles à caractériser, met en œuvre des opérations unitaires bien étudiées dans la littérature de point de vue phénoménologique et technologique et ont fait l'objet de plusieurs études d'optimisation à l'aide de logiciels de simulation commerciaux de procédés. Ces affirmations ont été déduites des travaux menés au LASPI dans le cadre de projets de fin d'études ((54), (55)). Les autres procédés sont non conventionnels, car ils mettent en jeu des mélanges complexes de physico-chimie peu connue, et des équipements pour lesquels peu de modèles fiables sont disponibles. Ci-après, la présentation des travaux menés par le LASPI sur certains de ces procédés et les enseignements qui en ont été tirés pour l'élaboration de la méthodologie générale d'optimisation des procédés. Il s'agit des procédés de concentration d'acide phosphorique, de calcination des phosphates et de fabrication d'engrais.

2.2. Travaux relatifs aux procédés de concentration d'acide phosphorique

2.2.1. Modélisation et simulation d'une unité de concentration d'acide phosphorique

Dans le travail en question (56), nous avons cherché, tout d'abord, à tester dans quelle mesure la méthode développée au LASPI, pour simuler le fonctionnement d'un évaporateur de sucreries, pouvait s'appliquer au procédé étudié. Pour ce faire, l'équation d'état de Peng-Robinson a été adaptée à l'acide phosphorique industriel en utilisant la même approche que celle que nous avons employée pour les jus sucrés industriels (3) en relation avec le concept de pseudo composé. Celui-ci est employé pour représenter, de manière globale, les impuretés présentes dans l'acide industriel. Le progiciel SCAPE que nous avons développé pour mettre en œuvre la méthodologie d'optimisation sur la base des résultats des travaux relatifs aux procédés de fabrication du sucre, a été exploité directement pour simuler l'unité de concentration d'acide phosphorique étudiée.

C'est là un résultat exceptionnel dans l'élaboration de la méthodologie générale d'optimisation des procédés recherchée à travers la réalisation des travaux qui ont fait l'objet de la présente communication : les éléments de cette méthodologie, obtenus à partir d'une analyse des procédés de fabrication de sucre, sont applicables, dans les limites des analogies possibles, aux procédés d'un secteur tout à fait différent. Cette affirmation a été vérifiée une fois à travers le travail présenté dans ce paragraphe.

En réalité c'est une deuxième vérification car, pour l'appliquer la première fois aux procédés de fabrication de sucre, elle a été empruntée aux travaux réalisés sur des procédés de raffinage de pétrole. L'universalité de la méthodologie ne doit pas être étonnante car elle découle, d'une manière tout à fait naturelle, de l'universalité de la méthodologie rationnelle du Génie des Procédés.

En revenant au procédé étudié, il est nécessaire de souligner l'effet de l'encrassement sur la chute continue de ses performances. Comment alors rendre compte de cet effet à travers le modèle décrit ci-dessus ? Ce n'est certainement pas possible. Il faut donc introduire une information externe à celui-ci. Celle-ci peut provenir d'un autre modèle qui tiendrait compte de l'encrassement. Ce modèle pourrait être de type phénoménologique, si une connaissance suffisante sur ce phénomène d'encrassement est disponible.

L'analyse de la littérature permet de constater que ce n'était pas le cas. La développer demanderait beaucoup d'efforts et nécessiterait une durée de quatre à cinq années au minimum, dans le cadre de la réalisation d'une thèse, au moins. Mais en fait, cette connaissance est-elle nécessaire pour l'objet du présent travail ? En réalité, la réponse est non, puisque nous sommes arrivés à nous en passer pour résoudre le problème. Comment sommes-nous arrivés à le faire ? C'est en introduisant un concept nouveau, en Génie des procédés, qui est celui de la simulation hybride. Cela consiste à coupler un modèle phénoménologique à une ou plusieurs mesures industrielles en ligne pouvant permettre de déterminer l'information manquante. Nous n'allons pas divulguer, ici, comment cela a été fait dans le cas du procédé étudié, car la tâche correspondante a été réalisée dans le cadre d'un contrat industriel pour lequel on est tenu par la confidentialité.

Il est primordial de marquer un arrêt à ce niveau pour souligner une chose très importante, à savoir que la majorité des logiciels de simulation commerciaux de procédés, utilisés actuellement, sont prévus pour la simulation en différé, c'est à dire, ils ne sont pas conçus pour une exploitation en temps réel et n'intègrent pas parmi leurs concepts, celui de la simulation hybride.

L'introduction de ce nouveau concept bousculerait, jusqu'à un certain degré, les structures organisationnelles qui prévalent actuellement dans certaines industries de transformation. En effet, dans ces industries, le service de production, qui a la responsabilité de la gestion de production, et celui de la maintenance, dont relève la gestion de l'instrumentation, sont gérés par deux responsables ayant le même niveau hiérarchique; ce qui ne permet pas d'assurer une coordination suffisante pour répondre aux besoins de la simulation hybride. Ainsi, afin de tirer profit de l'utilisation de ce nouveau concept, il devient impératif d'œuvrer pour une meilleure coordination entre ces deux services.

Quelques années après, le LASPI a pu développer un modèle pouvant permettre d'éviter cette simulation hybride. Il s'agit du modèle thermodynamique de Chen adapté aux solutions d'acide phosphorique industriel pour toutes les gammes de concentration rencontrées dans les procédés de fabrication d'acide phosphorique par voie humide ((57) à (59)). L'une des publications (56) tirées de ces travaux a été citée par Chen, lui même, et une autre (58) a fait partie des 25 articles de la revue "Fluid Phase Equilibria" les plus lus (appelés par Elsevier "TOP 25" durant le deuxième semestre de l'année 2006.

2.2.2. Diagnostic et optimisation du procédé

Les travaux de cette rubrique étant réalisés dans le cadre d'un contrat incluant des clauses de confidentialité, leurs résultats ne seront pas décrits. Nous les mentionnons, ici, juste pour dire qu'ils ont pu confirmer la pertinence de notre méthodologie rationnelle d'optimisation des procédés. Dans un autre cadre de travail (60), des essais industriels ont été réalisés pour mettre en application, avec succès, l'un de ces résultats.

2.3. Travaux relatifs à un procédé de calcination de phosphates

Deux objectifs ont été fixés pour ces travaux ((61) à (63)): i) développer un modèle phénoménologique décrivant le comportement d'un réacteur de calcination des phosphates à lit fluidisé; ii) bâtir l'approche empirique de la méthodologie et confronter ses résultats à ceux obtenus à l'aide de l'approche phénoménologique et ce, à travers une application à l'optimisation d'un procédé de calcination des phosphates à lits fluidisés.

Les résultats obtenus montrent la complémentarité des deux approches de la méthodologie et l'intérêt de les associer pour analyser et optimiser un procédé complexe dont une bonne partie des phénomènes mis en jeu sont assez bien connus. L'application de l'approche phénoménologique a nécessité le développement d'un modèle cinétique des réactions mises en jeu, en utilisant la technique expérimentale ATG, alors que l'approche empirique a été basée sur l'analyse des historiques du procédé, correspondant à une période de deux années de son fonctionnement.

2.4. Travaux relatifs à un procédé de fabrication d'engrais

A travers ces travaux effectués dans le cadre d'un contrat et qui sont donc confidentiels, nous montrons comment il faut mener, avec succès, la méthodologie d'optimisation, développée dans la présente communication, à un procédé dont la phénoménologie est très peu connue sur le plan quantitatif.

3. CONCLUSIONS

Les travaux présentés dans la présente communication permettent de dégager que la méthodologie développée dans la première partie pour les procédés de fabrication de sucre, et qui a été inspirée de la méthodologie bien établie pour les procédés de raffinage de pétrole et de la pétrochimie, s'avère applicable, aussi, aux procédés de valorisation et de transformation des phosphates.

La méthodologie d'optimisation développée est constituée de deux approches complémentaires: l'approche phénoménologique et l'approche empirique. Pour l'optimisation d'un procédé donné, celles-ci doivent être combinées. La contribution de chacune d'elles dépend du degré de connaissance dont on dispose sur les phénomènes mis en jeu.

Lorsque ces derniers sont très bien connus, la contribution de l'approche empirique peut être faible comparée à celle de l'approche phénoménologique; mais l'inverse n'est pas vrai car, pour réussir l'application de la méthodologie, un minimum de connaissance relative aux principaux phénomènes mis en jeu est exigé. Ce minimum c'est celui dont dispose un bon ingénieur en génie des procédés, à condition que celui-ci maîtrise bien les techniques de l'approche empirique; ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas, vu le cursus actuel de formation en génie des procédés (64).

Les travaux ont permis de dégager un nouveau concept. Il s'agit de la simulation hybride, qui consiste à coupler un modèle phénoménologique à une ou plusieurs mesures industrielles en ligne pouvant permettre de déterminer l'information manquante traduisant l'effet de phénomènes physico-chimiques non considérés dans ce modèle.

Ils ont permis aussi de montrer que le succès de l'application de la méthodologie à un procédé donné, nécessite une bonne coordination entre les services de production et exige une collaboration réussie entre les laboratoires de recherche et les secteurs industriels concernés. Ceci ne peut être réalisé que si des structures de R&D, d'innovation et de transfert de technologie appropriées sont créées pour mener à bien les tâches correspondantes dans le cadre d'un partenariat public-privé ou purement privé (structures de valorisation de la recherche, centres de R&D, centres d'innovation technologique, pépinières d'entreprises, parcs scientifiques et pôles technologique) comme cela a été prévu par la stratégie nationale en matière de recherche et d'innovation à l'horizon 2025 et le plan d'action 2006-2010 (65).

Si les conditions ci-dessus sont réunies, des opportunités importantes peuvent s'offrir au Maroc pour la maîtrise des procédés exploités dans les industries de transformation, de la production d'énergie à partir des combustibles fossiles, de dessalement de l'eau de mer et de traitement de l'eau potable et des eaux usées. La part de ces différents secteurs au PIB national est de l'ordre de 25%, ce qui mérite une attention toute particulière des instances qui président aux destinées du Système national de recherche et d'innovation, l'Académie Hassan II des sciences et Techniques, en particulier .

L'effort qui peut être consenti par l'Etat au profit de ce domaine pourrait contribuer de façon très significative à la maîtrise des procédés industriels exploités dans les industries précitées et augmenter leur intensité technologique R&D directe qui constitue un facteur de compétitivité déterminant susceptible d'améliorer le rang de la compétitivité des industries manufacturières nationales. Les savoirs et technologies susceptibles d'être générés peuvent constituer un rayonnement significatif du SNRI et des opportunités de transfert de technologie du Maroc vers d'autres pays.

4. RÉFÉRENCES

1. Structuration et niveau technologique des exportations manufacturières du Maroc ; Ministère des finances et de la privatisation ; mai 2005
2. S. ABDERAFFI, T. BOUNAHMIDI. Measurements and modeling of atmospheric pressure vapor-liquid equilibrium data for binary-ternary and quaternary mixtures of sucrose, fructose, glucose and water components. *Fluid Phase Equilibria*, Vol.93, pp. 337-351, (1994).
3. S. Abderafi, T. Bounahmidi. Measurement and estimation of vapor-liquid equilibrium for industrial sugar juice using the Peng-Robinson equation of state ; *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 162, n°1-2, pp. 225-240, (1999).
4. S. ABDERAFFI. Contribution à la modélisation thermodynamique de solutions sucrées synthétiques et industrielles de canne et de betterave à l'aide de l'équation d'état de Peng-Robinson. Thèse de Doctorat Es-Sciences Appliquées ; Ecole Mohammadia d'Ingénieurs; Rabat, (2003).
5. Y. ABED, N. GABAS, M. DELIA, T. BOUNAHMIDI. Measurements of liquid-solid equilibrium in ternary systems of water-sucrose-glucose and water-sucrose-fructose, and predictions with UNIFAC. *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 73, pp. 175-184, (1992).
6. E. ERRAMLI. Estimation de l'enthalpie des solutions sucrées complexes et de la solubilité du saccharose dans ces solutions à l'aide de modèles thermodynamiques. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle ; Faculté des Sciences, Rabat (1995).
7. O. ZOUBI, T. BOUNAHMIDI. Application du modèle de CHEN aux solutions sucrées ioniques, saccharose-KCl-eau. *Récents progrès en Génie des Procédés*, 5, 18 (1991).
8. Y. ABED. Contribution à l'étude des équilibres liquide-solide dans les solutions quaternaires saccharose-glucose-fructose-eau et dans les solutions complexes: Expérimentation et prédiction à l'aide des modèles UNIFAC et UNIFAC-PITZER-DEBYE-HUCKEL. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle ; Faculté des Sciences, Rabat (1994).

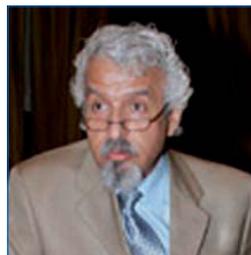
9. J. ERRAMLI, M. YACHOU, T. BOUNAHMIDI. Contribution à l'estimation des propriétés thermodynamiques des solutions sucrées synthétiques à l'aide de l'équation d'état de PENG-ROBINSON, 1ère conférence maghrébine de Génie de Procédés, Marrakech 4-6 Mai (1994).
10. A. JOURANI, T. BOUNAHMIDI. C. LAGUERIE. Kinetics of calcium phosphates precipitation in clarification : I. The water-sucrose-phosphoric acid-milk of lime system. INT.SUGAR JNL. Vol. 97. n°1162 (1995).
11. A. JOURANI, T. BOUNAHMIDI. Kinetics of calcium phosphates precipitation in clarification: II. Sucrose solutions with Mg²⁺ and SO₄²⁻ impurities and industrial cane juices. INT. SUGAR JNL. Vol. 97. n°1163 (1995).
12. A. JOURANI. Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de la précipitation spontanée des phosphates de calcium dans les conditions opératoires de l'épuration des jus de canne à sucre. Thèse de Doctorat Es-Sciences Appliquées ; Ecole Mohammadia d'Ingénieurs; Rabat (2002).
13. A. CHAFAI. Contribution à l'optimisation d'un atelier de pré chaulage de sucreries de betterave: développement d'un modèle de tendance stoéchio-cinétique. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle; Faculté des Sciences ; Rabat (1996).
14. O. ZOUBI. Contribution à la modélisation thermodynamique et cinétique de la cristallisation du saccharose dans le système : saccharose, glucose, fructose, acide aspartique, acide glutamique, acide succinique, acide citrique, KCl, KNO₃, K₂SO₄, eau. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle ; Faculté des Sciences ; Rabat (1996).
15. T. BOUNAHMIDI, A. HAIDA, M. KAAB, R. SALIMI. Analyse assistée par ordinateur de l'atelier d'extraction RT2, d'une sucrerie de betterave ; 1ère partie : Modélisation et simulation de l'atelier. Sucrierie Maghrébine N°37 (1988).
16. T. BOUNAHMIDI. Analyse assistée par ordinateur de l'atelier d'extraction, RT2, d'une sucrerie à betterave; 2ème partie : Possibilités d'amélioration des performances de l'atelier. Sucrierie Maghrébine N° 38 (1989).
17. S. ALAMI, T. BOUNAHMIDI, Modélisation et simulation d'un atelier d'évaporation de sucreries. 1er colloque maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, Alger 22-24 Nov. 1987.
18. M. Rabi, T. Bounahmidi. Modélisation et simulation en régime stationnaire d'ateliers d'évaporation de sucrerie à l'aide de l'équation d'état de Peng-Robinson ; Journal de Chimie Physique, Vol. 96, n°3, pp. 407-418, (1999).
19. M. Rabi, T. Bounahmidi, F. TEMSAMANI. Etude de la conduite d'ateliers d'évaporation de sucreries: application de l'équation d'état de Peng-Robinson à la simulation en régime dynamique de ces ateliers; IAA, Cahier scientifique, Juillet/ Août 2003, 120ème année, pp. 7-14 (2003).
20. M. Rabi, T. Bounahmidi et F. Temsamani. Contribution à l'étude de la conduite d'ateliers d'évaporation de sucreries : application à la sucrerie nationale de betteraves de Loukkos (SUNABEL), usine Ksar El Kébir, Industries alimentaires et agricoles, Volume 122, Numéro 7-8, p. 7-13 (2006).

21. M. RABI. Etude de la conduite d'un atelier d'évaporation de sucrerie : Modélisation, simulation et proposition de stratégies de conduite de l'atelier. Thèse de Doctorat Es-Sciences Appliquées (2004).
22. M. ALAMI, I. BENNANI, Modélisation et simulation du four à chaux d'une sucrerie: application au cas SUNABEL. LASPI, projet de fin d'études, EMI, Rabat (1991).
23. S. SLAOUI, T. BOUNAHMIDI. Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de combustion du coke. C.R. Chimie 7 (2004).
24. S. SLAOUI, T. BOUNAHMIDI. Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de décomposition de la pierre à chaux. C.R. Chimie 7 (2004).
25. S. SLAOUI. Contribution à la maîtrise des phénomènes mis en jeu dans un four à chaux de sucreries de betteraves : Etude des cinétiques de combustion du coke et de la décomposition de la pierre à chaux et modélisation simulation du four. Thèse de Doctorat Es-Sciences Appliquées (2005).
26. M. BAIHI, T. BOUNAHMIDI. Modélisation et simulation d'un cristalliseur discontinu automatisé de sucrerie ; 5ème Colloque Maghrébin sur les Modèles Numériques de l'Ingénieur, Rabat, 21-23 nov. (1995)
27. S. Ehlali. Validation d'un modèle de cristalliseur discontinu au 3 jets de sucreries de betteraves : application à la sucrerie SUNABEL-Ksar-El-Kébir ; Mémoire de DESA en Génie des Procédés ; EMI, Rabat, (2000).
28. N. SEMLALI. Contribution à l'optimisation des ateliers de cristallisation de sucreries de canne et de betteraves : modélisation, simulation et optimisation des cristalliseurs continus. Thèse de Doctorat Es-Sciences Appliquées ; Ecole Mohammadia d'Ingénieurs; Rabat (2003).
29. N. Semlali, T. Bounahmidi. Steady state modeling and simulation of an industrial sugar continuous crystallizer, Computers & Chemical Engineering, vol. 25, n°9-10, pp. 1351-1370 (2001).
30. N. SEMLALI, T. BOUNAHMIDI. Steady state modelling and simulation of an industrial sugar continuous crystallizer : application to the whole stages of sugar beet crystallizers, International Sugar Journal, vol. 104, n° 1248 (2002).
31. O. Elfatni, K. Hajji et T. Bounahmidi. Dynamique et contrôle de l'installation de l'acidification des eaux d'extraction de sucre à partir de betterave . Industries alimentaires et agricoles, Volume 123, Numéro 2, p. 7-14 (2006).
32. O. EL-FATNI. Modélisation et contrôle d'une installation d'eau acidulée pour l'extraction du sucre à partir de la betterave : utilisation de l'approche physico-chimique et des réseaux de neurones. Thèse de Doctorat En-Sciences Appliquées (2006).
33. T. BOUNAHMIDI, Etude de la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUNAT. 1ère partie : 1ère campagne de mesures ; Rapport de l'étude réalisée à la demande de AGA-INGENIERIE pour le compte de la SUNAT (1991).
34. T. BOUNAHMIDI, Etude de la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUNAT, 2ème partie : rapport de synthèse (1991).

35. T. BOUNAHMIDI, Etude de la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUTA. 1ère partie : 1ère campagne de mesures. Rapport de l'étude réalisée à la demande de AGA-INGENIERIE pour le compte de la SUTA (1991).
36. T. BOUNAHMIDI, Etude de la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUTA, 2ème partie : rapport de synthèse (1991).
37. T. BOUNAHMIDI, Etude de la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUBM, 1ère partie : 1ère campagne de mesures. Rapport de l'étude réalisée à la demande de AGA-ING pour le compte de la SUBM. (1991).
38. T. BOUNAHMIDI, Etude de la validation des mesures collectées sur les chaudières de la SUBM, 2ème partie : Rapport de synthèse (1991).
39. BELGHITHI ALAOUI, Contribution au développement d'un logiciel de validation des mesures de débits et de compositions ; étude de l'observabilité et de la redondance. LASPI, projet de fin d'études, EMI, Rabat (1992).
40. A. GUERGACHI, Validation des mesures collectées sur les procédés industriels: Etude de l'observabilité et de la redondance, bilans matières avec réactions chimiques et bilans thermiques. Projet de fin d'études, EMI , Rabat (1993).
41. S. SADAK, Contribution au développement d'un logiciel de validation des mesures collectées sur les procédés industriels: traitement de cohérence et estimation. Projet de fin d'études, EMI, Rabat (1996).
42. K. SAIDI, Contribution au développement d'un logiciel de validation de mesures collectées sur les procédés industriels ; Mémoire de DESA en Génie des Procédés ; EMI, Rabat, janvier (2001).
43. D. MACHRAA, M. BENAYADA, Analyse assistée par ordinateur d'une chaudière de sucreries. LASPI, projet de fin d'études, EMI, Rabat (1988).
44. T. BOUNAHMIDI, Etude des possibilités d'augmentation de la capacité du séchoir des pulpes de la SUNAT. Rapport de l'étude réalisée pour le compte de AGA-INGENIERIE (1989).
45. M.BENHALIMA, T.BOUNAHMIDI, F.TEMSAMANI, Optimisation de la distribution des prélèvements de vapeur sur les différents effets de l'atelier d'évaporation d'une sucrerie de betterave. Congrès JITH, Marseille, 9-13 juillet (1997).
46. K. SAIDI, Contribution à l'optimisation des ateliers de cristallisation de sucre: Effet de la granulométrie de la semence et modélisation et simulation de cristallisoirs continus "FCB". Projet de fin d'études, EMI ,Rabat (1994).
47. N. Meziane. Contribution à l'optimisation des cuites 2ème jet de COSUMAR ; Projet de fin d'études, EMI, Rabat, juin (2001).
48. S. BOUGHARRAF. Contribution à la minimisation des rejets d'une sucrerie à betteraves : Cas de la SUNABEL. Projet de fin d'études, EMI, Rabat, juin (1997).

49. M. Tahbouch. Contribution à la valorisation des écumes de sucreries de betteraves pour la désulfuration des fumées de chaudières ; Mémoire de DESA en Génie des Procédés ; EMI, Rabat, (2001).
50. H. BENCHAARA. Modélisation et simulation d'un cristalliseur de sucreries. Projet de fin d'études, EMI, Rabat (1986).
51. T. BOUNAHMIDI, A. HAIDA, M. KAAB, R. SALIMI. Analyse assistée par ordinateur des performances d'un atelier d'extraction d'une sucrerie à betterave. 2ème colloque maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur ; Rabat, 22-24 Nov.(1989).
52. T. BOUNAHMIDI, Etude des possibilités d'amélioration des performances de l'atelier de diffusion de la SUBM. Rapport de l'étude réalisée pour le compte de AGA-INGENIERIE. (1987).
53. H. BELKRESIA, M. GUESSOUSS, Intégration énergétique d'un procédé de fabrication de sucre. LASPI, projet de fin d'études, EMI, Rabat (1989).
54. B. RAMDANI, Modélisation et simulation d'un réacteur de conversion SO₂/SO₃. Projet de fin d'études, EMI, Rabat (1985).
55. BENCHEKCHOU, Analyse assistée par ordinateur d'un procédé de fabrication d'acide sulfurique. Projet de fin d'études, EMI, Rabat (1988).
56. O. Bennouna, T. Bounahmidi. Steady State simulation of phosphoric acid concentration process, Separation Science & Technology, vol. 37, n° 12, pp. 2939-2966 (2002).
57. B. Messnaoui , T. Bounahmidi. Modeling of excess properties and vapor–liquid equilibrium of the system H₃PO₄–H₂O. Fluid Phase Equilibria, Volume 237, Issues 1-2, Pages 77-85 (2005).
58. B. Messnaoui, T. Bounahmidi. On the modeling of calcium sulfate solubility in aqueous solutions. Fluid Phase Equilibria. Volume 244, numéro 2, p. 117-127 (2006).
59. B. MESNAOUI. Modélisation thermodynamique de l'acide phosphorique industriel à l'aide du modèle de Chen. Thèse de Doctorat En-Sciences Appliquées (2006).
60. F. AL-AMARI. Etude de quelques possibilités d'amélioration de la durée des cycles de production du procédé de concentration d'acide phosphorique. Projet de fin d'études, EMI, Rabat, juin (2000).
61. E. AKRIM, M. DAALI. Contribution à la modélisation mathématique du réacteur de calcination des phosphates noirs de Youssoufia : modélisation de la cinétique de calcination. Projet de fin d'études, EMI, Rabat (1985).
62. M. LAMSIKINE, KH. HANAFI. Modélisation et simulation d'un échangeur de chaleur gaz-solide à lit fluidisé : application au procédé de calcination des phosphates noirs de Youssoufia. Projet de fin d'études, EMI, Rabat (1990).
63. M. YACHOU. Contribution à l'étude d'optimisation du procédé de calcination des phosphates noirs de Youssoufia. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle; Faculté des Sciences; Rabat (1996).

64. T. BOUNAHMIDI, F. TEMSAMANI. Pour une approche rationnelle de la conduite des procédés. 1ère Ecole de Printemps Francophone sur la Modélisation et la Commande des Procédés ; Casablanca, 12-14 mai (1999).
65. Actes de la Rencontre nationale sur la recherche scientifique et technologique ; Skhirat, 3 et 4 mars 2006.



**STRUCTURAL ECONOMETRIC
MODELING IN AGRICULTURAL AND
FOOD INDUSTRIAL ORGANIZATION
THE CASE OF OLIGOPSONISTIC
CONCENTRATION, FOOD PRICE-
SPREADS, AND FARMER WELFARE**

Azzeddine M. AZZAM

Center for Agricultural and Food Industrial Organization,
Department of Agricultural Economics,
University of Nebraska - Lincoln, USA

ABSTRACT

In this paper I address the perennial question of market power and cost-efficiency effects of increased industrial concentration on price with a special focus on agricultural and food markets. Specifically, I develop an empirically implementable structural econometric model which 1) decomposes the wholesale-farm price spread into marginal processing cost and oligopsony components, and 2) decomposes the price effect of concentration on price into market power and cost efficiency effects. I show the conditions under which rising concentration downstream can be beneficial to farmers. The preceding decompositions are not possible when using a .reduced-form. regression model.

1. INTRODUCTION

In agricultural and food markets, farm-to-retail retail price spreads are often used to gauge the competitiveness as well as competition of food markets. By competitiveness I mean the ability of firms in the food marketing chain to respond to the needs of final consumers and do so efficiently. By competition I mean the ability of firms to raise price of the output they sell relative its marginal cost (oligopoly power) and/or the ability to lower the price of the input(s) they buy relative to their respective net marginal value products (oligopsony power). So, a widening farm-to-retail spread can be a sign of declining productivity and/or increased market power¹.

¹ Another way of distinguishing between competitiveness and competition is that while the latter relates to allocative efficiency, the former relates to productive as well as dynamic efficiency. A food processing firm is allocatively efficient when the difference between the price of its food output and the price of its farm input is equal marginal processing cost, productively efficient if it produces at the lowest cost, and dynamically efficient if it engages in both product and process innovation to further reduce costs and improve product quality (Sekkat, 2006).

However, since the farm-to-retail price spread also reflects the cost of food marketing, its behavior is affected by changes in the prices of marketing inputs (inputs used to transform farm inputs into consumer outputs) in addition to changes in productivity, and exertion of oligopoly and/or oligopsony power. Before the advent of the new empirical industrial organization (NEIO)², virtually all empirical studies of spreads either maintained the hypothesis of price-taking behavior in the food marketing chain (Wohlgenant, 2002) or, when they tested the hypothesis, simply re-gressed spreads on firm-concentration ratios and a host of other variables (Hall *et al.*, 1979). A positive (negative) coefficient on seller (buyer) concentration is taken as evidence of oligopoly (oligopsony) power. A negative coefficient on concentration is seen as supporting the cost-efficiency argument.

There are also studies that regress price levels, rather than spreads, on concentration to test price-taking behavior. If oligopoly power is the focus of the study, then seller concentration is the culprit variable (Audretsch & Siegfried, 1992). A positive coefficient on concentration is seen as evidence of pricing above marginal cost. If oligopsony is suspected, the farm price is regressed on buyer concentration and other variables. A negative and statistically significant coefficient on concentration is seen as evidence of oligopsony power, i.e., firms are able to pay a price for the farm-input below its net marginal value product. The study by Marion & Geithman (1995) of regional cattle markets in the United States is a classical example of such studies.

The spread or price concentration regressions belong to what is generally labelled as reduced-form empirical analysis. As articulated by Reiss & Wolack (2004), there are several problems with a reduced form, the least of which is that it is a misnomer. The term reduced form should instead be reserved for cases in which economics and statistics delivers a set of equations where the endogenous variables are on the left hand side and the exogenous variables and disturbances are on the right. A more serious problem is that reduced form models are written down without making explicit the structural economic model underlying them. So, absent an economic model that delivers a linear conditional mean specification of the [dependent variable (the spread) in our case] for [the independent variable (concentration in our case)], it is impossible to connect regression evidence to deterministic comparative static predictions. Specifically, for an econometric model to estimate a magnitude of economic interest consistently, the researcher must first use economics and statistics to demonstrate that the relevant economic quantity can be identified using the available data and estimation technique. In other words, without imposing an economic structure on the relationship between spreads and concentration or price and concentration, the coefficient relating concentration to spreads is simply a statistical result, not an economic one.

²The dominant empirical paradigm before NEIO was Structure-Conduct-Performance (SCP). For an understanding of SCP, NEIO, and the similarities and differences between the two, see Bresnahan (1989). Sexton and Lavoie (2002) review the industrial organization literature as applied to food processing and distribution. Kaiser and Suzuki (2006) provide a collection of selected NEIO applications in the food system. For a survey of literature on the costs and benefits of industrial concentration, see Whitley (2004).

With respect to structural econometric modelling in industrial organization, Kadiyali et al. lists four specific advantages of using them instead of using reduced form models. First, structural models allow for empirical testing of alternative theories of strategic interdependence. Second, estimated coefficient have clear economic and behavioral meaning. Third, they are less prone to the Lucas Critique³. Fourth, by incorporating the demand side, the supply (cost) side and strategic interactions between firms, the separate effects of consumer preferences, cost efficiency, and market power on firm and industry profitability can be easily measured. More importantly, by treating price-cost margins as parameters to be estimated, one avoids the measurement problems inherent in constructing price-cost margins from accounting data as used to be the practice before the advent of NEIO models.

The practice of reduced form models to assess competition would not be of great consequence if it were only of academic interest. However, in countries with active competition policies, and where competition bureaus and courts often rely on empirical industrial organization work to assess the degree of competition in a market, the concentration-spread or price relationship is of policy interest⁴.

In this case, empirical models without an economic structure may lead to counterproductive competition policies. For example, surgical intervention by the state to reduce concentration levels because the latter is shown to widen spreads, is counterproductive if reduction of concentration leads to cost-inefficiencies. In other words, there are tradeoffs between market-power and cost efficiency effects of concentration, and those tradeoffs are not evident without an explicit economic structure imposed on statistical models.

In what follows I provide a pedagogical technical essay on what I mean by structural modelling in industrial organization using the concentration-spread relationship as the focus of analysis. The next section introduces the economic question and illustrates it graphically. The third section outlines the structural econometric model to address the question. The fourth section demonstrates how to use the estimated parameters from the structural model to measure the effect of increased concentration on the spread, the farm price, and farmer welfare. Section 5 briefly discusses econometric estimation. Conclusions

³ The Lucas critique was originally levelled at macroeconomic models without a microfoundation. According to Lucas, "given the structure of an econometric model consists of optimal decision rules of economic agents, and that optimal decision rules vary systematically with changes in policy in the structure of series relevant to the decision maker, it follows that any changes in policy will systematically alter the structure of econometric models.. for a discussion on how the Lucas critique may apply to empirical industrial organization models, see Heerde *at al.*, 2005.

⁴ Empirical work should be interest even in countries with a competition law in place, like Morocco, but are reluctant to implement it for fear of dire economic consequences (Sekkat, 2006, p. 3). Through empirical research of firms and markets, authorities become equipped with the knowledge necessary not only to draft competition laws but also to enforce them. The Moroccan competition law (Dahir no. 1-00-255), for example, considers a 40 percent market share by a company or their subsidiaries as a threat to competition and fines companies who exceed that share (IFLR). I am not aware of any research that establishes a connection between a 40 percent market share and bad performance.

and a summary are in the final section. For simplicity and tractability I only consider the wholesale-farm spread, thus focusing only on food marketing stage which links food processors and farmers⁵.

2. CONCENTRATION AND SPREADS: THE CONVENTIONAL WISDOM⁶

The conventional wisdom among farmers, policy makers, and academics, is that rising food processing concentration causes deteriorating performance in first-handler markets. The underlying mechanism is that concentration affords food processors the opportunity to collude (at least tacitly) and, thereby, pay farmers a price below the marginal value product of what they sell and charge retailers a price above the marginal cost of the farm product and processing. The result is a farm-wholesale spread that is wider than it would have been had the food industry been less concentrated.

A formal analogue of the above argument is depicted in figure 1 in the Appendix. The food processing and farming sectors are represented in the top and bottom panels. Processors face the derived demand (derived from retail demand) D_p , and incur a marginal processing cost MC_p ⁷. Sub-traction of MC_p from D_p results in the derived demand for the farm product D_{f1} . The intersection of the farm product supply schedule S with D_{f1} results in the equilibrium farm product quantity Q_1 ⁸. Farmers receive price PF_1 and processor receive price PW_1 from retailers. The farm-wholesale spread $PW_1 - PF_1$ represents the competitive benchmark, i.e. price-taking processors receive a margin equal to their marginal processing cost.

If, as a result of concentration, processors exert oligopoly as well as oligopsony power, the relevant schedules for determining the equilibrium quantity of farm product are D_{f2} and ME . The former represents the vertical difference between processors' marginal revenue, MR_p , and MC_p in the top panel. The latter traces processor marginal expenditure on the farm product. Intersection of D_{f2} and ME results in farm product quantity Q_2 , wholesale price PW_2 , farm product price PF_2 , and the spread $PW_2 - PF_2$ which, consistent with popular belief, is wider than $PW_1 - PF_1$.

⁵ The model is applicable to any first-handler of farm products who is not necessarily a processor. Grain buyers are one example. Another example are companies who buy fruits, like melons, from farmers and truck them directly to urban markets.

⁶ The material in this section and the next section is excerpted and adapted from a larger empirical study of beef and pork price spreads in the United States (Azzam *et al.*, 2002). Here I limit my discussion to the conceptual material in that study in order to illustrate the process of structural econometric modeling irrespective of country or market. New material is added in sections 1, 4 and 5.

⁷ MC_p could as well be an upward or downward sloping schedule. It is drawn horizontal to simplify the presentation.

⁸ Assuming a fixed proportional relationship between farm product and processed food, the quantity of farm input on the horizontal axis in the top panel can be thought of as the quantity in the bottom panel adjusted by a fixed conversion ratio. For illustration purposes, assume the ratio is 1.

However, a widening spread does not always mean processors exert buying power over farmers. Take the case in which processors have power over retailers. They could pay farmers the competitive price PF_3 , but charge retailers PW_3 . The resulting spread $PW_3 - PF_3$ is still wider than the benchmark spread $PW_1 - PF_1$.

Granted that processor concentration may facilitate collusive behavior, it may also lead to cost-efficiencies or inefficiencies. Efficiencies may arise in two ways (Azzam & Schroeter, 1995). One is through single plant economies that are realized when small and inefficient plants are replaced by large efficient ones. The other is through multiplant economies from consolidation of several plants under joint ownership. As explained footnote 1, such efficiencies are productive. There are also dynamic efficiencies that ensue from process and product innovation to raise food quality and reduce processing costs further. Inefficiencies arise when the industry with market power and high entry barriers is under little competitive pressure to minimize costs. Liebenstein (1966) argued long ago that such internal inefficiencies could be more important than the allocative inefficiency associated with restricting output and/or factor employment relative to their competitive levels. Figure 2 in the Appendix illustrates the behavior of spreads in the presence of cost-efficiencies. Suppose a rise in concentration is associated with a drop in processing costs from MC_p to MC'_p .

All else equal, the derived demand for cattle shifts from Df_1 to D'_{f1} ⁹. If processors are price-takers in both the wholesale and farm markets, the post-shift spread is $PW_1 - PF_1$, which is narrower than the pre-shift spread $PW_2 - PF_2$. Now suppose, in addition to the drop in processing costs, the rise in concentration leads to increased market power. As a result of this increased market power, processor behave as if they faced a farm-input marginal expenditure curve of ME' , intermediate between farm-input supply, S , and the curve marginal to it, ME . Then the spread, which reflects both declining processing costs and rising market power is $PW_3 - PF_3$. It is narrower than the spread prior to the increase in concentration, but wider than the spread that would have resulted if consolidation had only cost efficiency (no market power) effects. In the end farmers receive a higher price for their output than they received before the industry cut costs through consolidation. The higher price, however, is not as high as it could have been had concentration not also led to increased market power.

That summarizes the theory. The empirical challenge is to measure the effect of concentration on spreads and to determine how much of that effect can be attributed to cost efficiency and how much to market power. One could estimate an ad hoc regression along the lines reported in the US beef industry study by Azzam (1997). In that study, the farm-wholesale price spread as a proportion of the net-farm value is regressed on the share of the four largest processors (CR4) and the ratio of the labor wage to the net-farm value. The coefficient on the CR4, which came in negative and statistically significant, is seen as negating the collusion hypothesis. However, without any explicit economic structure imposed on the model, one does not know whether the decline can be attributed to concentration-induced efficiency alone or to some combination of the efficiency effect and concentration-induced market power.

⁹ The case of cost-inefficiencies can be analyzed by shifting MC_p upward instead.

Obviously, the answer cannot be distilled from the single coefficient estimate. What is needed is a structural framework which permits the two effects to be separately identified. In what follows, I outline that framework. Specifically, I use a mainstream conjectural variation oligopoly model to de-ri-ve formally the market power and cost-efficiency effects of industry concentration farm-wholesale price spreads. The starting point is the firm maximizing its profit. The degree of competition in the farm product market is characterized by a conjectural variation (or conduct parameter). Aggre-gation of the firms. equilibrium conditions leads to an industry spread-concentration relationship, in which the effects of concentration on market power and cost are explicit and separable. The framework is similar to Azzam's (1997) and Lopez *et al.* (2002), but focuses on firm's short-run decisions, uses a much richer specification on the processing cost function, and provides a frame-work for utilizing the econometric estimates of the structural model to measure the effect of rising concentration of farmer welfare. The model also incorporates the following assumptions which seem appropriate for food markets where masses of farm products are converted in processed food: The processing technology is characterized by fixed proportions between farm- input and processed meat, as represented in figures 1 and 2. Another assumption is processors are price-takers in the wholesale market but may exert market power when purchasing farm product¹⁰.

3. A MODEL WITH ECONOMIC STRUCTURE

The starting point of the model is the *i*th processor's profit function

$$\Pi_i = Pq_i - w(Q)q_i - C_i(q_i, K_i, v, T) - v_k K_i \quad [\text{Eq. 1}]$$

where:

P = wholesale price,

Q = aggregate output/farm input quantity,

q_i = *i*th processor's output/input quantity such that $Q = \sum_i q_i$,

$w(Q)$ = market price; the market's inverse supply function of farm output,

K_i = *i*th processor's capital stock,

v = vector of prices for inputs other than the farm input,

T = time trend,

v_k = user cost of capital, and

$C_i(q_i, K_i, v, T)$ = *i*th processor's short-run variable (processing) cost function¹¹.

¹⁰ The assumption of price-taking behavior on the part of processors is for simplicity only. The model could be augmented by considering exertion of oligopoly power also (Azzam & Pagoulatos, 1990) or by considering the more complex case of bilateral oligopoly between retailers and processors (Schroeter *et al.*, 2000).

¹¹ Following Sexton (1990), the variable cost function is derived from the quasi-fixed proportions (Leontief) technology that allows no substitution between the farm input and the marketing inputs $Q = \min \{F\lambda, h(X, K, T)\}$

where Q is process output, F is farm input, $\lambda = F/Q$ is a conversion factor to convert wholesale output into farm equivalent input, $h(X, K, T)$ describes the technology of the marketing inputs X with capital stock K and state of technology T . Let w be the price of F and v the price of K . Since cost minimization requires $Q = F\lambda/h(X, K, T)$, it follows that the processor's cost function is $\lambda wq + C(q, K, v, T) + vK$.

Setting $\lambda = 1$, adding the subscript i to denote a firm, and assuming firms face an upward sloping farm-input supply function, i.e., $w(Q)$, gives the total cost function in equation [1].

Maximization of profit with respect to q_i yields the equilibrium condition:

$$(p - w) / w = \frac{q_i}{Q_e} (1 + \phi_i) + \frac{1}{w} \frac{\partial C_i}{\partial q_i} \quad [\text{Eq. 2}]$$

where $\varepsilon = (dQ/dw)/(w/P)$ is the price elasticity of farm- input supply, $\phi = dQ_o/dq_i$ is the i th firm's conjectural variation (CV) where $Q_o = Q - q_i$ is farm-input purchases by the rest of the processors,¹² and $\partial C(\cdot)/\partial q_i$ is the short-run marginal processing cost. The derived demand for the r th marketing input by the i th processor, x_{ir} is obtained from each processor's cost function by applying Shephard's Lemma

$$x_{ir} = \frac{\partial C_i(q_i, K_i, v, T)}{\partial v_r} \quad \text{for } r = 1, 2, \dots, k. \quad [\text{Eq. 3}]$$

What equation [2] says is that, in equilibrium, the (relative) margin of an oligopsonistic firm is the sum of two components: a market power component and a (short-run) marginal cost component.

The degree of market power exerted by a processor over farmers depends on the elasticity of farm-input supply (ε) facing all firms and the CV (ϕ_i).¹³

Now consider a processor who believes its decision to increase output has no effect on total industry output, i.e. $dQ/dq_i = d(q_i + Q_o)/dq_i = 1 + \phi_i = 0$. Since the price of the farm-input w is a function of total farm input Q , it follows that $dw/dq_i = 0$ and $\phi_i = -1$.

The processor in this case behaves as a price-taker and the spread is equal to marginal processing cost. Now consider a processor who believes she cannot gain more market share by expanding her output, so that $dQ/dq_i = d(q_i + Q_o)/dq_i = 1 + \phi_i = Q/q_i$. This implies a $\phi_i = Q/q_i - 1$ and a market power component of $1/\varepsilon$, which is the same as that of a pure monopsonist. What this means is that each processor finds it optimal to process its share of the collusive farm input. In this case, the farm-wholesale margin contains a monopsony distortion making it wider than in the price-taking case. Lying between the price-taking and collusive outcome is a range of oligopsonistic behavior including Cournot. A Cournot processor believes that expanding her own output draws no response from her rivals, i.e., $\phi_i = dQ_o/dq_i = 0$. With appropriate data at the individual processor level, and an appropriate functional form for the marginal processing cost function, one could test the alternative modes of conduct. A representative example of research using firm level

¹² The CV is not taken to be a .reaction., in the literal sense, because our model is a static one with no explicit dynamic structure. In the spirit of many other studies using the conjectural variation/ conduct parameter approach, ϕ_i is interpreted as a reduced form parameter of some unknown dynamic game. For specific examples in which the CV can be considered as a reduced form of dynamic games see Cabral (1995) and Dockner (1992).

¹³ The short-run equilibrium specification is chosen to avoid a problem inherent in comparing the spread with long run marginal processing cost. For example, suppose that, due to the presence of capital adjustment costs, the capital stock is generally in (static) disequilibrium. If short-run marginal cost exceeded long-run marginal cost then a "competitive" margin, equal to short-run marginal cost, could nonetheless be interpreted as evidence of market power.

data is Roberts' (1983) study of 52 firms in the coffee industry. However, as useful as a test of processor conduct may be, it does not explicitly address the question regarding the market power versus efficiency effects on spreads of packing-industry structure. The unit of observation in Eq.[2] is the individual processor, so market share is the key variable, not concentration.

A popular approach to addressing the question, especially during the heyday of the Structure-Conduct- Performance paradigm, was to estimate a reduced form equation relating profits of a cross-industry sample of firms to their respective market shares and industry concentration (e.g., Ravenscraft, 1983). Assuming the latter to be a proxy for collusion, and the former to be a proxy for efficiency, positive coefficients on both imply the presence of efficiency and market power effects. The interpretational and estimation difficulties of reduced form estimates of this nature are by now well known (Schmanensee, 1989; Kardasz & Stollery, 1995),¹⁴ however.

The approach in this essay circumvents some of the difficulties by aggregating across processors to draw a relationship between margins and industry concentration. The first step is to define a market-share weighted industry-wide supply relationship. Multiplying [2] by each processors market share, q_i/Q , and summing across the N processors yields the aggregate industry relation:

$$\frac{p-w}{w} = \frac{H(1+\Phi)}{\varepsilon} + \frac{1}{w} \sum_i \frac{q_i}{Q} \frac{\partial C_i}{\partial q_i} \quad \text{Eq. [4]}$$

where $H = \sum_i (q_i/Q)^2$ is the Herfindahl index of concentration,

$$\Phi = \sum (q_i)^2 \phi_i / \sum (q_i)^2$$

is a weighted index of industry conduct, and $(q_i/Q) \partial C_i / \partial q_i$ is a market share weighted marginal-processing cost.

Summing [3] across processors gives the industry demand for the rth marketing input

$$X_r = \sum_i x_{ir} = \sum_i \frac{\partial C_i(q_i, K_i, v, T)}{\partial v_r} \text{ for } r = 1, 2, \dots, k. \quad \text{Eq. [5]}$$

¹⁴ Incidentally, the reduced form relationship between firm profits, market share, and concentration, may be obtained by slightly rearranging equation (2). Assuming marginal processing cost is equal to average processing cost, equation (2) can be solved for the ratio of the processor's variable

$$\text{profit to expenditures on the farm input } \pi/wq_i = \frac{q_i}{Q\varepsilon} (1 + \phi_i)$$

Assuming conduct, ϕ_i , is a function of concentration, it follows that the dependent variable is related to market share, q_i/Q , and concentration. However, if the sample of firms is dominated by the largest processors, market share and concentration will be highly correlated, making it difficult to separate market power from efficiency effects.

Analogous to the individual processor case, the relative margin is separable into two components: a market power component and a marginal cost component. Note, however, that concentration, as measured by H explicitly appears only in the market power component of [4]. However, by choosing an appropriate parametric functional form for the short-run marginal-processing cost function, one can formally link marginal processing cost to concentration. One parametric form which permits such a link is an augmented form of the Generalized Leontief (GL) cost function proposed by Diewert (1971):

$$\begin{aligned}
 C_i(q_i, K_i, v, T) = & \sum_r^k \sum_{s \geq r}^k a_{rs} (v_r v_s)^{1/2} + q_i \left(\sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \alpha_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) \\
 & + q_i K_i \left(\sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \beta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) + q_i T \left(\sum_r^k \sum_{r \geq s}^k \gamma_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) + (q_i)^2 \\
 & \left(\sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \delta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right)
 \end{aligned} \tag{Eq. [6]}$$

where the v 's are prices of marketing inputs. The a_{rs} 's, α_{rs} 's, β_{rs} 's, γ_{rs} 's, and δ_{rs} 's are coefficients.¹⁵

Differentiating [6] with respect to q_i yields the i th processor's marginal processing-cost

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C_i}{\partial q_i} = & \sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \alpha_{rs} (v_r v_s)^{1/2} + K_i \left(\sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \beta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) \\
 & + T \left(\sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \gamma_{rs} (v_r v_s)^{1/2} + 2q_i \left(\sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \delta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{Eq.[7]}$$

which is linear in q_i , and has an intercept that shifts with plant size (K_i) and the state of technology (T). Applying Shephard's Lemma to (6) yields the i th processor's derived demand for the r th marketing input

¹⁵ The GL cost function in general is written as

$$C_i = h(q_i) = \sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \alpha_{rs} (w_r w_s)^{1/2} + g(q_i) \sum_{r=1}^k \beta_r w_r$$

The GL cost function is linearly homogeneous by construction and nonhomothetic. This latter property, as we will see later, is crucial for capturing the concentration effect on marginal processing cost.

$$\begin{aligned}
x_{ir} = & a_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k a_{rs} (v_s / v_r)^{1/2} + q_i \left(\alpha_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \alpha_{rs} (v_s / v_r)^{1/2} \right) \\
& + q_i K_i \left(\beta_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \beta_{rs} (v_s / v_r)^{1/2} \right) + q_i T \left(\gamma_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \gamma_{rs} (v_s / v_r)^{1/2} \right) \quad \text{Eq. [8]} \\
& + (q_i)^2 \left(\delta_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \delta_{rs} (v_s / v_r)^{1/2} \right)
\end{aligned}$$

for $r = 1, 2, \dots, k$.

Substitution of Eq.[7] into Eq. [4] and Eq. [8] into Eq. [5] yields

$$\begin{aligned}
\frac{P-w}{w} = & \frac{H(1+\Phi)}{\varepsilon} + w^{-1} \sum_r^k \sum_{s \neq r}^k \alpha_{rs} (v_r v_s)^{1/2} + w^{-1} KH \left(\sum_r^k \sum_{s \neq r}^k \beta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) \\
& + w^{-1} T \left(\sum_r^k \sum_{s \neq r}^k \gamma_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) + 2w^{-1} QH \left(\sum_r^k \sum_{s \neq r}^k \delta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) \quad \text{Eq.[9]}
\end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned}
X_r = & \sum_i x_{ir} = A_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k A_{rs} (v_s v_r)^{1/2} + Q \left(\alpha_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \alpha_{rs} (v_s v_r)^{1/2} \right) \\
& + QKH \left(\beta_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \beta_{rs} (v_s v_r)^{1/2} \right) + QT \left(\gamma_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \gamma_{rs} (v_s v_r)^{1/2} \right) \\
& + Q^2 H \left(\delta_{rr} + \frac{1}{2} \sum_{s \neq r}^k \delta_{rs} (v_s v_r)^{1/2} \right) \quad \text{Eq. [10]}
\end{aligned}$$

for $r = 1, 2, \dots, k$,

where, for $r, s = 1, 2, \dots, k$, $A_{rs} = Na_{rs}$ and, again, equation (9) and (10) are, respectively, the industry supply relation and the industry derived demand for marketing inputs.¹⁶

Concentration is now linked to the relative margin through the market power component and the marginal cost component. The expressions for the two components of the absolute margin are revealed by simply multiplying equation [9] by w . Then, differentiating with respect to H , we have the change in the absolute margin due to an increase in concentration

¹⁶To aggregate across processors, we used the approximation $K_i = (q_i/Q)K$, i.e., the share of each processor in total industry capital is equal to its share in total farm input.

$$\frac{\partial(P - w)}{\partial H} = \text{MPE} + \text{CEE}, \quad [\text{Eq.11}]$$

where

$$\text{MPE} = w \frac{1 + \Phi}{\varepsilon}$$

captures the market power effect, and

$$\text{CEE} = K \left(\sum_{r=1}^k \sum_{s \geq r}^k \beta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right) + 2Q \left(\sum_{r=1}^n \sum_{s \geq r}^k \delta_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right)$$

captures the cost-efficiency effect of concentration, holding output fixed. With respect to market power, analogous to the individual firm case, $\Phi \in [-1, 0)$ indicates conduct that is more competitive than Cournot, and $\Phi \in (0, (1/H) - 1]$ conduct less competitive than Cournot. With respect to the cost-efficiency component, note that, had we imposed homotheticity, i.e., $\beta_{rs}'s = \delta_{rs}'s = 0$ for all r and s , marginal processing cost would have been constant with respect to output (Figures 1 and 2), and concentration would not effect the relative margin through its effect on processing costs. The intuition is simple. When marginal cost is at, a change in concentration would only change the distribution of farm inputs among processors without gain or loss in cost efficiency.

Since the model allows marginal cost to vary with output, the effect of rising concentration on marginal processing cost (CEE) can turn out to be positive (upward shift in marginal processing cost) or negative (downward shift in marginal processing cost). A positive CEE means industry output is produced at higher marginal cost. Stated differently, there is loss in cost efficiency from a redistribution of the same farm input among food processors. On the other hand, a negative CEE means the redistribution of the fixed farm input among processors results cost-efficiency, i.e., industry output being produced at lower marginal cost. Obviously, whether rising concentration on the wholesale-farm spread widens or narrows margins depends whether MPE dominates or is dominated by CEE.

The complete structural economic model, for the processing industry in question, consists of equation (9), a version of equation (10) for each marketing input, and a farm-input supply function to identify the supply elasticity parameter, ε . The farm-input supply function could take the following logarithmic form

$$\ln Q = \alpha + \varepsilon \ln w + \sum_{i=1}^s \ln z_i \quad \text{Eq.[12]}$$

where Q is the quantity of farm-input supplied by farmers, w is the price received (paid) by farmers (processors), and z_i is the i th supply shifter.

4. CONCENTRATION, PRICE, AND FARMER WELFARE

As indicated at the outset, another empirical style for testing oligopsony power is to estimate a reduced form relating the price of the farm input prices to seller concentration

and other variables to control for processing cost. As in the spread concentration case, the reduced form is not based on any apparent economic structure, again making it difficult to make the case in favor or against the hypothesis of market power and/or cost efficiency. As I demonstrate in this section, with slight modification, that structure can be easily derived from the supply relation given by equation (9). To simplify the presentation, I rewrite equation (9) as

$$P - w = wH\Omega + \alpha_0 + \alpha_1KH + 2\alpha_2*QH \quad \text{Eq.[13]}$$

where

$$\Omega = \frac{1 + \Phi}{\varepsilon}.$$

$$\alpha_0 = \sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \alpha_{rs} (v_r v_s)^{1/2} + T \left(\sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \gamma_{rs} (v_r v_s)^{1/2} \right)$$

$$\alpha_1 = \sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \beta_{rs} (v_r v_s)^{1/2}$$

and

$$\alpha_2 = \sum_r^k \sum_{s \geq r}^k \delta_{rs} (v_r v_s)^{1/2}$$

$$\text{Solving (13) for the farm price yields } w = (1 + H\Omega)^{-1}(p - \text{MPC}), \quad \text{Eq. [14]}$$

where $\text{MPC} = \alpha_0 - \alpha_1KH - 2\alpha_2*QH$ is marginal processing cost. What [14] says is that in the absence of market power ($\Omega = 0$), the farm price is simply the retail price net of MPC, regardless of the level of concentration H . Whether or not $\Omega = 0$ is of course an empirical question. To find out the effect of H on w , I differentiate (15) with respect to H . After some tedious algebra, I obtain

$$\frac{\partial w}{\partial H} = \frac{-(1 + H\Omega)^{-1}(\text{MPE} + \text{CEE})}{1 - (1 + H\Omega)^{-1} \frac{\text{PE}}{\eta w}} \quad \text{Eq. [15]}$$

where $\eta < 0$ is the price elasticity of wholesale demand and, as before, $\text{MPE} = w\Omega$ is the market power effect of rising concentration, $\text{CEE} = \partial \text{MPC} / \partial H$ is the cost efficiency effect. What the derivative in (15) reveals is sign

$$\text{sign} \frac{\partial w}{\partial H} = - \text{sign} (\text{MPE} + \text{CEE}) \quad \text{Eq.[16]}$$

because $1 + H\Omega$ is always positive. Therefore, since a $\text{CEE} < 0$ implies cost-efficiency and a $\text{CEE} > 0$ cost-inefficiency implies cost inefficiency, a negative price-concentration relationship does not always translate to presence of market power. It could be that an industry does not exert market power but rising concentration leads to cost-inefficiency. It is also possible to conclude from reduced form regression work that there is no market power when in fact there is market power but it is offset by cost-efficiency.

Since the supply function is jointly estimated in the model, once can go a step further and use the expression for the price-concentration relationship to measure the effect of rising

concentration on farmer welfare. The first step is to rewrite (12) in the following form

$$Q = Aw^\varepsilon \quad \text{Eq. [17]}$$

where $A = \exp \alpha \sum_i^s \ln z_i$ is a constant, and, as before, w is the farm price, and $\varepsilon > 0$ is the elasticity of supply. Considering the portion of the function that lies between the origin and w , integrating and differentiating the integral with respect to H , yields.

$$\frac{\partial FS}{\partial H} = Q \frac{\partial w}{\partial H} \quad \text{Eq. [18]}$$

When the farm price rises with rising concentration, farmer surplus rises. The conditions under which the farm price rises were given by equation (16).

5. PUTTING THE STRUCTURAL MODEL TO WORK

Up to this point, the structural model is deterministic and the source of the deterministic mathematical statements which make up the structural model has been microeconomic theory, with optimizing behavior as the central assertion. So, The supply relation of the oligopsonist follows from her objective to maximize profits, the derived demands for factor inputs are delivered by cost minimization and duality theory, and the supply function of the farm input is the result of profit maximization by farmers¹⁷. The advantage of using an explicit rather than implicit micro-theorizing to guide specification of economic models, is that it delivers the deep parameters of the model as well as their economic and behavioral meaning.

Keeping in mind that the purpose of a structural economic model, or any economic model for that matter, is to describe the mechanism that generates observed economic data, and economic data is noisy, a deterministic model must be embedded with stochastic assumptions about how the data was generated. The most common approach is to append errors to each of the deterministic equations in the system assume the error data generation process is multivariate normal. As for where the errors come from, they are either attributed to random deviations from the firm's optimal choice of inputs, in the case of derived input demand; failure of firms to optimize, the case of the supply relation; and unaccounted for supply shifter, in the case of the farm-input supply function (Hazilla, 1991). The least common in structural modeling is to introduce stochastic errors from the starting point and allow, for example, for unobserved differences in the firm's cost functions. Ultimately, where a stochastic error belongs depends on whether the research assumes firms do or do not observe what he/she cannot observe (Reiss & Wolak, p.9).

¹⁷ Structural econometric modelling is not restricted to industries consisting of profit-maximizing private firms only. It could also accommodate mixed markets where profit-maximizing firms compete with cooperatives, whose objective may be to maximize member welfare; or public firms whose objective may be to maximize social welfare. Azzam recently used a structural model of the variety described in this essay to study competition between cooperatives and private firms in the Swedish beef-slaughter industry (Azzam, 2006). Also, as shown by Schroeter and Azzam (1990) and Schroeter and Azzam (1991), structural econometric models can be extended to multi-product industries as well as industries facing risk and uncertainty.

Assuming the simple case where errors deviations from optimizing behavior and random shifts in the farm-input-supply, with each variables having t time series observations, the structural econometric model more compactly as:

$$q_k(y_t, x_t, b_k) = \varepsilon_{kt} \text{ for } k=1, 2, \dots, M \text{ and } t=1, 2, \dots, T \quad \text{Eq.[19]}$$

and estimated jointly. The expression in (19) represents a real valued function where M vectors of multivariate responses y_t (endogenous variables in the system), determined by k -dimensional exogenous variables, and β_k is p_k -dimensional vector of unknown parameters, ε_{kt} are the errors (Gallant, 1987). The econometric theory and practice governing estimation of and inference from structural econometric system () is spelled out in detail in Gallant (1979, 1987), Berndt (1991), and Greene (1990).

With the parameter estimates in hand, measures of $M\hat{P}E$ and can be $C\hat{E}E$ obtained at mean values of the right hand side variables, i.e., where . .

$$M\hat{P}E = \bar{w} \frac{1 + \hat{\Phi}}{\hat{\varepsilon}}$$

and

$$CEE = \bar{K} \left(\sum_{r=1}^k \sum_{s \geq r}^k \hat{\beta}_{rs} (\bar{v}_r \bar{v}_s)^{1/2} \right) + 2\bar{Q} \left(\sum_{r=1}^n \sum_{s \geq r}^k \hat{\delta}_{rs} (\bar{v}_r \bar{v}_s)^{1/2} \right)$$

The variance of each component can be approximated by

$$\text{Var} \left[f(\hat{\beta}) \right] = \underline{g}' \text{Var}(\hat{\beta}) \underline{g},$$

where $\hat{\beta}$ is the vector of coefficient estimates specific to the component, and

$$\underline{g} = \frac{\partial f(\hat{\beta})}{\partial \hat{\beta}}$$

Alternatively one could study the tradeoff between market power and cost-efficiency by simulating the structural model over a specific discrete change in the Herfindhal index. However, the approach requires solving the structural model for the equilibrium price and quantity. Lopez and Liron-Espana (2003) show in detail the steps to carry on the simulation in the oligopoly case.

6. SUMMARY AND DISCUSSION

In this essay I demonstrated by example the practice of structural econometric modeling as an approach to providing answers to important and policy-relevant questions. The example I use is from agricultural markets characterized by atomistic farmers and concentrated processors. The economic question that is often asked in that setting is whether or not farmers become better off or worse with off with rising concentration among processors.

Intuition would lead one to believe that rising concentration could only lead to a deterioration in farmer welfare. Lying behind the intuition is the notion that concentration breeds market power, enabling processors to restrict output relative to its competitive level, raise consumer prices, and lower farm prices to producers. Granted that that may be the case, the economic consequences may not be harmful (in a social welfare sense) if the cost of concentration are more than offset by its benefits.

The tradeoff has been recognized in the theoretical literature and the empirical agricultural and food literature for some time, but the empirical style have been of the reduced form variety. Spreads are regressed on concentration and a host of other variables without any explicit link to a clearly specified structural model. As a consequence, one resorts to implicit theorizing to explain the estimated statistical spread-concentration relationship. This is in sharp contract to structural econometric modeling where the relationship is explicitly laid out first before estimation.

The starting point any empirical structural economic research is the economic question being asked. Does processor concentration hurt farmers? is the question addressed here. Sekkat (2005), for example, asked the question .does competition improve productivity in developing countries Other questions.. When feasible, the next step in modeling is to formulate the question graphically first, providing the reader with a sense of the economic structure involved in tackling the question.

The third step, is to translate the simple economic relationships in the graph into an explicit mathematical model. The fourth step is to embed the model into a statistical framework, estimate the coefficients, and use the estimates to answer the economic question(s) posed at the outset.

In general, a structural empirical industrial organization model of a agricultural and food mar-keting chain should have the following components: product demand downstream, input supply upstream, a supply relation of the processing and/or retailing firms, firms.s derived demand for inputs other than the farm-inputs, and strategic interdependence. The primary sources of structure for the economic relationships should be microeconomic theory, include and oligopoly theory incorporating formally the idiosyncracies of the industry being examined.¹⁸

Implicit in this essay is the assumption that the necessary data to estimate the structural model is available. Often that is not the case, and not just in countries without elaborate

¹⁸ For example, when modeling livestock market, farm supply in that market should be cognizant of the fact that livestock is both an investment and a consumption good and biological cycles matter. In that setting both current and expected prices matter as farmers need to decide on whether to bring an animal to market or retain it for reproduction. By not incorporating expectation, supply function for livestock often turn out with a negative slope, which is consistent with rising marginal cost of producing livestock.

data collection infrastructure. There are a couple of reasons. First, data is often collected by government agencies for objectives different from those of the empirical industrial organization researcher¹⁹.

Second, as is the case in the United States, when they are only a few firms in a market, the data is published in aggregated form to protect the privacy of firms. One avenue under these circumstances, is to work with a stripped down version of the structural model and use extraneous information. For example, in the absence of data on factor shares, the factor share equations dropped from the system of equations. Another avenue is to construct a structural model that recognizes the data limitations a priori but abides by the the restrictions imposed by microeconomic theory (Lachy, Azzam, Sekkat, 2007).

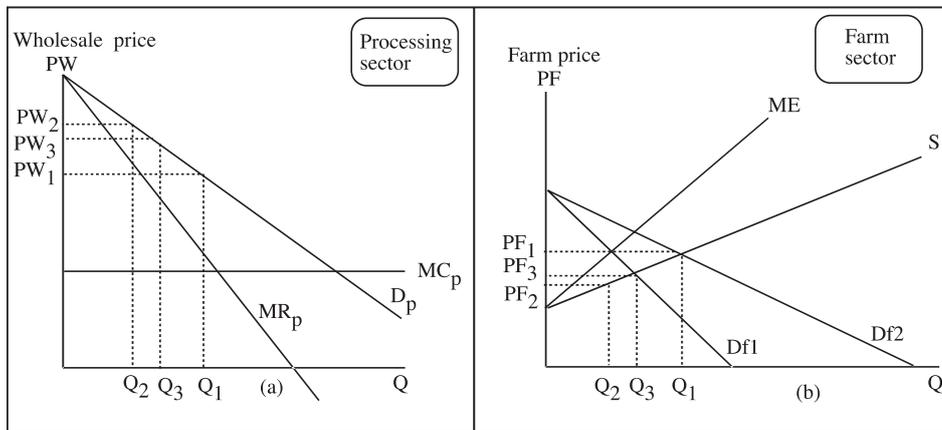


Figure 1. Farm-Wholesale Marketing Channel

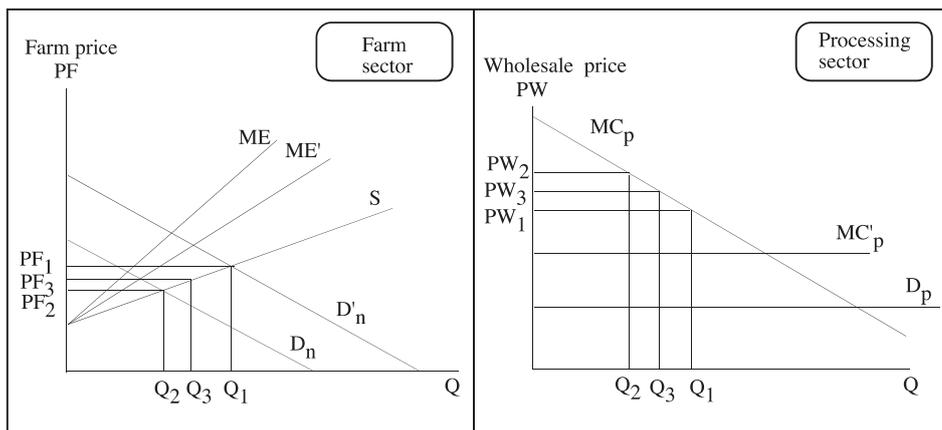


Figure 2. Farm-Wholesale Marketing Channel

¹⁹ However, by building structural econometric models, researchers can also help government agencies identify the key theory-based economic variables that need to be collected. The Herfindahl index of concentration is on example

REFERENCES

- Audrecht D. B. & J. J. Siegfried (1992) Empirical Studies in Industrial Organization. Kluwer Academic Publishers
- Azzam A. & H. Andersson (2006) Measuring Price Effects of Concentration in Mixed Oligopoly: An Application to the Swedish Beef-Slaughter Industry (In review).
- Azzam A. & E. Pagoulatos (1990) Testing Oligopolistic and Oligopsonistic Behavior: An Application to the U.S. Meat Packing Industry. *J. Agricultural Economics* 41:362- 370.
- Azzam A., J. Schroeter & K. Nelson (2002) Efficiency and Market Power Effects on Beef and Pork Farm-Wholesale Spreads. Report to Market and Trade Division, Economic Research Service, USDA. -Cooperative Agreement No. 43-3AEK-8-80110. March.
- Azzam A. (1997) Measuring Market Power and Cost-Efficiency Effects of Industrial Concentration. *Journal of Industrial Economics* 45 :377-386.
- Azzam A. & J. R. Schroeter (1995) The Tradeoff Between Oligopsony Power and Cost-Efficiency in Horizontal Consolidation: An Example From Beef Packing. *Am. J. Agr.Econ.*77:825-836
- Berndt E. R. (1991) *The Practice of Econometrics - Classic and Contemporary*. A.Wesley P. C.
- Bresnahan T. F. (1989) Empirical Studies of Industries with Market Power. In R. Schmalensee & R. Willig, eds., *Handbook of Industrial Organization*, Amsterdam: Elsevier Science Publishers,
- Cabral L. M. B. (1995) Conjectural Variations as a Reduced Form. *Economics Letters* 49:397- 402
- Diewert W. E. (1971) An Application of the Shephard Duality Theorem: A Generalized Leontief Production Function. *Journal of Political Economy* 79:481-507.
- Dockner E. J. (1992) A Dynamic Theory of Conjectural Variations. *J.Ind.Eco.* 40:377-395
- Gallant A. R. (1987) *Nonlinear Statistical Models*. John Wiley & Sons.
- Gallant A. R. & D. W. Jorgenson (1979) Statistical Inference for a System of Simultaneous, Non-linear, Implicit, Equations in the Context of Instrumental Variable Estimation. *Journal of Econometrics* 11:275-302.
- Green W. H. (1990) *Econometric Analysis*. Prentice Hall
- Hall L., A. Schmitz & J. Cothorn (1979) Beef Wholesale-Retail marketing Margins and Concentration. *Economica* 46:295-300.
- Hazilla M. (1991) Econometric Analysis of Market Structure: Statistical Evaluation of Price-Taking Behavior and Market Power, in :Advances in Econometrics, Volume 9, T. B. Fromby & G. F. Rhodes, eds. JAI Press,
- Heerde H. J. van, M. G. Dekimpe & W. P. Pustis Junior (2005) Marketing Models and the Lucas Critique. *Journal of Marketing Research* XLII :15-21
- International Financial Law Review 1000. available at <http://www.ir1000.com/includes/print.asp?CountryID=124&sIndex=2>
- Kadyali V., K. Sudhir & V. R. Rao (2001) Structural Analysis of Competitive Behavior: New Empirical Industrial Organization Methods in Marketing. *Int.J. Res. Mark.* 18:161-186
- Kaiser H. & N. Suzuki (2006) *New Empirical Industrial Organization and the Food System*. New York: Peter Lang

- Kardasz S. W. & K. R. Stollery (1995) Efficiency versus Collusion: A Reformulation of the Weiss Test *Applied Economics* 27:539-545
- Lachy L., A. Azzam & K. Sekkat (2007) Testing for Oligopoly Power with Limited Data: An Example from Manufacturing in Morocco (In progress)
- Liebenstein H. (1966) Allocative Efficiency versus X-efficiency. *Am.Eco. Rev.*56:392- 415
- Lopez R. A. & C. Liron-Espana (2003) Social Welfare and Market Power-Efficiency Tradeoff in U.S. Food Manufacturing: A Note. *J. Agr. Food Ind.Org.*3:Article 5
- Lopez R. A., A. M. Azzam & C. Liron-Espana (2002) Market Power and/or Efficiency: A Structural Approach.. *Review of Industrial Organization* 20:115-126
- Lucas R. E. (1997) Econometric Policy Evaluation: A Critique. Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy 1:19-46.
- Marion B. W. & F. Geithman (1995) Concentration-Price Relations in Regional Fed Cattle Markets.. *Review of Industrial Organization* 10:1-19.
- Ravenscraft D. J. (1983) Structure-Profit Relationship at the Line of Business and Industry Level. *Review of Economics and Statistics* 65:22-31.
- Reiss P. C. & F. Wolak (2004) Structural Econometric Modeling: Rationales and Examples from Industrial Organization, Working Paper, Stanford University
- Roberts M. J. (1984) Testing Oligopolistic Behavior. *International Journal of Industrial Organization* 2:367-383.
- Schmanelsee R. (1989) Inter-Industry Studies of Structure and Performance. In R. Schmanelsee & R. Willig, es. *Handbook of Industrial Organization*. New York: North Holland,
- Schroeter J. R., A. Azzam & M. Zhang (2000) Measuring Market Power in Bilateral Oligopoly: The Wholesale Market for Beef. *Southern Economics Journal* 66:526-547
- Schroeter J. & A. Azzam (1991) *Marketing Margins*, Market Power and Price Uncertainty. *American Journal of Agricultural Economics* 73:990-999
- Schroeter J. & A. Azzam (1990) Measuring Market Power in Multi-Product Oligopolies: The U.S. Meat Industry. *Applied Economics* 22:1365-1376
- Sekkat K. (2006) Does Competition Improve Productivity in Developing Countries: Manufacturing in Egypt, Jordan and Morocco.. Working paper (DULBEA-SBS, University of Brussels) November
- Sexton R. J. & N. Lavoie (2002) Food Processing and Distribution: An Industrial Organization Approach. In *Handbook of Agricultural Economics*, Chapter 15, Volume 1B, B. L. Gardner & G. C. Rausser (eds). Elsevier
- Sexton R. J. (1990) Imperfect Competition in Agricultural Markets and the Role of Cooperatives: A Spatial Analysis.. *American Journal of Agricultural Economics* 72:709-20
- Whitley J. (2004) . *The Gains and Losses from Agricultural Concentration: A Critical Survey of Literature*. *Journal of Agricultural and Food Industrial Organization* 1:Article 6.
- Wohlgenant M. K. (2002) *Marketing Margins: Empirical Analysis*.. In *Handbook of Agricultural Economics*, Chapter 16, Volume 1B, B. L. Gardner & G. C. Rausser (eds). Elsevier



SESSION 1
DISCUSSION



Rajae CHERKAOUI EL MORSLI (CSPC)

Question à M. Ait Kadi : vous avez parlé des récupérations des pièces et surtout qu'il faut prévoir des pièces qui sont faciles à démonter, c'est-à-dire que les sociétés doivent faire un investissement important avant d'avoir des gains. Est-ce qu'il y'a eu des essais pour des sociétés marocaines?

Daoud AIT KADI (CSMI)

C'est un problème effectivement qui se pose et c'est pour cela qu'on essaie de concevoir le produit de sorte à pouvoir le désassembler plus facilement. Le gros handicap du recyclage c'est le coût élevé du désassemblage, d'où la nécessité d'intervenir au moment de la conception. Les entreprises qui veulent aller vers l'éco-conception doivent investir énormément et maintenant c'est les lois du marché qui vont forcer d'aller dans cette direction.

Jean-Jacques BONNET (CSPC)

Question à M. Bounahmidi : vous nous avez convaincu de la nécessité de modéliser des procédés industriels pour améliorer la conduite des différents ateliers. Tous ces travaux ont dû avoir des effets sur le coût du kilo de sucre. Pouvez-vous nous dire quel a été ce gain de productivité ?

Comment regarding M. Azzam presentation: you started your lecture by taking coffee as an example. I would like to mention the discovery by a research group in Max-Planck in Germany that consists of removing caffeine from coffee using the supercritical CO₂; I don't know if it fits with your mathematical model?

Tijani BOUNAHMIDI (CITIT)

Les travaux qui ont été réalisés, ont été réalisés à 90% sur une installation industrielle bien déterminée. Les résultats présentés ont été produits et utilisés sur place. La consommation énergétique (en fuel) a été réduite de 30% et la production de sucre améliorée de 25%. Le coût de production de l'entreprise était le plus bas à l'échelle nationale.

Cette étude a montré l'intérêt de créer une structure recherche-développement au sein de l'entreprise ou bien créer ce genre de structure par les universités dans le cadre des spin-off.

Azzeddine AZZAM (Guest speaker, University of Nebraska, USA)

My answer will be in two parts:

- the first part is the model is generic, that gives you the basic conceptual framework. That's why I mentioned coffee, mint, potatoes and tomatoes and I will try to convince

you that the structural model will accommodate that. What you have just mentioned as far as an industrial organization economist, that's called product or process innovation and there is reflected in the shift in the marginal processing cost. If the consumer knows about the use the CO₂ decaffeination process, we call that a process of product differentiation which means that the consumer perhaps will have a higher willingness to pay for a process innovation, so that benefits the farmer;

- second, when you have a process innovation that index tea in the marginal processing cost function, from an economic stand point that shifts the marginal processing cost down, which means that for the same amount of decaffeinated coffee it's going to cost the processor less money to process the coffee. That translates into a shift or for the same price the company is going to demand more coffee from the farmer, which means that the farmer is going to be better off. So here is where technological innovation benefits not only the consumer but it also benefits the processor and benefits the farmer.

I am going to take advantage of your question to make the following point: imagine that that firm controls 70% of the market, and it was able to adopt CO₂ process innovation because it can afford it, but then the Government will come and say you have too much market share, we are going to fine you. Can you imagine what that does to the technological innovation and economic growth? That's exactly the point.

Khalid SEKKAT (CESDE)

Je voulais demander si on pouvait avoir les papiers des présentations.

Question à M. Ali Alami: un modèle théorique est développé en temps continu, mais lorsqu'on passe à l'estimation sur les données, on est obligé de travailler en temps discret. Je voulais savoir si dans votre cas, ce problème a déjà été traité.

Ali ALAMI IDRISSEI (Orateur invité, OPTIMA FINANCE Consulting, Maroc)

Effectivement, quand on travaille sur un modèle en temps continu et qu'ensuite on essaie de passer à la discrétisation par ce qu'on appelle le billet de discrétisation, il y'a un papier en 1993 dans Journal of Econometrics qui traite d'une méthode qu'on appelle la méthode d'inférence indirecte. Cette méthode permet de corriger d'une certaine manière le billet de discrétisation. Il y'a aussi un papier de Smith en 1996 qui traite du billet de discrétisation.

Noureddine ELAOUFI (CESDE)

C'est un commentaire général qui est fait à Youssef Ouknine, Ali Alami Idrissi et également à Azeddine Azzam sur la question de modélisation et l'utilisation des mathématiques. En écoutant ces communications, se posent pour moi deux problèmes :

- le premier a trait aux synergies entre les collèges. Si on continue ainsi, on pourrait aller vers un autisme disciplinaire. C'est dommage que le collège des études stratégiques et développement économique n'ait pas pu travailler avec le collège qui s'occupe de la modélisation. Ce problème de transversalité est à régler dans l'avenir.

- qu'est ce qui est plus important, est-ce de dire, d'affirmer, de réaffirmer l'importance des outils pour faire avancer et faire progresser une théorie, une science ? Pour notre académie est-ce que ce n'est pas la pertinence des modèles par rapport aux questions abordées qui est plus intéressante. Bounahmidi a un petit peu approché cette question. Je crois que le problème n'est pas tant celui de la validité, d'une validité de la théorie pure mais plutôt la pertinence par rapport à des situations concrètes qui peuvent avoir beaucoup de spécificité par rapport à un cas abstrait ou général. D'ailleurs, Youssef Ouknine s'est interrogé sur le réalisme des modèles qu'il a évoqués.

Azeddine Azzam m'inspire une question fondamentale, celle de modélisation économétrique d'une économie en relation avec les données. Est-ce qu'on peut modéliser si on n'a pas les données? La confidentialité des données dans certains pays a été évoquée pour répondre à des questions précises. Dans le cas de l'économie marocaine, on achoppe souvent sur la non production des données. Un modèle abstrait suppose une économie organisée.

On devrait au sein de l'Académie mener la réflexion sur la relation entre une théorie pure et le fonctionnement réel d'une économie d'une société.

Azeddine AZZAM (Guest speaker, University of Nebraska, USA)

- The first thing is the essence of science is to model because if you want to replicate reality is to put another planet earth next to planet earth and do experimentation. The fact that we are part of the experiment, science is about modelling and abstracting from reality to generate propositions. Anybody that claims that a model is duplicating reality is not doing science.

- In my own training I have learnt to be an incrementalist: you do something, you measure, you test and then you move on and complicate things. If you start with complexity you get lost; it is just like building a house, one brick at the time.

- The usefulness of modelling is not for impression it is for expression. When I put a structural model and discuss it with an audience like this, you can see all my assumptions, you can see exactly how I am doing things and you are able to pick on specific things and criticize the weaknesses of what am I doing or you give me suggestions. Modelling to me is discipline, is mental exercise.

There is a saying in english: "Necessity is the mother of invention". In United States, when you don't have a data, you become a creative economist, how to extract a maximum of information with limited data.

- The last point is: those models are only applicable to organized economy; I completely disagree. The creative economist will understand the realities of Morocco and build a model based on this reality, not to dismiss an economic model just because it doesn't look like Morocco.

Ali BOUKHARI (CITIT)

Je m'adresse à trois intervenants: Pierre Auger, Daoud Ait Kadi et Azzeddine Azzam.

- Nous savons que les atomes s'organisent dans certaines conditions et donnent plusieurs panoplies. Par contre dans le monde animal, j'aurais aimé savoir est-ce que vraiment nous maîtrisons ces techniques d'organisation et ses prédictions et quelle est la validité de la théorie et surtout quel est le seuil critique en nombre d'individus quand on parle des poissons, des fourmis ou des abeilles ?

- Nous vivons actuellement dans le monde une utilisation intensive des richesses minières. Actuellement, nous assistons à une mouvance qui est apparue aux USA, c'est l'utilisation des produits de seconde main. Dans l'avenir, est-ce qu'avec une diminution des richesses naturelles nous ne serons pas amenés à revenir à l'utilisation des choses qu'on avait consommées en trop ?

- Les théories économiques concernent une période où il n'y avait pas la mondialisation. Est-ce que ces équations resteront valables avec la mondialisation ?

Abderrahim MAAZOUZ (CITIT)

Pour M. Ait Kadi: Vous avez parlé du problème de l'écho-conception et du développement durable, est-ce que les biomatériaux sont une réalité vivable ou c'est juste un marketing pour vendre des produits ?

Daoud AIT KADI (CSMI)

Ça devient actuellement une réalité. Tels que les produits sont conçus actuellement, la récupération n'est pas avantageuse économiquement parlant. Ça demande beaucoup d'efforts et beaucoup d'énergie et les entreprises doivent aller de l'avant. Deuxième constat : le retour des pièces qu'on veut réinjecter dans le marché n'est pas connu. Le développement des biomatériaux est irréversible, c'est même devenu une nécessité. Les pays du Nord ont déjà pris des longueurs d'avance à ce sujet.

Pierre AUGER (Orateur invité, IRD, Bondy, France.)

Il existe dans les systèmes écologiques des processus qui se déroulent à différents niveaux : l'individu, la population, la communauté; et qui en général se passent à des échelles de temps un peu différentes. Le problème qui se pose quand on veut faire la modélisation de ces systèmes, on est confronté en général à des modèles assez complexes.

Pour la question sur les densités, les modèles sont réservés à des populations dont les densités sont relativement importantes. Lorsqu'on a affaire à des populations de faibles densités, il faut faire appel à d'autres modèles de probabilités stochastiques.

Azzeddine AZZAM (Guest speaker, University of Nebraska, USA)

Globalization is going to require competitiveness not only in products but in ideas, and I think that what the Academy of Sciences is doing is opening the market for ideas and that is remarkable.

SESSION 2

LA QUESTION DE L'ÉNERGIE AUJOURD'HUI: DÉFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES



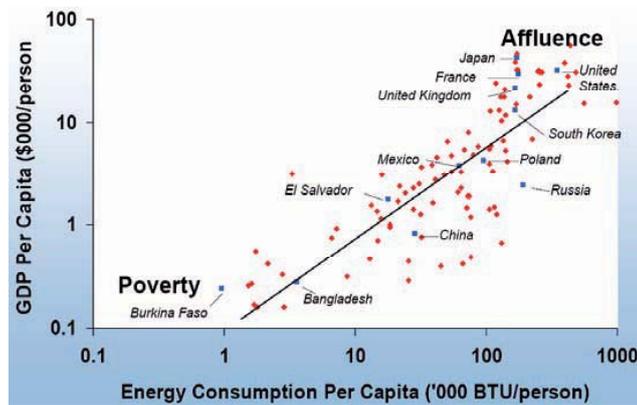
ÉNERGIES FOSSILES ET ÉNERGIES RENEUVELABLES ÉTAT DES LIEUX ET OPTIONS POUR LE MAROC

Philippe A. TANGUY

Chaire de recherche TOTAL, École Polytechnique de Montréal
Membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

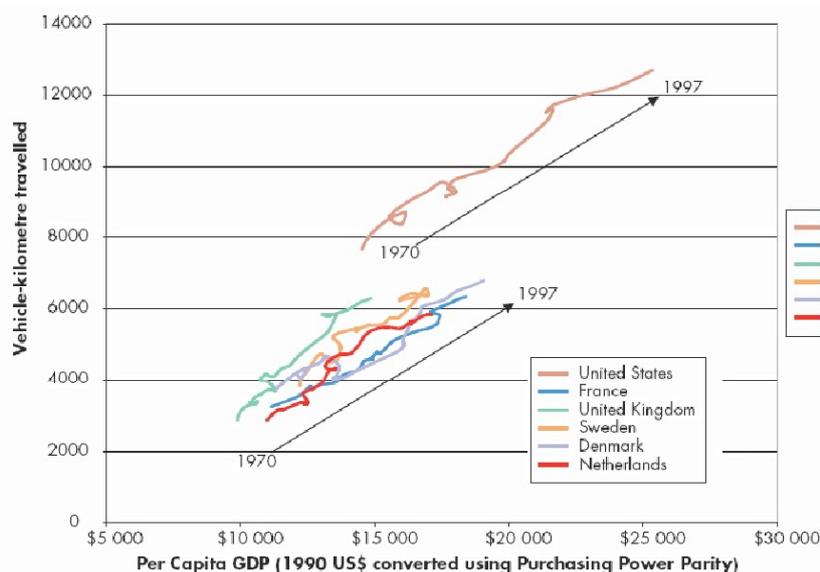
1. MOTEURS DE LA DEMANDE

Je débiterai mon propos par la consommation de l'électricité. Sans surprise, celle-ci est très inégalement répartie entre les pays riches et les pays pauvres. En fait, comme le montre la figure ci-après (Energy Information Administration, 2000), il existe une relation quasi linéaire (en représentation logarithmique) entre le PIB per capita et la consommation énergétique per capita. Les pays les plus avancés comme les États-Unis, la France et le Royaume Uni sont les plus énergivores (en haut à droite du graphique), les pays les plus pauvres sont de très petits consommateurs. Au fur et à mesure que la richesse progresse, la consommation énergétique progresse également. Une bonne illustration de la situation actuelle peut être obtenue en comparant la consommation énergétique du Maroc et de l'Espagne : il existe quasiment un facteur neuf dans la consommation énergétique per capita, le Maroc se situant à 570 kWh/habitant et l'Espagne à plus de 6000 kWh/habitant.



La consommation d'électricité est un signe fort du développement économique mais un autre indicateur probablement tout aussi important est la consommation de carburants. En fait, on constate que plus on est riche, plus on se déplace avec nos véhicules automobiles.

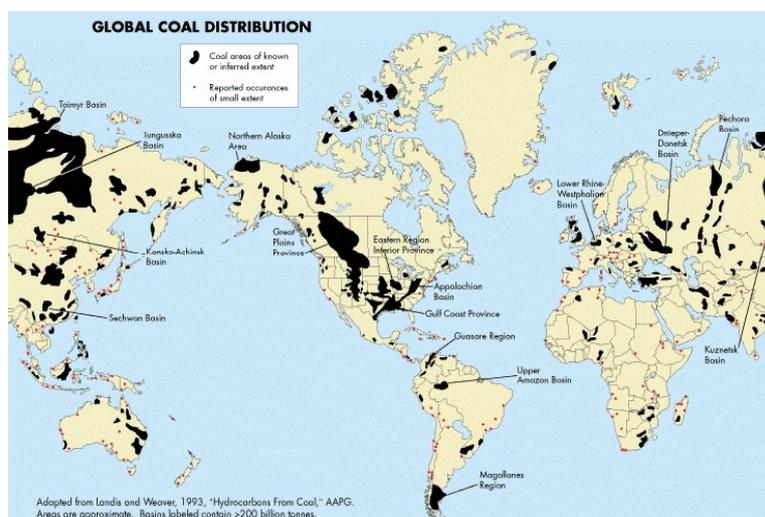
Ici encore la relation qui existe entre la mobilité et la richesse exprimée sous forme du PIB per capita est quasiment linéaire (Transportation and Energy, IEA, 2002). Si nous reprenons notre comparaison avec l'Espagne, le Maroc consomme actuellement environ 170.000 barils de pétrole par jour (la production d'une raffinerie de taille moyenne) c'est-à-dire neuf fois moins que l'Espagne. Si nous prenons le cas de la Malaisie dont le développement est plus avancé que celui du Maroc mais qui est encore loin du niveau de l'Espagne, la consommation de pétrole y atteint déjà 520.000 barils par jour, soit trois fois celle du Maroc. La tendance qui se dessine est claire : plus le Maroc va se développer, plus la consommation d'hydrocarbures va augmenter parce que la mobilité des personnes et des marchandises va croître.



Le moteur principal de la demande est donc l'augmentation de la richesse collective. Le PIB mondial est en croissance constante et les projections montrent que la part du PIB en provenance des pays émergents va augmenter de manière très significative dans les prochaines décennies, ceci en relation non seulement avec la croissance du niveau de vie mais également avec celle de la population. Sous la pression des pays en voie d'industrialisation rapide, je pense à la Chine, à l'Inde, aux pays du Sud-Est asiatique mais également à l'Afrique, en particulier au Maghreb, on estime que la consommation de l'énergie devrait être de 30 à 40% supérieure d'ici 25 ans, ce qui est considérable. La question centrale est comment répondre à cette demande accrue. En effet, le système énergétique construit depuis 100 à 150 ans autour des énergies fossiles montre clairement ses limites. Historiquement, ce système s'est développé à partir du charbon, puis du pétrole dès le début du 20^e siècle. Même si le gaz naturel est vu partiellement comme une énergie primaire de substitution et même si l'on va vraisemblablement assister à une résurgence de l'énergie nucléaire tout au moins sur certains marchés régionaux, combien de temps pourra-t-on fonctionner avec le système énergétique actuel dans la mesure où les ressources primaires qu'il utilise sont finies? Car non seulement la disponibilité d'hydrocarbures et

d'uranium n'est assurée que pour 50 à 60 ans, mais l'accès à ces ressources sera vraisemblablement plus complexe sur le plan géopolitique. Pour assurer la continuité de leur croissance, les grands pays consommateurs ne vont avoir d'autres choix que de modifier leur système énergétique. Quant aux pays en émergence, ils doivent également sérieusement envisager un système énergétique très différent dans la mesure où malheureusement les pays les plus développés auront consommé la majeure partie des ressources fossiles.

La situation présente est-elle préoccupante? J'ai déjà mentionné que les réserves d'hydrocarbures sont de quelques dizaines d'années. On peut aussi compter sur le charbon car les réserves de charbon sont considérables, de l'ordre de 200 ans au rythme d'exploitation actuel. Nous avons également à notre disposition des énergies fossiles dites non conventionnelles, un sujet que je vais aborder un peu plus loin. Par contre, que ce soit le charbon ou ces sources d'énergies primaires non conventionnelles, il s'agit d'énergies « carbonées » qui nécessitent une gestion beaucoup plus stricte des émissions, en particulier de CO₂. Si le système énergétique du futur sera probablement uniquement basé sur des énergies renouvelables, dans les prochaines décennies, les énergies fossiles vont encore constituer la majeure partie du cocktail énergétique, les énergies renouvelables contribuant à un niveau relativement faible (quelques % de la consommation globale), quoique en forte croissance.



Le charbon connaît un regain d'intérêt très significatif car la production d'énergie électrique à partir de pétrole ou de gaz devient moins compétitive en particulier en Asie. Comme le montre le graphique ci-contre, les réserves actuelles de charbon sont de 1000 à 1500 milliards de tonnes. Contrairement au pétrole, elles sont distribuées de manière plus équilibrée au niveau géographique : Amérique du Nord, Chine, Russie, etc. La question primordiale est de savoir s'il est possible d'exploiter et de valoriser le charbon de manière acceptable au plan environnemental, ce que l'on appelle le « charbon propre ». En fait il existe différentes filières toutes basées autour de la même idée à savoir produire un

courant de CO₂ concentré, le capturer et l'enfouir. Les différentes filières sont la combustion en milieu ultra-critique, c'est-à-dire à très haute température et à très haute pression; la concentration des émissions en CO₂ atteint 14%, et le CO₂ peut être capturé par une absorption aux amines qui est une technologie commerciale. Deuxième approche possible, réaliser une oxy-combustion, c'est-à-dire effectuer une combustion en milieu très enrichi en oxygène; on est ainsi capable d'obtenir un courant de CO₂ concentré à plus de 80% que l'on peut ensuite capturer par distillation à très basse température (cryogénie). Autre possibilité, réaliser une combustion sur boucle chimique dans laquelle le combustible réagit sur un oxyde de métal régénéré. Enfin, une voie très en vogue aux États-Unis et en Australie, effectuer une gazéification à cycle combiné dont le schéma est le suivant : production d'un gaz de synthèse c'est-à-dire un mélange de CO et de H₂O, conversion de ce mélange en CO₂ et H₂ sur métal noble, séparation du CO₂ puis enfouissement, l'hydrogène étant pour sa part utilisé comme vecteur énergétique. Toutes ces filières sont bien adaptées à la production électrique mais il est clair comme je le mentionnais dans mon introduction que nous avons aussi besoin de carburants parce que la mobilité des marchandises et des hommes est un fait incontournable du modèle de société que nous nous sommes créé.

Il est possible de fabriquer des combustibles liquides à partir du charbon par le biais de la liquéfaction ou CTL, «Coal to Liquid» en anglais. L'idée est relativement simple : on part du mélange de CO et de H₂O précédent puis on utilise la synthèse Fischer-Tropsch, mise au point avant la 2^{ème} guerre mondiale en Allemagne, et qui permet de produire des C₂+. La réaction s'effectue sur un catalyseur de type fer ou cobalt. Une fois les produits en C₂+ obtenus, un «upgrading» est utilisé pour les transformer en carburant diesel, en carburant super, en naphte ou en produits chimiques. La même réaction est d'ailleurs applicable au gaz naturel, c'est la filière GTL pour «Gas to Liquid».

2. RESSOURCES NON CONVENTIONNELLES

Tentons maintenant d'établir un inventaire des ressources non conventionnelles fossiles dont nous disposons hors uranium. En termes d'huiles, la planète est encore riche en huiles lourdes et extra-lourdes. Il existe également des gisements extrêmement importants de sables bitumineux et de schistes bitumineux. En termes de gaz, la valorisation des réservoirs de gaz à très faible perméabilité, le « Tight Gas » en anglais, est envisagée, tout comme celle des schistes gazifères, celle du Coal Bed Methane, le méthane qui est adsorbé dans le charbon, et éventuellement celle des hydrates de méthane qui sont finalement un mélange solide de méthane et d'eau.

Pour ce qui est des huiles lourdes et des bitumes, il convient de mentionner deux grandes zones de concentration, la première située dans la « Faja Del Orinoco » au Venezuela, qui contient au moins 120 milliards de barils d'huiles lourdes récupérables, et la seconde qui se trouve en Alberta au Canada. Le potentiel récupérable au Canada est de 174 milliards, ce qui le place en deuxième position derrière l'Arabie Saoudite pour ce qui est des réserves. Les ressources albertaines sont concentrées dans plusieurs gisements de sables bitumineux soient les gisements d'Athabasca, de Cold Lake et de Peace River. Ces sables bitumineux sont constitués d'un mélange de 80 à 85% de sable et d'argile, de 5 à 10% d'eau, entre 5

et 15% d'huiles lourdes et jusqu'à 5% de soufre. Le degré API du bitume étant compris entre 8 et 10, les produits sont donc extrêmement visqueux jusqu'à un million de fois plus que l'eau (1.000.000 centipoises). Les technologies d'extraction de ces bitumes sont différentes de celles de l'industrie pétrolière : on peut utiliser une technique d'extraction minière semblable à celle employée pour le charbon, ou encore une technique en cours de développement, qui consiste à injecter de la vapeur dans le gisement. Le procédé minier est un procédé d'extraction à ciel ouvert qui ne concerne que les couches supérieures (jusqu'à 70 mètres de profondeur). Il est basé sur une séparation par flottation qui permet d'extraire le bitume de sa gangue minérale. Le bitume est envoyé par la suite dans un « upgrader » ou une raffinerie pour le transformer *in fine* en pétrole de synthèse. Les résidus de la flottation doivent être quant à eux gérés de manière acceptable pour l'environnement, tout comme l'on doit se préoccuper de la restauration des sites après l'épuisement des ressources, ce qui n'est pas sans poser des défis technologiques importants. L'autre procédé, grand porteur d'espoir, est le drainage à la vapeur. L'idée est d'utiliser une paire de puits, un puits injecteur dans lequel on injecte de la vapeur pour mobiliser la nappe de bitume, et un puits producteur dont les drains sont situés sous ceux du puits injecteur et qui vont capter le bitume et le remonter à la surface. Les deux principaux obstacles sont actuellement d'ordre économique et environnemental, soient la production de la vapeur à des coûts acceptables et la source d'énergie utilisée pour la fabriquer. Pour l'énergie, plusieurs approches sont envisagées : la gazéification du coke de pétrole issu de l'étape d'«upgrading» du bitume, la combustion d'une partie de la production de bitume sous forme émulsionnée, la combustion de charbon ou encore le recours à l'énergie nucléaire.

Pour référence, la technologie de génération de vapeur actuellement en place repose sur la combustion du gaz naturel dont la disponibilité en Alberta diminue rapidement. La technique de drainage à la vapeur utilise 3 à 4 barils d'eau par baril de pétrole, ce qui est considérable. Cette eau doit être recyclée pour être réinjectée de façon à minimiser les prélèvements d'eau fraîche provenant de bassins ou de rivières avoisinantes. Mentionnons pour être complet, deux nouveaux procédés qui sont envisagés pour l'extraction des bitumes, soit le procédé VAPEX basé sur l'injection d'alcanes et qui permettrait donc de s'affranchir de l'utilisation de l'eau, et le procédé Thai (toe-to-heel air injection) qui consiste à effectuer une combustion contrôlée du bitume *in situ* par injection d'oxydant.

Global Oil Shale Resources (10⁶ barrels)

US, Green River Fm.	1,499,000	Sweden	6,114
US, other	619,222	Egypt	5,700
Russia	447,331	Israel	4,000
Brazil	80,000	Kazakhstan	2,837
Morocco	53,381	Turkey	1,985
Jordan	34,172	Luxembourg	675
Australia	32,729	Armenia	305
Estonia	16,286*	Mongolia	294
China	16,000	Hungary	56
Canada	15,241		
Thailand	6,401	Grand Total	2,840,735

Le dégagement de chaleur mobilise la nappe de bitumes qui est ensuite pompée dans un puits producteur.

Abordons maintenant la question des schistes bitumineux. Mentionnons tout d'abord qu'il ne s'agit pas de bitumes mais d'une roche sédimentaire qui contient de la matière organique ayant un pouvoir énergétique intéressant, le kérogène. Ce kérogène dont la composition chimique s'apparente à celle d'un bitume très oxygéné, peut être pyrolysé pour produire de l'électricité ou traité par des méthodes du génie chimique afin d'en extraire une huile qui peut servir de charge pour le raffinage ou la chimie. Le potentiel en huile est de l'ordre de 100 kg par tonne de schistes, une richesse comparable à celle des sables bitumineux d'Alberta par exemple. L'exploitation des schistes bitumineux n'est pas récente. Elle a commencé au 19^{ième} siècle en Écosse mais s'est surtout développée à partir des années 40 dans certaines régions chinoises, dans l'ex-Union Soviétique et en Estonie, pays qui reste le producteur le plus important. Pourquoi s'attarder sur ces schistes bitumineux dont la valorisation est beaucoup plus difficile que celle du pétrole? En fait, les réserves de schistes sont considérables - les chiffres du USGS ci-contre font état de plus de 2.800 milliards de barils en place, c'est-à-dire deux fois les réserves de pétrole connues actuellement - et elles sont situées comme le charbon dans des régions plus accessibles sur le plan géopolitique pour les pays consommateurs, soit les États-Unis, la Russie, le Brésil et le Maroc. Les ressources marocaines s'élèveraient à 54 milliards de barils en place, soit la consommation du Royaume pour plusieurs centaines d'années. Le kérogène et le bitume présentent de nombreuses similitudes : ils ont la même densité, une valeur calorifique à peu près semblable de l'ordre de 35MJ/kg et leurs compositions sont très proches, en particulier leur teneur en hydrogène et en carbone.

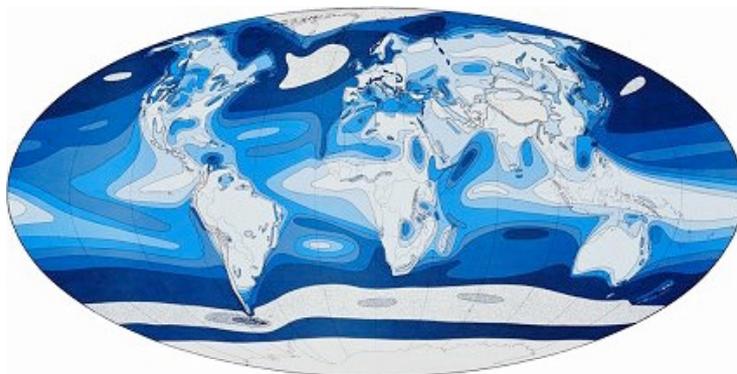
La valorisation des schistes bitumineux fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développement. Une première possibilité est de passer par une extraction minière classique, suivie d'un broyage et d'une pyrolyse directe pour générer de l'électricité. Deuxième possibilité, récupérer l'huile plutôt que produire de l'électricité. Ceci peut s'effectuer par « retorting » qui est une forme de distillation réactive à 450 degrés. A cette température, le kérogène se transforme en huile qui peut par la suite être upgradé comme le bitume. Plutôt que de passer par une étape d'extraction minière, on envisage de réaliser la conversion du kérogène *in situ*, c'est-à-dire de produire l'huile par chauffage direct de la formation géologique. Un procédé est en cours de développement par Shell qui consiste effectivement à introduire des systèmes de chauffage distribués dans le sous-sol, des sortes de puits de chauffage, puis à récupérer l'huile après « retorting » par des puits producteurs. Shell, qui expérimente cette approche dans un champ pilote au Colorado, met beaucoup d'espoir dans cette technologie qu'elle espère industrialiser d'ici quelques années. D'autres procédés de valorisation ont été étudiés, dont l'extraction supercritique qui consiste à solubiliser la matière organique dans le kérogène en utilisant de l'eau ou du toluène à l'état supercritique, et le chauffage du champ par ondes électromagnétiques. On peut se demander quel est l'état réel d'avancement de ces technologies et de cette exploitation des schistes bitumineux. Il n'existe pas d'industrialisation à grande échelle, hormis en Estonie. Par contre plusieurs usines pilotes sont en activité, celle de Shell déjà mentionnée mais aussi celle de Petrobras à Curitiba au Brésil. L'incertitude technologique reste encore très élevée, surtout en ce qui concerne les coûts de production et l'impact

environnemental. Ce dernier est extrêmement préoccupant en particulier dans les procédés *in situ* parce qu'il y a évidemment une possible contamination de la nappe phréatique. Mais dans la mesure où les réserves sont considérables, les enjeux sont très importants et la recherche va s'intensifier.

Abordons maintenant une autre ressource fossile potentielle, les hydrates de méthane. Les hydrates de méthane sont constitués d'un mélange d'eau et de méthane sous forme cristalline qui a l'apparence de la glace. 1 m³ d'hydrates contient 0,8 m³ d'eau et 160m³ de méthane. Les hydrates se forment dans des conditions thermodynamiques bien précises : une température de quelques degrés Celsius et une pression de quelques dizaines de bars. Ce sont des conditions que l'on rencontre typiquement au fond des mers, mais aussi en eau peu profonde dans les régions polaires. En fait, 4 régions ont été identifiées où le potentiel en hydrates pourrait être important : l'Arctique canadien, la fosse de Nankai au large de la côte orientale du Japon, la région de Cascadia au large de la Colombie Britannique, et enfin la zone de Blake Ridge au large de la côte orientale de la Caroline du Sud et de la Floride. Il existe une grande disparité dans les estimations des réserves selon que l'on prend en compte les hydrates présents sous forme diffus au fond des mers (couche de quelques centimètres) où seulement les gisements clairement identifiés. L'exploitation commerciale des hydrates n'est pas encore possible mais plusieurs technologies sont envisagées dont la dépressurisation du champ ou le chauffage de la formation pour dissocier le gaz de l'eau, ou encore l'injection de méthanol, un inhibiteur de la formation d'hydrates déjà employé dans les gazoducs sous-marins. La principale difficulté est de réaliser cette dissociation de manière contrôlée pour assurer la sécurité du procédé. Ces trois possibilités ont été étudiées par la société BP dans un projet sur les hydrates de gaz en Alaska il y a quelques années.

3. ÉNERGIES RENOUVELABLES

Même si nous disposons encore d'un certain potentiel en énergies fossiles conventionnelles et non conventionnelles, il est clair que dans une perspective de développement durable, seul un système énergétique basé uniquement sur des énergies entièrement renouvelables s'avère viable et l'édification d'un tel système doit débiter dès maintenant. Il existe plusieurs sources d'énergies renouvelables potentielles toutes issues directement ou indirectement de l'influence du soleil sur la biosphère. Certaines font partie du paysage



depuis longtemps, je pense en particulier à l'hydroélectricité, d'autres sont apparues plus récemment mais sont déjà présentes comme l'énergie éolienne et l'énergie solaire. L'énergie éolienne et l'énergie solaire sont intermittentes, ce qui pose deux problèmes : d'une part leur intégration harmonieuse dans le réseau électrique traditionnel, et d'autre part le stockage de l'énergie de manière à pouvoir suppléer à la demande en l'absence de vent ou de lumière.

La demande énergétique actuelle est basée sur la disponibilité de trois ressources: l'électricité pour l'usage domestique et industrielle, les carburants pour les transports et finalement des charges pour l'industrie chimique. L'énergie éolienne et l'énergie solaire peuvent donc nous fournir de l'électricité. Nous avons également à notre disposition la biomasse qui peut fournir de l'électricité mais qui a aussi l'avantage de pouvoir être transformée en carburants ou en produits chimiques. A l'heure actuelle, la part des énergies renouvelables dans le cocktail énergétique représente un pourcentage faible. Les projections effectuées par Exxon, BP et Shell montrent que ce pourcentage sera encore faible dans vingt-cinq ans même si leur croissance va connaître un développement spectaculaire. Il faut dire qu'on part de loin...

Qui dit énergie éolienne, dit gisements de vent. Où trouve-t-on les gisements de vent les plus favorables sur terre? Ils sont situés principalement dans les régions tempérées. Sur cette carte (source : NREL), les zones en bleu foncé sont les zones où les vents sont les plus réguliers et les plus intenses. En termes de vitesse de vent, on considère une valeur de 6 m/s comme un seuil acceptable. C'est la valeur que l'on cherche donc à obtenir à quelques dizaines de mètres du sol, là où se trouvent les pales des éoliennes. La puissance éolienne obéit à la loi de Betz, qui exprime que la puissance varie proportionnellement au carré du diamètre de la pale et au cube de la vitesse de la pale. Les aérogénérateurs sont d'ailleurs classifiés suivant leur puissance : de quelques centaines de kW pour des applications locales dans un réseau distribué jusqu'à 5 MW pour des applications réseau dans le cadre de fermes éoliennes. Même si le développement technologique des aérogénérateurs est bien avancé, il existe encore certains défis à relever pour en renforcer l'industrialisation. Mentionnons en premier lieu les défis climatologiques : la caractérisation du potentiel du gisement est en effet fondamentale, une étape qui prend typiquement deux ans. Le fait de pouvoir utiliser pour les pales des matériaux légers et résistants tel des composites constitue aussi un véritable, tout comme la maîtrise des problèmes de vibration, le rendement de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, et enfin, dans le cas des fermes éoliennes, le positionnement optimal des éoliennes, c'est-à-dire l'espacement latéral des éoliennes et les turbulences de sillage qui perturbent le vent et nuisent au rendement.

L'énergie solaire est l'énergie renouvelable qui a le plus d'avenir. 51% des radiations qui atteignent la terre sont absorbés et le reste est réfléchi. On reçoit du soleil environ 20 000 TW, un chiffre à comparer à la consommation annuelle mondiale d'énergie qui est de 12,5 TW. L'irradiation que nous recevons est donc très excédentaire par rapport à nos besoins, mais elle est inégalement distribuée. Plus on s'éloigne de l'équateur et des zones tropicales moins l'irradiation est importante. Si on considère le cas de l'Europe, les régions les plus favorables en termes d'irradiation de l'énergie solaire sont les régions méditerranéennes. Clairement l'Europe du Nord est beaucoup moins favorisée! Pour ce

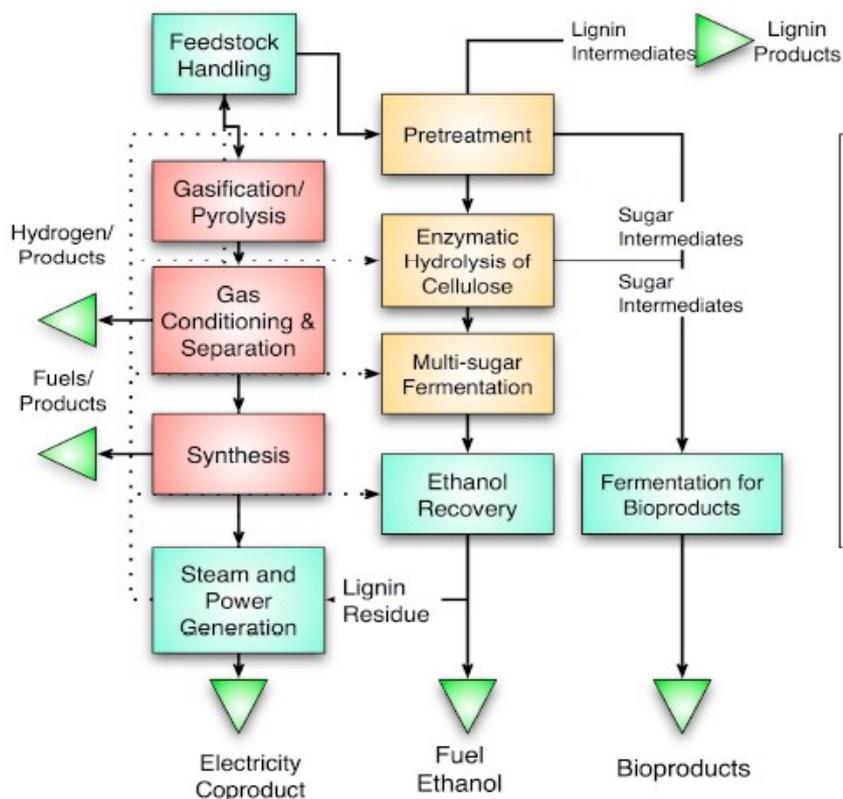
qui est de l'Afrique, le Maghreb et l'Afrique saharienne sont positionnés de manière idéale. J'aimerais ici donner deux exemples, le cas du Niger et celui du Québec. Le Niger reçoit près de 3700 heures par an d'ensoleillement et la densité d'irradiation est de 5,25 kWh/m²/jour tandis que le sud du Québec, qui se situe à la latitude de Bordeaux, reçoit 1500 heures par an d'ensoleillement et la densité n'est seulement que de 1,2 kWh/m²/jour. On voit donc ici que le Niger est une zone beaucoup plus favorable pour la captation d'énergie solaire que le Québec même si il est aussi possible d'utiliser l'énergie solaire au Québec, mais de manière plus limitée.

La captation de l'énergie solaire utilise deux grandes techniques : les cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs et les capteurs solaires concentrés, sous forme de récepteurs cylindrico-paraboliques, de récepteurs paraboliques ou de tours solaires. Dans le cas des capteurs solaires concentrés, il s'agit de chauffer un fluide caloporteur qui sera ensuite utilisé dans une turbine de génération d'électricité classique. Il existe une adéquation entre l'irradiation et la puissance que l'on cherche à capter. Les applications photovoltaïques sont plutôt adaptées aux faibles puissances et aux irradiations solaires relativement grandes, les systèmes de capteurs paraboliques aux puissances moyennes et les tours solaires pour les applications de puissance élevées. La centrale PS 10 en Andalousie, dont l'initiateur est notre collègue académicien, le Professeur Valeriano Ruiz de l'Université de Séville, et qui vient d'être inaugurée est un exemple de centrale thermosolaire typique.

Lorsqu'on effectue une analyse comparative du coût de production de l'électricité en fonction des différentes sources, soit l'éolien, le thermosolaire ou le photovoltaïque, on s'aperçoit que l'énergie éolienne est actuellement la plus rentable et est même compétitive par rapport aux sources d'énergies fossiles. On pense que l'énergie thermosolaire va d'ici une dizaine d'années rejoindre l'énergie éolienne en termes de coût de production d'électricité, et l'on espère que le photovoltaïque sera également capable de devenir également extrêmement compétitif d'ici une vingtaine d'années.

L'énergie de la biomasse est sans conteste la plus vieille énergie utilisée par l'homme. Dans sa version moderne, il existe plusieurs voies pour valoriser cette biomasse au plan énergétique, c'est le concept de bioraffinage illustré sur le dessin ci-après (source: DOE) : la pyrolyse directe pour la génération d'électricité, la génération de biogaz qui peuvent être brûlés ou éventuellement convertis en biocarburants, la voie dite humide de production de liquides de type alcool par fermentation ou conversion enzymatique, et enfin la voie oléochimique du raffinage de corps gras (non représenté sur le graphique) également à des fins de biocarburants. Mentionnons qu'il est aussi possible de générer des « bio »-molécules pour la chimie. L'avantage de la biomasse, au moins au plan théorique, est qu'elle ne génère pas d'émission nette de CO₂. La biomasse est produite par photosynthèse et par absorption du CO₂ de l'atmosphère. Lors de sa conversion en énergie, cette biomasse va « relarguer » le CO₂ qu'elle a absorbée. Le bilan net est donc nul.

Outre le caractère économique de la production d'énergie à partir de la biomasse qui est encore problématique, la question de l'approvisionnement en biomasse se pose. On peut penser cultiver des plantes énergétiques, valoriser les coproduits agricoles ou encore à



utiliser des résidus. Se posent malgré tout le problème moral de la compétition entre les usages et celui de l'utilisation des ressources agricoles et des terres cultivables à des fins énergétiques plutôt qu'alimentaires.

Toutes ces énergies non conventionnelles ont un coût : dans le cas de l'éthanol, ces coûts se situent entre 35.000 \$ US et 55.000 \$ US par baril par jour comparativement aux sables bitumineux qui sont inférieurs à 40.000 \$ US et aux huiles extra lourdes qui sont de l'ordre de 27.000 \$ US à 30.000 \$ US. Des études économiques sont donc indispensables pour s'assurer que la production peut être effectuée à un coût acceptable.

4. QUELQUES PISTES POUR LE MAROC

Considérons maintenant la problématique du Maroc. En 2000, le Maroc a consommé 9,6 MTep pour une production nationale de 0,25 MTep, soit quelques pour cents. On peut donc imaginer le coût des importations énergétiques dans la balance des paiements du Royaume. L'avenir est cependant très prometteur car le Maroc recèle de nombreuses potentialités énergétiques, soit les schistes bitumineux – je mentionnais précédemment que le Maroc a en place plus de 50 milliards de barils de pétrole sous forme de kérogène

– et des ressources en énergies renouvelables. Les schistes bitumineux marocains sont actuellement inexploités. On trouve des gisements importants dans 3 régions : Tarfaya, Timahdit et Tanger. Ces schistes pourraient être valorisés en carburants plutôt qu'en électricité parce qu'il existe d'autres moyens de générer l'électricité au Maroc à partir de sources renouvelables. Pour ce qui est des schistes, deux voies de valorisation sont envisageables : le «retorting» de surface en passant par un procédé minier ou bien le procédé de conversion *in situ* de Shell s'il s'avère viable en termes économique et environnemental. Il existe d'autres procédés possibles sur lesquels on peut se pencher; je crois que le point le plus important est de réellement s'assurer que les procédés qui seront utilisés sont acceptables tant sur le plan économique, environnemental que sociétal.

En termes d'énergies renouvelables, le Maroc possède trois gisements importants : le solaire, l'éolien et la biomasse. Le potentiel solaire du Maroc est excellent : 3000 h/an d'ensoleillement et des densités de l'ordre de 5 kWh/m²/j, ce qui lui confère un potentiel supérieur à celui de l'Andalousie. Plusieurs projets sont déjà mis en œuvre dont l'électrification rurale par photovoltaïque et la construction d'une centrale combinée gaz-solaire dans le Nord-Est.

Le potentiel éolien du Maroc est également excellent. Le Maroc compte 3500 km de côtes maritimes et il existe des régions dans lesquelles les gisements de vent sont de grande qualité : dans la région de Safi-Essaouira, celle de Tanger mais également le long des côtes du Sahara occidental marocain. Un potentiel intéressant qu'il convient de valoriser au mieux. Plusieurs projets sont en cours en particulier dans le nord et près de Safi.

L'avenir est très porteur à plus d'un titre. En effet, non seulement les gisements potentiels sont importants mais la technologie est accessible. En termes concrets, il va falloir lancer des recherches sur l'emplacement des gisements et l'adaptation des technologies, et, pourquoi pas, en profiter pour développer une filière industrielle marocaine d'énergie éolienne à l'instar de ce qui a été fait en Espagne où en une dizaine d'années une nouvelle industrie éolienne purement espagnole est née.

Le potentiel en biomasse est également excellent puisqu'il existe environ 5 millions d'hectares de forêts au Maroc, sans compter le potentiel biogaz et résidus. J'aimerais cependant changer de perspective et regarder plutôt vers une production de biocarburants à partir de terres actuellement non cultivées, en faisant appel à une agriculture dédiée sur des terres semi-arides. Je pense au sorgho ou au millet, deux céréales rustiques qui se contentent d'un sol pauvre et d'un apport d'eau faible.

La valorisation du sorgho à des fins de biocarburant - le procédé Mixalco développé à l'Université du Texas A&M aux États-Unis – est obtenue par fermentation et fabrication de sels de carboxylate qui sont par la suite hydrogénés pour être transformés en un mélange d'alcool. Ce procédé qui existe à l'échelle pilote est extrêmement prometteur. D'autres options sont possibles comme en témoignent les initiatives brésiliennes qui pourraient être une source d'inspiration.

5. CONCLUSION

Le projet PACTE pour "Pôle d'Activités Concertées en Technologies de l'Énergie" qui est le projet "Énergie" du Collège de l'Ingénierie et du transfert de l'innovation technologique de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, est un projet d'approche structurée pour accompagner le Maroc vers une certaine autosuffisance énergétique. Le PACTE est organisé autour de trois composantes. Tout d'abord un Institut de recherche sur les technologies de l'énergie qui traiterait des thèmes « schistes bitumineux" et "énergies renouvelables »; la deuxième composante du PACTE serait une technopole de type grappe industrielle où l'on pourrait imaginer entre autres la structuration d'une industrie éolienne marocaine; une dernière composante enfin qui serait une structure de réflexion et de coordination tripartite sur le plan national, regroupant les institutionnels, les industries et les universités.

Le Maroc est riche en énergies fossiles et en énergies renouvelables. Il convient de soutenir et d'accentuer les efforts de R&D, de formation de la main d'œuvre et d'entrepreneuriat afin d'en assurer l'industrialisation et l'utilisation en pleine harmonie avec la nature, dans le cadre des initiatives déjà en place visant le développement humain et la modernisation économique du pays.



L'ENERGIE AU MAROC

Amina BENKHADRA

Directeur Général de l'Office National
des Hydrocarbures du Maroc (ONHYM)

Résumé

Depuis un demi-siècle, de profonds changements sont intervenus dans le paysage énergétique mondial : Doublement de la population, multiplication par 3 de la consommation énergétique, bouleversements géopolitiques et changements climatiques. Ce dernier paramètre a introduit une nouvelle contrainte liée à la réduction nécessaire des émissions de carbone. Or, la production d'énergie reste encore dominée par les combustibles fossiles, responsables de ces émissions. Le charbon dont les réserves sont considérables pollue trop, le pétrole et le gaz dont l'horizon est plus limité sont indispensables à certains secteurs tels que les transports et la production d'électricité, l'hydraulique a des capacités pratiquement saturées, le nucléaire est la seule énergie sans carbone et la plus économique, mais soulève encore des craintes dans le public. Les économies d'énergie sont partout requises et les énergies renouvelables restent à un faible niveau. Aussi, les défis à relever sont d'ordre technologique, car il s'agira de trouver des solutions à une double contrainte : satisfaire une demande énergétique en nette augmentation surtout dans les PVD et réduire les émissions de gaz à effet de serre. La présentation abordera dans une première étape la situation énergétique internationale en mettant en évidence les enjeux énergétiques planétaires. Puis, elle examinera la situation énergétique au niveau du Maroc, pays dépendant de l'extérieur pour plus de 95% de ses besoins mais dont le paysage énergétique est en mutation grâce à l'introduction de nouvelles sources d'énergie (gaz naturel et énergies renouvelables), à la généralisation de l'énergie pour tous (PERG), à la modernisation de son outil de raffinage, à une nouvelle impulsion de la recherche pétrolière et à la réforme du secteur de l'électricité. Les différents axes de la politique énergétique nationale seront passés en revue en mettant l'accent sur le rôle que la R&D joue en particulier au niveau de la mise en valeur de nos ressources en schistes bitumineux, du développement des énergies renouvelables et de l'utilisation de l'énergie nucléaire.

1. LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

L'énergie constitue incontestablement le moteur du développement économique et social de tout pays. Elle revêt une importance stratégique capitale dans la mesure où elle est indispensable au fonctionnement de l'économie et de la société mais aussi parce qu'il y a des risques quant à son approvisionnement.

Durant les 25 dernières années, la demande mondiale d'énergie a connu une **croissance soutenue** qui s'est accélérée depuis le début de la présente décennie avec l'émergence de nouveaux gros consommateurs tels que la Chine, l'Inde ou le Brésil.

L'énergie consommée chaque jour dans le monde provient en grande partie d'énergies fossiles dont les réserves ne sont pas inépuisables. A cet égard, l'évolution de la consommation mondiale d'énergie permet de faire les constatations suivantes :

- La part du pétrole qui représentait plus de 40% en 1980 a diminué pour ne représenter que 37% en 2004 au profit du gaz naturel dont la part a augmenté passant de 20% à 25% durant la même période,
- Les hydrocarbures représentent ainsi près des 2/3 de l'énergie consommée dans le monde, l'autre tiers est représenté par le charbon dont la part est restée pratiquement stable (autour de 35%) ;
- Le nucléaire et l'énergie hydroélectrique représentent à peine 5 à 6% du total.

Ces tendances montrent s'il en est besoin toute l'importance stratégique et géostratégique des hydrocarbures dans les relations internationales.

1.1. Le pétrole

Si on s'intéresse au pétrole en particulier, l'on s'aperçoit qu'outre le fait qu'il est incontestablement une source prédominante d'énergie, il a également deux particularités : i) la majeure partie des réserves pétrolières se trouve dans des régions où la consommation est relativement faible, ii) les deux tiers des réserves prouvées sont situées au Moyen Orient. Il en résulte par conséquent une nécessité impérieuse pour tous les pays du monde de diversifier leurs sources d'approvisionnement et de sécuriser leurs approvisionnements car la consommation pétrolière mondiale qui a pratiquement doublé au cours des 35 dernières années devrait continuer à augmenter selon les prévisions de l'AIE et du Département américain de l'énergie pour atteindre 90 mbj en 2010 et 118 mbj en 2025 contre 82 mbj actuellement.

1.2. Le gaz naturel

Les plus importantes réserves de gaz naturel prouvées se trouvent sur le sol de l'ex-Union soviétique et au Moyen-Orient. L'ex-URSS détient en effet 43,44% des réserves mondiales, la Fédération de Russie détient à elle seule 27% des réserves mondiales. Le Moyen Orient renferme 40% des réserves gazières mondiales, le Qatar détient à lui seul 36% des réserves de cette zone.

Contrairement au pétrole, le gaz naturel fait l'objet en règle générale d'un commerce international réglé par des contrats à long terme (20 à 25 ans). Ces durées sont nécessaires pour amortir les investissements énormes dans la prospection, l'extraction, les installations de transport et de distribution. De ce fait, le marché du gaz se distingue par une certaine convergence entre les intérêts des producteurs et des acquéreurs, ce qui contribue à une relative sécurité d'approvisionnement. Les événements de janvier 2006 au plus fort de la crise entre la Russie et l'Ukraine ont cependant balayé en brèche cette certitude.

Par ailleurs, le marché international du gaz connaît depuis quelques années des mutations dans la mesure où il est en train de passer de marchés régionaux vers un marché mondial avec le développement des capacités de GNL à travers le monde. Autre mutation de ce marché, c'est l'ouverture aux opérateurs privés notamment en Europe de l'Ouest.

Importance et évolution prospective des énergies dans le monde

	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire	Energies renouvelables
Part dans la consommation primaire	37%	21%	24%	7%	9%
Inconvénients	Effet de serre Forte concentration des ressources (Moyen Orient)	Effet de serre concentration des ressources (Russie)	Effet de serre Ressources plus équitablement réparties dans le monde Pollution	Peur des déchets nucléaires	Energie aléatoire en fonction des conditions climatiques
Réserves (années de consommation actuelle)	Prouvées : 40	Prouvées : 65	Prouvées : 220	Prouvées : 70	infinies
Prix	Tendance à la hausse avec l'épuisement	Tendance à la hausse avec l'épuisement			Tendance à la baisse avec le progrès

1.3. Les enjeux

En ce début du 3ème millénaire, le monde doit faire face à des contraintes incontournables en matière d'énergie : répondre à une demande croissante à l'échelle planétaire et se préparer à l'épuisement des réserves des énergies fossiles. Les enjeux auxquels la communauté internationale est confrontée sont de deux ordres : 1) la sécurité énergétique, 2) le droit à l'énergie pour tous, 3) les changements climatiques et 4) les investissements en infrastructures énergétiques.

1.3.1. La sécurité énergétique

La problématique de la sécurité énergétique a été exacerbée depuis les attentats du 11 septembre 2001 et l'instabilité géopolitique croissante qui touche en particulier les régions où il y a une grande concentration de réserves d'hydrocarbures.

Trois raisons sont à l'origine de cette problématique :

- **Raisons physiques** : la concentration des réserves des hydrocarbures (Moyen Orient et ex-URSS). 62% des réserves prouvées de pétrole se trouvent au Moyen Orient. L'Arabie Saoudite possède à elle-seule 25% des réserves prouvées dans le monde. En face, une concentration de la demande : Les Etats-Unis représentent à eux seuls plus de 25% de la consommation mondiale de pétrole. Ils importent 55% de leurs besoins de l'extérieur dont 15% de l'Arabie Saoudite.

- **Raisons politiques : Instabilité politique du Moyen Orient** (conflit israélo-arabe, guerre en Irak, tensions avec l'Iran);
- **Raisons institutionnelles** : Il s'agit de la vague de **nationalisations** qui a touché l'ensemble des pays de la région du Moyen Orient avec le transfert de propriété des gisements pétroliers des sociétés multinationales aux Etats souverains.

De ce fait, la sécurité des approvisionnements pétroliers est devenue aujourd'hui un défi majeur pour tous les pays et notamment les pays non pourvus de réserves.

Tous les pays, qu'ils soient industrialisés ou en développement ont été obligés de mettre en place des politiques énergétiques basées sur :

- La **diversification** géographique des sources d'énergie,
- La **substitution** du pétrole par d'autres formes d'énergie, de préférence locales;
- La mise en place de politiques **d'économie d'énergie** en vue d'accroître l'efficacité énergétique sans porter atteinte au rythme de la croissance économique.

1.3.2. L'énergie pour tous

"Comme l'eau, l'énergie est indispensable à la vie. Tous les hommes y ont droit."

La situation actuelle dénote des inégalités énergétiques mondiales qui deviennent de plus en plus insupportables. Aujourd'hui, la consommation d'énergie par habitant et par région va de 0,3 tep en Afrique à 8 tep aux Etats-Unis. L'Asie (non compris le Japon) a une consommation de 0,6 tep par habitant.

A l'heure actuelle, 1,6 milliards d'habitants n'ont pas accès à l'électricité dont 80% en Asie du Sud et en Afrique Sub-saharienne.

L'accroissement de la demande de la Chine et de l'Inde constaté ces dernières années est probablement le début d'un réajustement énergétique à l'échelle mondiale qui va bouleverser les prévisions du doublement de la consommation actuelle à l'horizon 2050, élaborées sur la base du seul accroissement démographique. La demande d'électricité va probablement augmenter beaucoup plus rapidement eu égard à l'urbanisation rapide dans pratiquement tous les pays en développement.

1.3.3. Les changements climatiques

Le troisième enjeu majeur est l'émission des gaz à effet de serre. En guise d'illustration, il faut savoir qu'en France par exemple, 78 % des émissions sont liées à la consommation d'énergie au travers :

- Les transports (26,75 %)
- L'activité industrielle (19,9 %)
- Les bâtiments pour le chauffage, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire (18,4 %)
- La production d'énergie (12,95 %)
- Les 22 % restants sont des émissions de gaz à effet de serre dues à l'activité agricole (19,4%) et au retraitement des déchets (2,6%)

On a constaté que la consommation des ressources naturelles des 40 dernières années a dépassé le cumul de celles consommées depuis l'origine de l'humanité. L'équilibre entre l'homme et son environnement naturel s'est trouvé perturbé. D'où la nécessité d'un changement des systèmes énergétiques à travers l'utilisation d'énergies propres et d'une meilleure utilisation de l'énergie (efficacité énergétique). Cela n'est possible qu'à travers une coopération internationale plus volontariste privilégiant la concertation et l'adhésion de tous pour instaurer un nouveau mode de régulation de l'énergie à l'échelle planétaire.

1.3.4. Les investissements en infrastructures énergétiques

La demande mondiale en énergie devrait augmenter de près de 50% à l'horizon 2030. 80% de cette augmentation devrait intervenir dans les pays en développement. Pour satisfaire la demande future en énergie, d'énormes investissements sont nécessaires. Le total des besoins mondiaux de financement dans l'ensemble des secteurs de l'énergie est estimé selon l'AIE à 20.000 milliards de \$ US sur la période 2005-2030. Sur ce total, la majeure partie (62%), serait accaparée par les projets électriques. La part du gaz naturel et du pétrole serait de 18% chacun, celle du charbon (2%).

2. LES SPÉCIFICITÉS DU SECTEUR ÉNERGÉTIQUE MAROCAIN

2.1. Une forte dépendance énergétique

Au Maroc, la situation énergétique se caractérise par une double dépendance ;

- Dépendance de l'extérieur pour la satisfaction de plus de 95% de ses besoins en énergie
- Dépendance vis-à-vis des énergies fossiles (pétrole et charbon)

En effet, depuis la fermeture de la mine de Jerada en 2000, les seules productions d'énergies fossiles sont les extractions assez modestes de condensat et de gaz naturel dans le Gharb et la région d'Essaouira. Les seules ressources du pays se limitent pour l'heure aux énergies renouvelables :

- La biomasse qui a un poids significatif dans le bilan énergétique, mais qui a des conséquences néfastes sur l'environnement
- L'hydroélectricité dont la contribution fluctue en fonction de la pluviométrie
- L'énergie solaire dont la contribution reste insignifiante malgré un potentiel d'ensoleillement considérable
- L'électricité éolienne dont la participation au bilan énergétique reste encore limitée.

Dans ces conditions, le taux de dépendance énergétique du Maroc reste élevé et enregistre une hausse continue (93% en 1994- 96% en 2005).

La facture énergétique ne cesse de s'alourdir, elle a atteint en 2006 la valeur record de 44,25 Milliards de DH selon le dernier bulletin mensuel publié par l'Office des Changes. Ce niveau représente une hausse de 12% par rapport à l'année 2005 et résulte de la hausse des achats de gasoil et du fuel, de gaz de pétrole et de pétrole brut. S'agissant du pétrole brut, les importations en 2006 ont connu une hausse de 5,1% malgré un recul de 11,3% en volume selon le dernier bulletin statistique de l'Office des Changes.

2.2. Une consommation d'énergie primaire encore faible

La consommation d'énergie primaire par habitant est de l'ordre de 0,4 tep d'énergies conventionnelles par tête et par an, et environ 0,5 tep si l'on inclut la biomasse-énergie. En comparaison avec certains pays du pourtour méditerranéen, cette consommation reste assez faible : Tunisie (0,82), Turquie (1,15), Portugal (2,46), Espagne (3,13), France (4,25) –Chiffres 2004 – Source : AIE.

2.2.1. Une part prépondérante des énergies fossiles importées

Désignation	1994	2001	2005
Produits pétroliers	78,4%	65,8%	61,6%
Charbon	16,2%	31,7%	30,2%
Electricité hydraulique et importée	5,1%	2,2%	4,7%
Gaz naturel	0,2%	0,4%	3,1%
Energie éolienne	-	-	0,4%

2.2.2. Le bilan énergétique

Au Maroc, le bilan énergétique reste dominé par les énergies fossiles dont la part dépasse 90% avec une part encore dominante des produits pétroliers. Il faut tout de même reconnaître que de réelles avancées ont été accomplies dans la reconversion du pétrole au charbon depuis les chocs pétroliers des années 80 avec la conversion des cimenteries et des sucreries au charbon. De même, certaines centrales thermiques de l'ONE et surtout la centrale thermique de Jorf Lasfar fonctionnent au charbon et non au fuel. On a donc assisté à une tendance inverse : d'une part, une baisse graduelle de la part des produits pétroliers qui est passée de 78% à 62%, d'autre part, un accroissement substantiel de la part du charbon qui a pratiquement doublé en 10 ans.

2.2.3. Le gaz naturel

Avec le démarrage de la centrale à cycle combiné de Tahaddart, le gaz naturel a fait une entrée remarquable dans le paysage énergétique national. La part de ce combustible dans le bilan énergétique est ainsi passée de 0,2% en 1994 à plus de 3% en 2005.

2.2.4. L'énergie éolienne

Cette énergie fait également son entrée avec le démarrage en 2000 du parc éolien de Koudia Al Beida ; représentant 0,4% à peine dans le bilan énergétique en 2005, la part de cette énergie restera limitée et ne devrait pas dépasser 6% à l'horizon 2012.

Place du secteur de l'énergie dans l'économie nationale

Part dans le PIB	7 %
Investissements	10 milliards de DH/an
Effectif employé	30.000
Recettes fiscales	12,5 milliards de DH
Facture énergétique	37,7 milliards DH
Consommation énergétique	0,41 Tep/an/habitant
Consommation en énergie électrique	590 KWh/habitant/an

3. ENJEUX ET DÉFIS DU SECTEUR ÉNERGÉTIQUE AU MAROC

La problématique de l'énergie qui se pose au Maroc est d'une part, de relever les défis liés aux contraintes déjà évoquées et d'autre part, saisir les opportunités offertes par les différents atouts dont dispose le pays dans le cadre d'une stratégie à moyen et long terme mûrement réfléchie et acceptée par toutes les parties prenantes (Pouvoirs publics, opérateurs privés et société civile).

La problématique de l'énergie au Maroc se pose en termes de :

- Satisfaction de la demande énergétique qui s'accroît de 8 à 9% par an au minimum
- Diversification des énergies utilisées
- Sécurité des approvisionnements énergétiques
- Electrification de l'ensemble du pays à travers le PERG dans le but de généraliser l'accès de l'énergie à tous. Cette politique a enregistré un grand succès dans la mesure où le taux d'électrification rurale dépasse aujourd'hui les 90%.
- Et, achèvement du processus de libéralisation du secteur.

Pour relever ces défis, la stratégie énergétique nationale doit s'articuler autour des objectifs suivants :

- Veiller à la sécurité d'approvisionnement en toutes circonstances et au moindre coût par la diversification des formes d'énergie utilisées et de leurs origines, la diversification des origines d'importation de pétrole et de charbon, le relèvement des niveaux des stocks stratégiques et, par la garantie de la sûreté des installations énergétiques et de la qualité des produits.
- Planifier, programmer et opérer les choix stratégiques en s'assurant de la cohérence du système énergétique dans son ensemble. Les choix stratégiques entre les différentes filières doivent être opérés en gardant toutes les options ouvertes sur le long terme (charbon-pétrole mais aussi gaz et énergies renouvelables). La planification exige également la programmation des projets et l'assurance que les investissements nécessaires sont réalisés à temps.
- Mettre en place les réformes institutionnelles et structurelles qu'appellent les options retenues.
- Encourager l'exploration et le développement des ressources locales par l'intensification de l'exploration pétrolière, une plus grande utilisation des énergies renouvelables et la mise en valeur de nos ressources en schistes bitumineux.

Le Maroc ne manque pas d'atouts. Tout d'abord, sa situation géographique stratégique qui en fait un véritable carrefour énergétique entre l'Europe du Sud et le Maghreb. Son économie est une des plus libérales et des plus ouvertes à l'initiative privée, des réformes audacieuses ont été réalisées touchant l'ensemble des secteurs y compris le secteur de l'énergie. Ce dernier dispose d'un certain nombre d'atouts dont le potentiel en énergies renouvelables et celui de nos bassins sédimentaires insuffisamment explorés.

3.1. Une position géographique stratégique

La position géographique du Maroc en fait un pays de transit par excellence. Pays d'Afrique le plus proche du continent européen, le Maroc bénéficie d'un statut avancé dans le cadre de la politique européenne de voisinage (PEV).

Cette position géographique a permis la réalisation d'interconnexions électriques et gazières à travers :

- Le gazoduc Maghreb Europe (GME) mis en service en 1996 et dont la capacité a été relevée à 12,5 Milliards de m³.
- L'interconnexion électrique avec l'Algérie et l'Espagne ouvrant la voie à une gestion de l'approvisionnement dans un cadre régional de l'électricité.

Le Maroc est ainsi devenu un carrefour régional de l'énergie, un acteur important dans le cadre d'un marché régional intégré. Par sa position géographique, le Maroc joue un rôle important dans la sécurité énergétique de l'Europe avec le transit du gaz algérien vers la péninsule ibérique et l'exportation de l'électricité vers l'Espagne.

3.2. Les réformes engagées

Le secteur de l'énergie a été parmi les premiers secteurs qui ont fait l'objet de réformes.

- La première réforme a touché le secteur pétrolier dès 1995 avec la privatisation des sociétés de distribution des produits pétroliers puis la privatisation des sociétés de raffinage deux années plus tard.
- Dans le domaine de la production d'électricité, des concessions ont été octroyées à des opérateurs privées : parc éolien Koudia Al Beida en 1996, Centrale thermique de Jorf Lasfar en 1997 et centrale à cycle combiné de Tahaddart en 2003.
- Au niveau de la distribution d'électricité à usage domestique, des contrats de gestion déléguée ont été conclus avec des opérateurs au niveau de certaines grandes villes du Royaume : Casablanca, Rabat et Tanger/Tétouan.
- Dans le domaine de l'exploration pétrolière, le code des hydrocarbures a été rénové en 2000, offrant ainsi des conditions très attractives aux sociétés pétrolières internationales désireuses de faire de la recherche pétrolière au Maroc. Parmi les avantages figurant dans ce nouveau code, on peut citer :
 - La réduction de la participation de l'Etat à 25% maximum dans les permis de recherches et les concessions d'exploitation,
 - L'exonération de l'IS pendant les 10 premières années d'exploitation,
 - La fixation de royalties à des taux variant entre 7 et 10% pour le pétrole et 3,5 à 5% pour le gaz.

3.3. L'exploration pétrolière : Des bassins sédimentaires encore sous explorés

Les bassins sédimentaires aussi bien onshore que offshore demeurent sous explorés. Le nombre de puits forés ne dépasse pas la moyenne de 0,04 puits/100 km contre une moyenne mondiale de 10/100. Autant dire que les potentialités et les chances de faire des découvertes d'hydrocarbures importantes restent intactes.

Depuis 2000, l'exploration pétrolière au Maroc bénéficie d'un contexte de dynamique nouvelle grâce notamment à l'amendement dans un sens particulièrement libéral du Code des Hydrocarbures et à une stratégie rénovée qui a permis de quadrupler les investissements consacrés à l'activité de recherche pétrolière et d'attirer plus d'une vingtaine de sociétés pétrolières toutes tailles confondues.

3.4. Un important gisement en énergies renouvelables

Le Maroc dispose d'un potentiel de production non négligeable, constitué par un gisement important en énergies renouvelables évalué à 6.000 MW d'origine éolienne, 5 kWh/m²/j d'origine solaire et 200 sites pour l'exploitation de systèmes mini-hydrauliques.

Il est vrai que ces énergies renouvelables représentent aujourd'hui moins de 1% de la production globale qui avoisine les 12,3 millions tonnes équivalent pétrole (TEP). Cependant, le pays dispose de nombreux sites montagneux permettant d'avoir des vents réguliers avec des vitesses suffisantes et constituant un atout majeur pour le développement des projets éoliens. Le Maroc est aussi avantagé par un degré d'ensoleillement très important: plus de 5kWh/m²/j et 3.000 heures par année permettant de développer davantage l'énergie solaire.

4. LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

Pour accompagner le développement économique et social et faire face à la demande future, les Pouvoirs Publics ont mis en place une stratégie énergétique axée sur la diversification des sources d'énergie en vue d'atténuer la double dépendance du pays vis de l'extérieur pour ses approvisionnements et vis à des énergies fossiles, notamment le pétrole. Cette stratégie s'articule autour des axes majeurs suivants :

4.1. L'intensification de l'exploration pétrolière

Les importantes modifications apportées au Code des hydrocarbures et promulguées en 2000 ont permis de rendre ce code plus attractif pour les sociétés pétrolières. Les principaux amendements concernent la baisse de la participation de l'État à 25 % maximum au lieu de 50 % maximum, l'exonération de l'IS pendant les 10 années qui suivent la mise en production de toute découverte, l'introduction d'une Provision de Reconstitution des Gisements (PRG) déductible de l'assiette de l'IS avec obligation de la réinvestir, de la possibilité pour un concessionnaire de consolider ses comptes.

Les royalties sont devenues à taux fixes et tiennent compte des difficultés de recherches. Ainsi elles sont de 10 % pour le pétrole et 5 % pour le gaz pour les zones terrestres et maritimes à moins de 200 mètres de profondeur d'eau, abaissées respectivement à 7 et 3,5 % pour l'offshore au delà de 200 mètres de profondeur d'eau. Cette refonte du cadre réglementaire a permis de relancer l'exploration pétrolière dans notre pays. Elle a été complétée en 2003 avec la création de l'Office National des Hydrocarbures et des Mines (ONHYM) qui a repris les missions de recherche pétrolière dévolues auparavant à l'ONAREP.

Ainsi, au cours de la période 2002-2006, la recherche pétrolière au Maroc a été marquée par un afflux important des sociétés pétrolières internationales. En effet, le domaine minier ne couvrait en 1997 qu'une superficie d'environ 34.210,5 km² et ne comptait que 5 permis et 3 zones de reconnaissance avec seulement 6 sociétés qui opéraient au Maroc. Actuellement, le domaine minier couvre une superficie totale de près de 268.500 km², dont environ 126.000 km² en offshore, couverts par 91 permis et 8 autorisations de reconnaissance avec 26 sociétés.

Malgré l'intensification de l'exploration des bassins sédimentaires marocains au cours de ces dernières années, on peut dire que l'exploration pétrolière au Maroc ne fait que commencer car nos bassins restent encore sous-explorés comme le montre la densité de forages réalisés aussi bien en onshore qu'en offshore.

Aujourd'hui, grâce aux technologies utilisées (sismique 3D, modélisation des bassins, observations et cartographies par satellites, forages en offshore profond), il ya de réelles chances de mise en valeur des richesses en hydrocarbures du sous-sol national surtout en offshore qui reste pratiquement inexploré.

Évolution du domaine minier entre 1997 et 2006

Permis et autorisations	A fin 1997		A fin 2006	
	N.	Sup. (km ²)	N.	Sup. (km ²)
Permis Onshore	5	8.716,5	20	31.000
Permis Offshore	-	-	71	126.000
Autorisations de Reconnaissance Onshore	1	7.050	8	111.500
Autorisation de Reconnaissance Offshore	2	18.444		
TOTAL (km ²)		34.210,5		268.500
Dont offshore		18.444		126.000

N: Nombre; Sup.: superficie

4.2. La promotion de l'utilisation du gaz naturel

En raison de nombreux avantages (énergie propre, grand confort d'utilisation, meilleur rendement) et pour répondre à la demande de plus en plus croissante des opérateurs, justifient la promotion de l'utilisation du gaz naturel. Les projections de développement de l'utilisation du gaz naturel si on se base sur un scénario max tablant sur une part de 20,3% dans le bilan énergétique national à l'horizon 2012 contre 3% actuellement.

L'utilisation actuelle et future du gaz naturel concerne les principaux projets suivants:

- 500 millions m³/an pour la centrale de Tahaddart entrée en production en 2005;
- 300 millions m³/an pour la centrale d'Aïn Ben Mathar prévue en 2007/2008;
- 1,1 milliard m³/an pour la centrale à cycle combiné d'Al Wahda prévue en 2008/2009;
- 1 milliard m³ pour le secteur du raffinage à partir de 2008;
- 500 millions m³/an pour le projet d'extension de Tahaddart prévu en 2009;
- 600 millions m³/an pour le projet de conversion des tranches fioul de la centrale de Mohammedia prévu en 2010/2011;
- 1,5 milliard m³/an pour d'autres industries.

L'ensemble de ces projets représente un besoin total de 5,5 Milliards m³/an. En attendant que des découvertes importantes soient faites sur le sol national, la satisfaction de ces besoins ne peut se faire que par du gaz d'importation. Sachant que le Gazoduc Maghreb Europe permet d'alimenter actuellement la centrale de Tahaddart et dans une prochaine étape celle de Aïn Ben Mathar et que la construction d'un gazoduc est non seulement très onéreuse mais présente des risques au niveau de la sécurité de nos approvisionnements, la meilleure possibilité est celle de l'importation de gaz naturel liquéfié (GNL) et profiter de la souplesse du marché international du GNL. Or, un tel projet requiert d'importantes infrastructures exigeant des investissements très lourds et une bonne régulation du marché aussi bien de son organisation que de sa tarification. Tenant compte de l'option libérale adoptée par le Maroc, la majorité de ces investissements devront être réalisés par des opérateurs privés dans le cadre de concessions à longue durée. C'est dans ce cadre qu'une convention tripartite a été signée entre la SAMIR, l'ONE et le Groupe AKWA pour mener une étude de faisabilité de la construction d'un terminal gazier dont le coût est estimé à 10 milliards DH. Dans tous les cas, le développement de l'utilisation du gaz naturel au Maroc dépendra de l'entrée en vigueur du code gazier. Celui-ci doit instaurer un cadre légal et réglementaire adéquat et préciser le droit d'usage des futures infrastructures et les modalités d'accès des tiers à celles déjà existantes. Il devrait également définir la tarification et une fiscalité appropriées sans oublier les mesures incitatives pour la cogénération.

4.3. Le développement des énergies renouvelables

L'essor des énergies renouvelables à l'échelle internationale résulte d'une prise de conscience de la nécessité de développer de nouvelles filières en parallèle avec les combustibles solides en vue de lutter contre les changements climatiques.

Au Maroc, les énergies renouvelables ont fait l'objet d'un intérêt particulier de la part des Pouvoirs Publics. D'abord, sur le plan institutionnel, il y a eu la création en 1982 du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) chargé d'effectuer des études et des recherches destinées à la promotion et au développement des énergies renouvelables. Par la suite, plusieurs programmes structurants et d'infrastructures ont été lancés dans le cadre d'un plan d'action national :

- La valorisation du potentiel éolien national : parc éolien Abdelkhalek TORRES en production concessionnelle (2000), parc éolien d'Essaouira (60 MW) et Tanger (140MW).
- Centrale thermo-solaire d'Aïn Beni Mather
- Complexe hydro-électrique (Province de Khénifra).

L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan national de 4% actuellement à 10% à l'horizon 2012.

4.4. La valorisation des schistes bitumineux

Le Maroc dispose d'importantes réserves en schistes bitumineux situées principalement à Tarfaya et à Timahdit évaluées à 50 milliards de barils pour ces deux sites uniquement. Ces réserves constituent un atout indéniable pour le Maroc pour le moyen et le long terme.

Les efforts de recherche entrepris dans les années 80 ont été réactivés dernièrement par l'ONHYM en partenariat avec des opérateurs nationaux et internationaux. Les études portent sur la possibilité d'utiliser les schistes dans la production d'électricité et la production d'hydrocarbures en fonction des technologies adéquates. De même, une réflexion est menée actuellement sur un cadre législatif et réglementaire adéquat.

4.4. Positionnement sur le créneau nucléaire

L'option nucléaire pour la production de l'électricité au Maroc n'est plus considérée comme un tabou et elle fait aujourd'hui l'objet d'un débat serein à tous les niveaux (Pouvoirs Publics, industriels, société civile). Il faut rappeler que le Maroc a déjà fait du chemin en matière nucléaire. Ainsi, le Maroc a formé toute une génération de chercheurs et il doit poursuivre cet effort de formation. Un réacteur a été installé au centre de Maâmora, Il sera dédié à la recherche et l'expérimentation et bénéficiera à plusieurs secteurs, notamment la médecine, l'eau, l'agriculture et la recherche scientifique.

Quoiqu'il en soit, la décision pour l'option nucléaire devrait être prise rapidement car un délai de 10 à 15 ans au minimum est nécessaire pour la concrétisation de ce genre de projets. De même, un cadre légal et réglementaire spécifique doit être élaboré et les mesures de sûreté verrouillées.

4. CONCLUSION

Jamais autant l'énergie n'aura été une question aussi préoccupante tant pour les gouvernements que pour les opinions publiques. Avec la flambée des cours du pétrole que nous avons connue ces dernières années, la maîtrise de l'énergie, le développement des énergies renouvelables et du nucléaire et, enfin, le renforcement de la recherche dans le domaine des nouvelles technologies, sont devenus des sujets centraux dans les stratégies de développement des nations et de la communauté internationale.

La garantie d'un approvisionnement énergétique sûr, fiable et à des prix acceptables, les besoins énergétiques croissants du monde surtout dans les pays en développement, la menace des changements climatiques sont autant de défis considérables à relever pour les décideurs dans le domaine de l'énergie. Seules, l'innovation, la R&D, l'adoption de nouvelles technologies efficaces par rapport aux coûts et une utilisation plus rationnelle des technologies à haut rendement énergétique existantes permettront d'y faire face.

Les perspectives technologiques devront permettre de relever tous ces défis et il n'y a pas aujourd'hui de risque pour l'humanité de manquer d'énergie à plus ou moins longue échéance.

Dans le domaine des énergies fossiles, le développement de nouvelles technologies en offshore profond et l'utilisation de la sismique 3 et 4 D permettront de nouvelles découvertes d'hydrocarbures. Les nouvelles technologies qui seront développées permettront également d'augmenter le rendement de récupération dans l'exploitation du pétrole et du gaz naturel sans parler de l'exploitation du pétrole non conventionnel dont

le potentiel est estimé par l'AIE à 7.000 milliards de barils, dont 23% sous forme d'huile lourde, 39% sous forme de sables asphaltiques et 38% sous forme de schistes bitumineux. Des progrès sont également attendus dans l'utilisation du charbon propre avec la captation et le stockage du CO₂, dans de nouvelles filières nucléaires, l'énergie éolienne, la géothermie, la conversion de la biomasse et les piles à combustible.

Aussi, est il nécessaire qu'une stratégie mondiale, qui regroupe les pays développés et ceux en voie de développement, le secteur public et le secteur privé, puisse être rapidement définie et appliquée. Notre pays dont le rôle en tant que pays de transit dans la scène énergétique régionale est largement établi se doit aujourd'hui de suivre les mutations qui sont en train d'intervenir sur la scène énergétique internationale afin de tirer profit de toutes les opportunités y compris technologiques.



AU CŒUR DU DÉVELOPPEMENT DURABLE: LES QUESTIONS D'ÉNERGIE

François GUINOT,
Président de l'Académie des Technologies, France

Le concept de développement durable est d'abord rétabli dans toute la force d'un modèle de développement qui doit marquer une rupture nécessaire. Il est redéfini dans ces trois composantes indissociables que sont la recherche d'une évolution de l'espèce humaine en symbiose avec celle de la planète, l'efficacité économique, et une solidarité humaine obligée et immédiate. On montre ensuite que les questions d'énergie sont au cœur de ce concept: parce que les problèmes énergétiques sont la clé de géopolitiques qui contiennent en germe des risques de conflits antinomiques au développement durable; parce qu'ils sont liés à des problèmes planétaires comme les évolutions climatiques; parce que les liens sont fondamentaux entre énergie et santé humaine, c'est-à-dire entre énergie et capacité de développement. Les besoins de recherche et d'innovation sont esquissés. En conclusion, le rôle des Académies et leur nécessaire coopération est évoquée.

Nous ressentons avec gratitude l'honneur et le plaisir que nous fait l'Académie Hassan II des Sciences et des Techniques en nous offrant de participer à sa session plénière. Soyez assurés que les six Académiciens des technologies de France qui sont ici – Robert GUILLAUMONT, Bruno JARRY, Yves MAIGNE, Jean-François MINSTER et Mohammed SMANI – voient dans votre accueil la marque d'une amitié dont vous savez combien elle est partagée, et le début d'une coopération dont tout nous montre combien elle est nécessaire.

Dans cette séance sont abordées les questions de l'énergie aujourd'hui et les défis scientifiques et techniques qu'elles soulèvent. D'éminents spécialistes les traitent globalement ou dans leurs spécificités marocaines. Je voudrais pour ma part les resituer au cœur du développement durable, indispensable à l'humanité pour sortir des risques considérables auxquels elle se trouve confrontée.

Sa surexploitation a considérablement affadi ce terme de développement durable et l'a souvent réduit à une vague notion de protection de l'environnement.

Ce concept a été élaboré autour de deux idées force

La première – celle du développement – partait d'un constat : nos sociétés, toutes nos sociétés, ont besoin de croissance pour gérer leur évolution, quel qu'en soit le stade. Le contenu à donner à cette croissance peut être discuté. La nécessité même d'un

développement est indiscutable, sauf pour les tenants de l'écologie profonde (la «deep ecology») qui en rejettent l'idée même, puisqu'ils considèrent l'homme comme la pire des pollutions.

La seconde idée portait sur les limites que rencontre le modèle de développement suivi jusqu'ici. Il a, certes, apporté à ceux qui en ont bénéficié un bien-être, des savoirs, une longévité jamais connus auparavant. Mais il s'accompagne d'impacts inquiétants sur les équilibres naturels : réchauffement climatique, épuisement des ressources fossiles, pollutions diverses, destructions d'écosystèmes et disparitions d'espèces, épuisement des sols, etc ...

A partir de ces deux idées, ce concept a associé l'efficacité économique, condition du développement, à l'évolution vers des comportements de prudence écologique et à la volonté de laisser aux générations futures la capacité de choisir leurs propres options de développement.

Toutefois cette solidarité avec les générations futures, cette solidarité décalée dans le temps n'est pas ressentie comme une contrainte véritable capable de provoquer des engagements immédiats. Peu à peu, le concept, réduit ou manipulé à des fins partisans ou au service d'intérêts particuliers, a glissé vers une approche mièvre, trop souvent ramenée à une charge émotionnelle en faveur de «tout ce qui est naturel».

Cette approche est aujourd'hui dépassée

Nous voulions changer de modèle en raison des risques qu'il faisait courir à l'espèce humaine. Nous oublions qu'il a entraîné vers le progrès tel que nous l'entendons – bien-être, savoirs, longévité – 20% seulement de l'humanité. Or, voici que 40% des humains – Chine, Inde, Brésil – s'invitent avec force à la table du progrès. S'ils devaient suivre le modèle que nous avons suivi, les risques redoutés deviendraient vite des dangers imminents. Dès lors, nous sommes enfermés dans une dialectique de l'impossible et de l'inacceptable. Il est impossible pour la sauvegarde de la planète que les pays émergents se développent selon le modèle ancien. Il est inacceptable, pour les en empêcher, d'entrer dans des conflits qui mettraient probablement en danger l'avenir de la planète et ruineraient assurément les valeurs auxquelles nous sommes attachés.

La seule alternative consiste en une solidarité obligée et immédiate avec ces pays émergents. Pour échapper à l'impossible et à l'inacceptable, nous devons nous engager dans une dialectique de concurrence et de partenariat.

Ceci suppose des transferts massifs de technologies modernes, qu'il s'agisse d'énergies, de transports, d'agriculture, de procédés industriels ... C'est la situation rencontrée avec la Chine aujourd'hui. Cette dialectique de concurrence et de partenariat, en train de se vivre dans toute sa complexité, a motivé les liens étroits que notre Académie a tissés avec l'Académie chinoise.

Mais cette solidarité obligée et immédiate ne se limite pas aux grands pays émergents, elle s'étend à tous les pays, y compris aux plus démunis. L'ONU a par exemple décrété 2006 année de la «désertification». 40% des terres disponibles sont touchées par le phénomène qui forme avec la pauvreté un cercle vicieux.

Plus on est pauvre, plus on surexploite son environnement immédiat même si cela doit amener à sa destruction à moyen terme. L'extrême misère ne permet pas à ceux qu'elle frappe de se soucier de l'avenir à terme de la planète, alors qu'ils vivent dans l'angoisse de leurs propres lendemains.

Ainsi ce double mouvement de la remise en cause par les pays riches de leur modèle de développement et de l'émergence de grands pays amène à une prise de conscience forte des réalités qui concernent l'espèce humaine prise dans son ensemble.

Depuis son premier outil, depuis sa première arme, il lui a fallu 3 millions d'années pour parvenir à compter 1,5 milliards d'individus. En une vie d'homme, en 75 ans, ce nombre aura quadruplé pour atteindre plus de 6 milliards. Selon les démographes, il devrait dans les décennies à venir s'élever jusqu'à 9 à 10 milliards puis plafonner à ce niveau.

Voilà des données qu'on ne peut ignorer

Voilà une espèce humaine qui se trouve désormais dans une situation de dépendance réciproque avec les autres espèces vivantes et la planète qui les porte.

Rien n'est jamais resté figé sur terre dans une situation donnée. Par conséquent aucune situation ne peut être considérée comme un idéal à préserver. La notion de conservation d'un état donné n'est pas naturelle. Le «fixisme» est anti-naturel. Notre planète n'a cessé d'évoluer et bien avant toute pression anthropique, sa biosphère a connu cinq grandes extinctions.

Le concept de développement durable, selon la définition à laquelle j'adhère, est donc basé sur une coévolution harmonieuse entre l'espèce humaine et la planète qui la porte.

Il s'impose comme une nécessité absolue et s'articule autour de trois axes indissociables:

- recherche d'une évolution de l'espèce humaine en symbiose avec celle de la planète,
- efficacité économique,
- solidarité humaine.

L'exigence d'une solidarité humaine large et immédiate, inséparable des deux autres composantes donne à ce concept une force nouvelle. Celle-ci ne saurait se fonder sur les seules sciences et technologies. Le développement durable impose des approches complexes, socio-économico-techniques et culturelles.

Nécessité absolue, le développement durable est aussi une vraie rupture

Les questions d'énergie sont au cœur de ce développement durable. Pour plusieurs raisons:

- D'abord parce que nombre d'aspects de l'énergie relèvent d'une approche planétaire. Ceci concerne en particulier le niveau des ressources en pétrole ou en gaz naturel, et l'accès à ces ressources. Ces considérations déterminent une géopolitique de l'énergie qui contient en germe des risques de conflits majeurs. Les Etats-Unis d'Amérique, le Japon, la Chine, la Russie, l'Amérique du Sud font de l'énergie une clé et même la clé

de leur politique internationale. L'Union Européenne, prenant conscience de la vulnérabilité que lui vaut une dépendance énergétique de plus de 50%, place aujourd'hui et enfin cette question dans ses priorités.

- Énergies au cœur du développement durable ensuite, parce qu'existent des liens forts entre les choix énergétiques, le niveau de consommation énergétique, et l'évolution de la planète, en particulier due aux évolutions climatiques.
- Au cœur du développement durable enfin, parce que le lien entre la consommation énergétique annuelle par habitant est, jusqu'à un certain niveau, parfaitement corrélée à la santé publique, et à l'espérance de vie.
- La mortalité infantile décroît très fortement à mesure que la consommation énergétique individuelle s'élève ; l'asymptote est atteinte vers 4 tonnes équivalent pétrole par an (4tep/an). L'espérance de vie, s'accroît régulièrement jusqu'à ce même niveau de 4 tep par an. Au-delà de ces 4 tep, les gains ne sont plus perceptibles. Notre académie de médecine a montré, lors du colloque «*Choix énergétiques et Santé*» en 2003, que «le plus grand risque pour la santé publique est de manquer d'énergie». De ce fait, c'est aussi le plus grand risque pour le développement. Sans énergie, pas de chaîne du froid pour conserver des vaccins ou des aliments dans de bonnes conditions ; pas d'utilisation des TIC pour l'information, la formation, l'enseignement ; pas de pompes pour tirer l'eau du puits, utiliser des systèmes de purification, imaginer des systèmes d'irrigation économes en eau, etc ...

En résumé, énergies au cœur du développement durable parce que les évolutions les plus probables créent des contraintes impressionnantes. Entre le début de l'ère industrielle jusqu'à la fin de notre siècle, elles nous montrent :

- une multiplication par 10 de la population mondiale (de 1 à 10)
- une multiplication par 10 de la consommation individuelle d'énergie
- une multiplication par 100 de la consommation globale d'énergie
- une multiplication par 2 à 3 de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.

Dans «*La prospective sur l'énergie au XXI^{ème} siècle*», publiée par notre Académie¹, on note qu'en limitant la projection à 2050, le besoin mondial d'énergie à cette date est estimé par la plupart des prévisionnistes entre 15 et 20 gigatonnes d'équivalent-pétrole (contre 9 aujourd'hui). Ce doublement repose sur deux hypothèses qui ne sont pas échevelées :

- un développement économique modéré des pays pauvres qui amène leurs 8 milliards d'habitants à une consommation individuelle de 1,5 à 2 tep par an,
- une forte réduction de la consommation individuelle dans les pays riches qui passerait de 6 à 3 ou 4 tep.

Le rôle de nos académies est sans doute d'aider les décideurs et les opinions publiques à se poser les vraies questions qui découlent de l'appréciation la plus objective de ces contraintes, pour les amener à des choix raisonnés et à des politiques et des comportements adaptés.

¹ Prospective sur l'énergie au XXI siècle. Communication à l'Académie des technologies, décembre 2004.

Les deux milliards d'êtres humains qui n'ont aujourd'hui pour source d'énergie que les trois pierres entre lesquelles ils font brûler ce qu'ils peuvent interviennent fortement dans les émissions de CO₂, dans la déforestation ou l'appauvrissement des sols, dans la progression des déserts ... Ces deux milliards seront bientôt quatre ! Et j'ai dit le cercle vicieux qui lie pauvreté et désertification.

La solidarité envers les pays les plus démunis devient l'assurance survie des pays développés. Rien ne sert de pleurer l'exploitation excessive des forêts primitives ou le recours massif au charbon lorsque l'on sait que ce seront longtemps encore des sources d'énergie indispensables pour une part considérable de l'humanité.

Une meilleure approche serait de repenser l'exploitation sauvage de ces forêts. La conception «d'agroforêts», traduisant en actes raisonnés cette nécessaire symbiose entre la forêt et l'homme, fait l'objet de travaux. Ils montrent qu'une gestion dynamique de la forêt peut être respectueuse de son potentiel d'évolution. Sa mise en pratique demandera beaucoup de recherches encore, qui ne sont pas seulement scientifiques ou techniques.

Pour l'utilisation inévitable du charbon, la question de la séquestration souterraine du CO₂ attend de la recherche scientifique et technique des réponses satisfaisantes pour les équilibres de la planète. Mais les quantités à traiter seront gigantesques !

Ce concept de développement durable, coévolution harmonieuse entre l'espèce humaine et la planète qui la porte, appelle – vous le sentez bien – un formidable besoin de recherches fondamentales, d'innovations technologiques, de changements dans la gouvernance mondiale et dans les relations entre les différentes parties du monde, de changements économiques et comportementaux. Promouvoir ce concept suppose d'attirer vers les métiers de la science et de la technologie une part importante des nouvelles générations. Nos Académies ont dans ce domaine le devoir d'agir.

Je ne ferai qu'esquisser les besoins de recherche et d'innovation pour ce qui est de l'énergie:

- le nucléaire et la maîtrise définitive de ses déchets ; la sélection et le développement des réacteurs de génération IV, avec le triple objectif d'utiliser l'²³⁸U comme combustible, de produire moins de déchets, de fonctionner à une température plus élevée conduisant à un meilleur rendement thermodynamique.
- Le nucléaire de fusion qui répondra peut-être aux besoins du siècle prochain mais qui marque, avec le projet ITER, une coopération au niveau mondial qui mérite d'être saluée.
- Les économies d'énergies dans l'habitat (30% de la consommation d'énergie en France) avec un accroissement des performances des procédés d'isolation, un développement de systèmes de stockage local de chaleur, un fort taux de remplacement des sources fossiles par des énergies non émettrices de CO₂ (solaire, géothermie, bois).
- Le développement des biocarburants dans les transports routiers en recherchant des filières plus prometteuses en volume, en rendement énergétique et en coût de production.
- Le développement de véhicules hybrides bi-énergie, avec l'amélioration difficile mais indispensable des batteries.
- La capture – séquestration souterraine de CO₂, déjà évoquée.
- Le développement des moyens de stockage massif indirect de l'électricité pour compléter

la production nucléaire aux heures de pointe sans faire appel aux énergies fossiles (pompage / turbinage).

- Les énergies renouvelables : éolien ; solaire thermique qui mérite un fort développement technologique pour en abaisser le coût ; solaire photovoltaïque qui nécessite encore des recherches sur les dépôts en couches minces et les supports plastiques ; la biomasse et le développement des filières ligno-cellulosiques, thermochimique ou enzymatique qui amplifierait la ressource par la sylviculture et les déchets agricoles sans compétition avec les filières alimentaires.
- La géothermie profonde ou de surface avec pompe à chaleur, ou profonde en zone volcanique.
- Les vecteurs et transformateurs d'énergie : • pile à combustible • supercondensateurs
- Le vecteur hydrogène et le "rêve à long terme d'une production thermochimique utilisant un réacteur nucléaire à très haute température, suivi d'une recarbonation par du carbone de biomasse, ce qui produirait un hydrocarbure liquide classique sans émission de CO₂" (cf. *supra*, note 1). Mais le chemin est long et semé d'embûches techniques, économiques, organisationnelles.

Cette énumération montre assez le large éventail de possibilités qu'offriront à un terme plus ou moins éloigné la recherche et l'innovation technologique, pour mettre les questions d'énergie en harmonie avec le concept de développement durable.

L'ordre des priorités dans les choix possibles dépend évidemment des spécificités de la situation régionale, de la disponibilité plus ou moins grande d'énergies locales adaptées au niveau du développement de la région considérée.

Ces choix technologiques, qu'ils concernent les énergies, les transports, la santé, les TIC... ont un impact extraordinaire sur la structuration de nos sociétés et sur les comportements des individus qui les composent.

Aussi notre académie des technologies de France considère-t-elle d'égale importance les deux composantes de sa mission : celle d'être un Corps de référence dans le domaine des technologies et celle d'être reconnue comme un intermédiaire de choix entre les décideurs et l'opinion publique pour promouvoir un progrès réellement au service de l'homme.

Les questions d'énergie sont celles qu'elle a fouillées en priorité et qu'elle continue à travailler avec ardeur. Elle y est aujourd'hui reconnue comme une référence en France. Mais elle souhaite multiplier les contacts et les travaux en commun avec d'autres, soumis à des contraintes et donc à des choix différents de ceux que connaît la France. C'est ce que nous faisons avec les Académies d'Allemagne, de Grande Bretagne, d'Australie et de Chine. Nous nous réjouissons des contacts qui s'établissent aujourd'hui avec le Royaume du Maroc. Nous y voyons la première manifestation d'une coopération fructueuse. Les problèmes d'énergies délocalisées pourraient en être une amorce efficace.



RÉFLEXIONS SUR LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE FUTUR

REFLEXIONES SOBRE EL SISTEMA ENERGÉTICO DEL FUTURO

Valeriano Ruiz HERNÁNDEZ

Profesor, Escuela de Ingenieros, Universidad de Sevilla, España
Miembro asociado de la Academia de Ciencias y Técnica Hassan II

1. INTRODUCCION

Lamentablemente, el juicio que nuestros descendientes harán de la actividad de los seres humanos que hemos habitado la Tierra en el siglo XX, y lo que va del XXI, no será muy halagüeño para nosotros, los componentes de las generaciones actuales.

Por ejemplo, se asombrarán del mal uso que venimos haciendo de las tecnologías energéticas en el pasado siglo XX y seguimos haciendo en lo que va del XXI que nos está llevando a una interacción ambiental insoportable para el sistema Tierra, incluida su atmósfera y los seres vivos que la habitan, y además esquilmando recursos naturales de los que nos estamos apropiando de manera indebida porque no son solo nuestros sino también de las generaciones que están por venir.

Lo peor de todo es que no somos del todo ignorantes; tenemos conocimiento de lo que está pasando e incluso tenemos medidas fehacientes y previsiones (modelos físicos) contrastados, de lo que está por venir, que resultan escalofrantes.

Todo lo más que hacemos es decir que hay que hacer algo -reuniones de Río- e incluso establecer acuerdos para hacerlo - Kyoto - pero ni todos coinciden en lo que hay que hacer ni siquiera se ponen de acuerdo en el inicio de unas medidas que son claramente insuficientes. De momento, se ha puesto formalmente -el pasado 16 de Febrero de 2005- en marcha el protocolo de Kyoto citado, pero apenas se cumple por algunos países y el más contaminador de todos -Estados Unidos- ni siquiera lo acepta.

Pero lo peor, desde mi perspectiva personal, es que, incluso los que coinciden en que hay que hacer "algo", no acaban de entender lo que me parece fundamental por evidente:

El origen del principal problema que tiene la Humanidad -su propia supervivencia- está en las modificaciones físicas, químicas y biológicas que el propio ser humano origina en su entorno natural. El causante más significativo de esas modificaciones es el sistema energético.

Ya somos más de 6500 millones de hombres y mujeres los que vivimos sobre el planeta Tierra que, con una actividad económica acelerada, producen interacciones con el medio ambiente que no son despreciables frente a su tamaño, representado por la superficie de nuestro planeta -tierra y agua- de 510 millones de km² y, de ellos, solo 153¹ son tierra firme (Figura 1). La capacidad de intervención de los seres humanos actuales, medida en valor promedio por el consumo de energía primaria "per cápita" de 1,8 tep por cada habitante del planeta cada año o su equivalente instantáneo medio (más de 2400 vatios) frente al tamaño energético del ser humano de 100 vatios -las célebres 2000 kcal/día de subsistencia-, se comprende fácilmente que el planeta Tierra está seriamente amenazado.

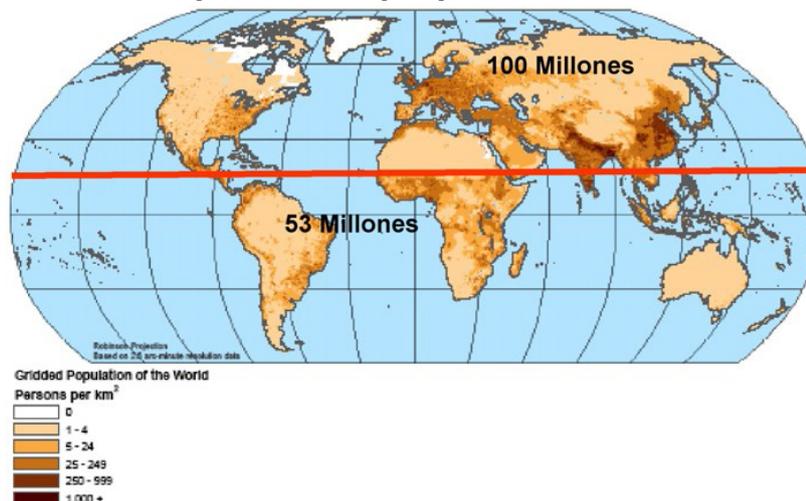


Figura 1. Distribución de los seres humanos sobre el Planeta Tierra

Algunas consecuencias ya se pueden sentir e incluso, medir. Muy en particular el llamado calentamiento global representado en esta primera referencia por el aumento de temperatura de los últimos 100 años con 0,6 °C (grados Celsius) y la previsión de un aumento de 2 °C² en el siglo XXI (fig. 2). Con las repercusiones que eso implica para el equilibrio físico del planeta Tierra, desde varios puntos de vista.

Con todo lo más importante es que los especialistas del tema no acaban de concluir lo evidente: la solución al problema no es la sustitución de los combustibles fósiles por energías renovables o por energía nuclear, de fisión o de fusión, y tampoco el ahorro y eficiencia, tal como se concibe en estos momentos. *La única solución realmente efectiva pasa por un cambio radical del sistema energético, que incluye, obviamente, todo lo anterior pero, sobre todo, un cambio de modelo.*

¹ La mayor parte (100 millones de km²) en el hemisferio Norte.

² Recientes estudios del Instituto Nacional de Meteorología de España estiman entre 4 y 8°C el aumento de temperatura en la Península Iberica hacia finales de este siglo.

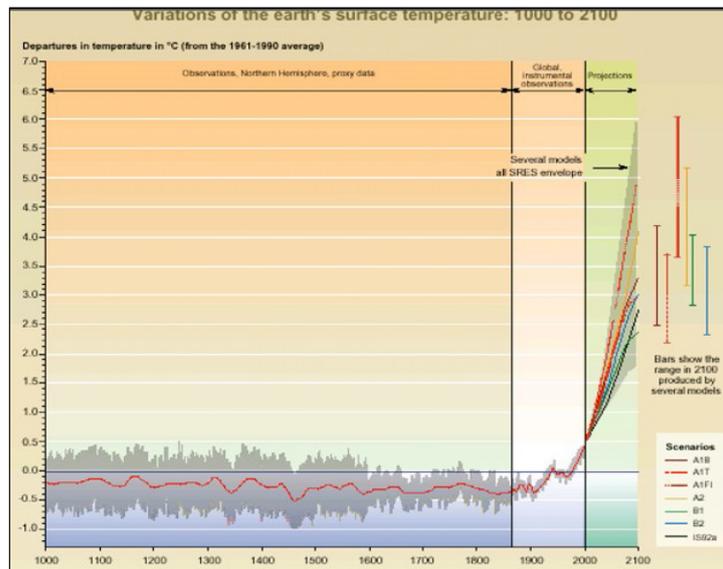


Figura 2. Calentamiento global

2. EL PROBLEMA

En todas las actividades de los seres vivos sobre el planeta, incluidas las de los seres humanos, interviene la energía, en sus diferentes formas. De hecho, es el motor inevitable de esas actividades y, en ese sentido, la energía se puede definir como *la magnitud física responsable de todas las acciones que ocurren en el Cosmos.*

La disponibilidad energética, apoyándose sobre un sustrato cultural y político adecuado, es lo que ha dado impulso al desarrollo socioeconómico de las sociedades humanas.

En cualquier caso, hay una evidente *relación entre la disponibilidad de energía y el desarrollo de una sociedad.* Aunque no sea una relación lineal (Figura 3).

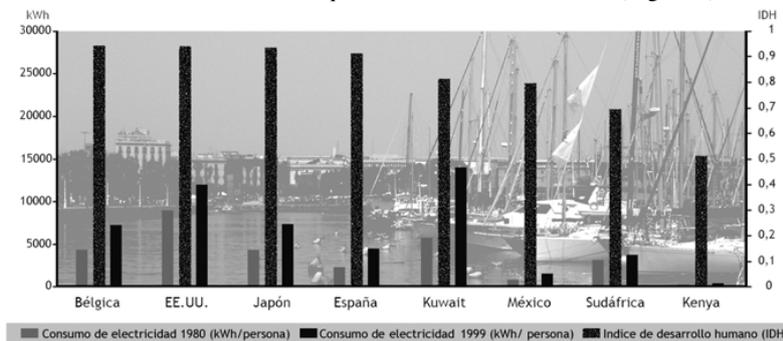


Figura 3. Desarrollo socioeconómico y consumo de energía

Lamentablemente, en paralelo con ese desarrollo tecnológico propiciado por las fuentes energéticas que hoy llamamos convencionales, muchos de los países del mundo -la gran mayoría- no han conseguido incorporarse a estos beneficios, en parte por el egoísmo de los más desarrollados, que han aprovechado su situación de privilegio energético para controlar el sistema político y económico mundial.

En el futuro, el panorama energético no será muy diferente del que conocemos hoy salvo quizás en que se parecerá más al del pasado que al del presente, sobre todo en su estructura aunque no en lo sofisticado de las tecnologías energéticas a emplear. En cuanto empiecen a escasear las fuentes energéticas agotables el peso de las renovables irá aumentando y el sistema energético se irá modificando haciéndose más distribuido y descentralizado acercándose más a la sostenibilidad de la que tanto se habla y de la que tan lejos nos encontramos todavía. También será más complejo. Esta situación de cambio del sistema energético ya se vislumbra en Europa, en Japón (figuras. 4 y 5) y en otras zonas del mundo más desarrollado, aunque tímidamente y en una muy pequeña proporción. Pero es en los países en vías de desarrollo donde se dan las mejores condiciones para llegar al



Figura 4. Sistema eléctrico del futuro



Figura 5. Barriada residencial en Japón

sistema energético deseable. En concreto, en Marruecos hay ya instalaciones de generación distribuida³ en el ámbito rural (figura. 6a). En Europa es un poco diferente pero va en la misma dirección.



Figura 6. Microred con FV en el ámbito rural en Marruecos

Las circunstancias más importantes que dan lugar al llamado “problema energético” son las siguientes:

- *La contaminación que originan algunas de las fuentes energéticas.* En particular, los combustibles fósiles, la nuclear y las grandes instalaciones hidroeléctricas. No todas con la misma intensidad ni cuantitativa ni cualitativamente. Sin duda, los residuos radiactivos que se originan con el uso de las centrales nucleares son un efecto sobre el que todavía no se ha tomado suficiente conciencia, aunque algunos accidentes nos han puesto sobre aviso de las posibles consecuencias. El efecto que podemos contemplar a más corto plazo son las emisiones de gases de efecto invernadero procedente de la combustión de las fuentes energéticas de origen fósil, empezando por el carbón y el petróleo en cuanto a cantidad y calidad –en términos negativos- de las emisiones y también el gas natural que no es inocuo desde este punto de vista.
- *La agotabilidad de las fuentes convencionales.* En particular el petróleo está ya en un punto de agotamiento que hará muy conflictiva su utilización en un plazo relativamente corto. El gas natural y el uranio tampoco son tan abundantes que podamos pensar en el largo plazo. El carbón, sin embargo si es lo suficientemente abundante para no poder olvidar que será necesario recurrir a él a un plazo medio, con las necesarias modificaciones tecnológicas para hacer su uso más eficiente y menos contaminante.
- *El tamaño relativo del planeta Tierra y el número de consumidores.* Intimamente relacionado con las dos circunstancias anteriores está el hecho de que los más de seis mil quinientos millones de seres humanos que consumimos energía suponen una cantidad tal de sustancias contaminantes que se añaden a nuestro entorno y otra cantidad similar de materias primas energéticas que se extraen, que no se puede considerar inocua la

³ Microrred on fotovoltaica

interacción entre el sistema energético y nuestro entorno. La situación actual de crecimiento del consumo por parte de algunos países (China, India, América Central y del Sur) con muchos habitantes⁴ está acentuando los efectos anteriormente referidos. A este efecto cuantitativo hay que añadir que algunos de esos países –China en particular– consume sobre todo carbón propio para generación eléctrica y está aumentando muy rápidamente el número de automóviles convencionales con la presión que eso significa sobre el reparto y los precios del petróleo.

A estas tres circunstancias, entrelazadas en sus orígenes y en sus efectos hay que añadir otras también importantes como son el *bajo nivel de eficiencia del conjunto del sistema*, producto a su vez de la baja eficiencia de muchos de los procesos implicados y con efectos negativos suma de los correspondientes a los diferentes sectores de consumo. El rendimiento global del sistema energético mundial (energía final consumida dividido por la energía primaria empleada) es inferior al 3% (Fig. 7).

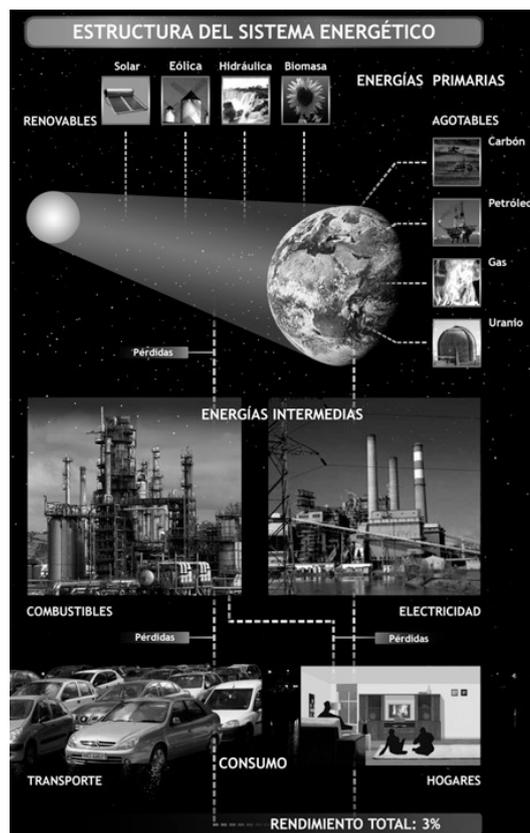


Figura 7. Esquema del sistema energético actual

⁴ Más de un tercio de la población mundial.

La *irregular distribución de los consumos*, en cantidad, calidad y situación geográfica que da lugar a unos niveles de *insolidaridad e injusticia* entre los habitantes del planeta es otro de los problemas de mayor profundidad que presenta el sistema energético actual. Esta circunstancia no es solo fruto del desigual reparto geográfico de las fuentes energéticas convencionales, aunque está en su origen (Figura 8).

La especulación, el egoísmo, la rapiña y la falta de generosidad de algunos gobiernos y empresas, manejando el sistema energético a su antojo incluso con el empleo de la fuerza militar en muchos casos para asegurarse los recursos sin tener en cuenta a los demás habitantes de la Tierra, es una causa de conflictos que también se debe tener en cuenta.



Figura 8. Hay quien consume más de la cuenta y quien no consume nada

3. LA SOLUCIÓN

Evidentemente no existe “la solución”. Solo se puede plantear un proceso, que será largo y complejo, para que no sigan aumentando o incluso ir disminuyendo paulatinamente, los efectos negativos que ya se pueden apreciar y medir. A continuación enumero algunos elementos de ese proceso:

- La primera medida es, sin duda, *consumir más eficientemente*, tanto sectorialmente como en los diferentes procesos que conforman el sistema. También, hacerlo de manera más comedida; es decir, consumir lo imprescindible para satisfacer nuestras necesidades. El desarrollo de tecnologías energéticas más eficientes y menos contaminantes debe continuar. En ese sentido, el etiquetado de los dispositivos e instalaciones ayuda bastante a concienciar a los consumidores⁵.
- *El cambio de modelo* es lo fundamental. Hay que implementar otro modelo más distribuido y descentralizado (fig. 4, 5 y 6) que, al principio, debe hacerse compatible con el actual para ir, poco a poco, haciéndose exclusivo prescindiendo de las grandes infraestructuras energéticas. Esto último es difícil porque han costado mucho dinero pero parece imprescindible ir las sustituyendo a medida que se vayan amortizando. Mientras más tiempo pase será peor. Los consumidores o asociaciones de ellos deben ir haciéndose responsables de su propio sistema, incluidos los efectos sobre el entorno.

⁵ Recientemente (17-01-07) se ha aprobado en España la obligatoriedad del etiquetado energético de los edificios además de otras medidas de interés en el ámbito energético.

- *Las fuentes energéticas contaminantes y agotables deben ir siendo sustituidas por fuentes más abundantes y que causen el menor impacto medioambiental posible.* En este proceso no se puede plantear un cambio radical y absoluto no solo por razones de aceptación de muchos agentes del sistema sino por mera imposibilidad tecnológica. El proceso ha empezado ya en algunas zonas del mundo aunque de manera insuficiente y tímida pero pienso que es imparable y contagiosa. En concreto, la primera fuente energética que es necesario minimizar su uso es el petróleo, seguido del cambio en las formas de emplear el carbón y la nuclear que puede y debe ser sustituida por completo sin problemas ya que su contribución al sistema energético es de solo un 6 % en el total mundial. Por eso, apuesto decididamente por la hibridación total en un futuro inmediato. Un ejemplo lo tenemos en el concepto SOL-GAS (fig. 9) que consiste básicamente en utilizar más de una fuente energética (por ejemplo solar concentrada y gas natural) en el ciclo termodinámico más eficiente (ciclo combinado) para generar electricidad de manera lo más ajustada posible al consumo (fig. 20), tanto en tamaño como en el instante de funcionamiento para hacer más eficiente el conjunto del sistema.

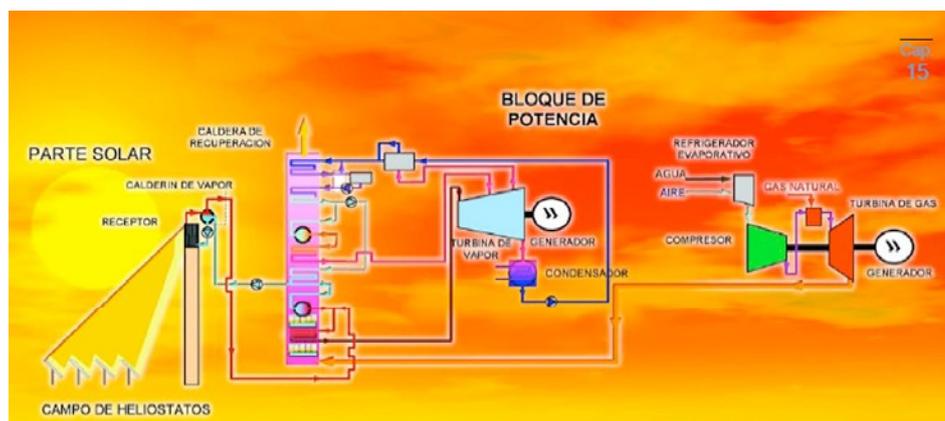


Figura 9. Concepto SOL-GAS (planta híbrida)

No es ninguna panacea porque no hay nada que lo sea y tampoco es claro que se vaya a seguir un planteamiento como el que se hace aquí pero entiendo que si no al 100 % que se propone, algo habrá que hacer, voluntariamente y cuanto antes o la alternativa es algún desastre natural lo suficientemente grave para que los seres humanos se tengan que ocupar del asunto a la fuerza cuando la inercia haga más difícil —si no imposible— la solución. Para los países en vías de desarrollo el problema puede convertirse en oportunidad de cambiar sus opciones de futuro.

4.¿QUIEN, CÓMO, DONDE, CUANDO?

¿Quién, cómo, donde y cuando se debe llevar adelante ese proceso de cambio del sistema energético?

Obviamente son los gobiernos las instituciones que tienen mayor responsabilidad. Pero no solo los gobiernos centrales sino que deben y tienen que involucrarse todos; los

Ayuntamientos, los gobiernos regionales y todas las instituciones que de una manera o de otra representan a la sociedad. En particular creo que las universidades y los centros de investigación tienen una especial responsabilidad al recibir de la sociedad el encargo implícito de aportar soluciones a los problemas que tengan relación con la Ciencia y la Técnica. No parece necesario decir que la Academia de Ciencia y Técnica Hassan II debe asumir un fuerte compromiso en la solución de este problema en relación con la sociedad marroquí.

Pero es importante entender que la responsabilidad es de todos porque todos somos consumidores de energía y, por tanto, intervenimos en el sistema aunque bien es cierto que no todos lo hacemos con la misma capacidad de actuación. Sobre todo en el sistema actual en el que los consumidores son meros elementos pasivos. Esa es una razón añadida por la que hay que cambiar el sistema en profundidad para que los consumidores se sientan responsables y tengan clara conciencia de que deben intervenir.

¿Cómo hay que actuar?

Evidentemente, cada cual según sus capacidades y responsabilidades. Los gobiernos poniendo las condiciones de todo tipo (legislativas, normativas, etc.) que favorezcan el cambio de modelo y todo lo demás. En cada nivel será diferente y teniendo en cuenta las competencias de cada cual. Por ejemplo, no es lo mismo un Ayuntamiento que el gobierno central. Al SM El Rey de Marruecos (o el de España), como responsable máximo de la sociedad marroquí, con su capacidad y su poder de liderazgo, le debe corresponder un mensaje claro y rotundo de la necesidad de este cambio y la directriz de que se ponga en marcha. Los consumidores tienen unas funciones verdaderamente importantes la principal de las cuales es asumir su protagonismo en el sistema que puede expresarse de múltiples maneras. La más importante de ellas es consumir eficientemente, tanto en cantidad como en calidad y en el momento en que se realiza el consumo que influye poderosamente en la eficiencia del sistema.

Pero aquí interesa especialmente, ¿cómo debe actuar una institución como la Academia? Según mi modesto criterio lo primero y más importante ya lo está haciendo, tomando conciencia del problema y aportando criterios para la solución y este documento es, obviamente, mi modesta contribución a esa tarea. Evidentemente, creo que no basta con eso. Pienso que hay tareas concretas y específicas que se deben acometer desde la Academia. Relaciono algunas que me parecen evidentes:

- *Analizar* en profundidad el sistema energético marroquí actual extrayendo las conclusiones oportunas.
- *Estudiar* en detalle las alternativas al sistema marroquí actual en sus diferentes aspectos: tecnologías de los dispositivos de consumo; técnicas de sustitución de fuentes fósiles y nuclear por energías renovables y sistemas híbridos; metodologías de aplicación de las nuevas tecnologías energéticas; propuesta y control de instalaciones de demostración y experimentación; programas de formación, difusión e información en los diferentes niveles de la sociedad (no solo universidades y centros de investigación); apoyar y asesorar las iniciativas gubernamentales y de otras instituciones en materia energética;

crear un grupo de prospectiva energética para el año 2030 confluyente con otras iniciativas del mismo tipo en otros países.

- Por supuesto, a estas tareas que podríamos llamar generales hay que sumar las particulares y propias de una institución de este tipo: proponer y apoyar iniciativas de I+D+I en el ámbito energético tanto por sí misma en el Reino de Marruecos como en colaboración con otras instituciones extranjeras. A título enumerativo pero no exhaustivo, cito las siguientes líneas:

- Sistemas de generación distribuida y microrredes.
- Nuevos desarrollos de combustibles no contaminantes.
- Sistemas de control de redes eléctricas distribuidas.
- Almacenamiento y captura de CO₂
- Energías renovables en todos sus aspectos. (incluyo como anexo una propuesta de programa específico)
- Superconductividad y superfluidez. Aplicaciones diversas.
- Termoelectricidad. Aplicaciones de uso actual y de futuro.

¿Dónde se debe actuar?

En lo que se refiere a dónde se debe intervenir me parece evidente que no se puede abarcar todo el sistema. Creo que, por razones de operatividad, hay que establecer una secuencia que, a título indicativo, relaciono a continuación, referida a Marruecos:

- Donde resulta más necesario y hay menos infraestructura preexistente. Es decir, en el ámbito rural donde, de hecho, ya se están haciendo algunas instalaciones fotovoltaicas de carácter necesariamente distribuido porque no hay redes eléctricas convencionales (fig. 6).
- En cuanto a programas de consumo responsable lo más eficaz es en las grandes ciudades donde se producen mayores ineficiencias por falta de concienciación ya que no “se ven” las instalaciones de generación y las correspondientes contaminaciones. Por otro lado es donde se pueden establecer procedimientos de control de esas actuaciones.
- No se debe descuidar la formación prioritaria de los responsables de los sistemas energéticos tanto las compañías eléctricas⁶ como los esquemas de distribución de carburantes y las cadenas de venta de vehículos.

5. RETOS Y OPORTUNIDADES CONCRETAS, EN MARRUECOS. LA ENERGÍA SOLAR DE MEDIA Y ALTA TEMPERATURA

Me parece que, en una presentación como esta, no puedo explicitar todos los retos y las correspondientes oportunidades que el sistema energético y su modificación representa para Marruecos. Sobre todo porque no conozco, con el suficiente detalle la situación energética de Marruecos. Pero con alguna idea general que es evidente, puedo explicitar los retos y oportunidades que, a mi entender, se le presentan a Marruecos en los próximos años en un campo energético que conozco algo mejor que los otros. Me referiré, por supuesto, a las tecnologías solares, particularizando a la solar de media y alta temperatura.

⁶ En Marrueco puede resultar especialmente fácil al haber una sola empresa nacional.

Lo primero que es muy claro es que Marruecos es un país con muy altos niveles de irradiación solar (Figura 10) y, sobre todo, de su componente directa, que es imprescindible para el desarrollo de los sistemas solares de concentración.

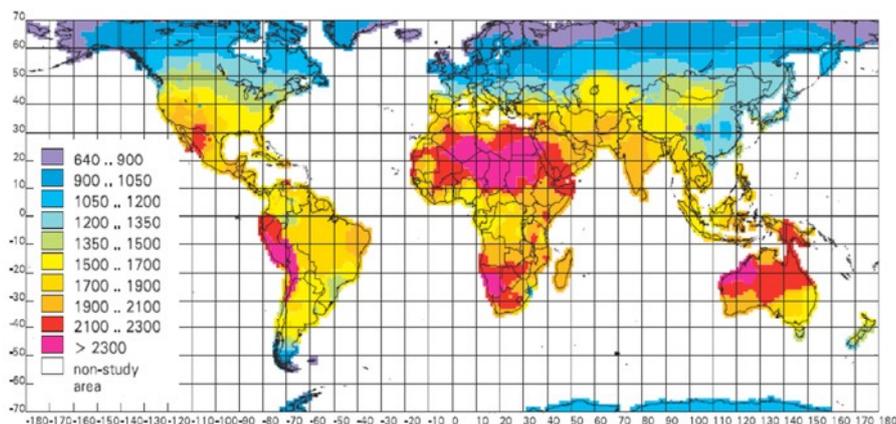


Figura 10. Radiación solar en el mundo

Lo segundo, y no menos importante, es que Marruecos tiene el nivel de desarrollo tecnológico suficiente para incorporarse a los desarrollos que están empezando a abastecer a los sistemas energéticos de algunos países.

En particular me voy a referir a sistemas de generación de electricidad con las tres tecnologías más desarrolladas en este primer momento de incorporación de la energía solar a los sistemas energéticos de cara al futuro.

En todos los casos entiendo que debería seguirse una estrategia común básica:

- Establecer una secuencia de diseños, ensayos e instalaciones de demostración y comerciales con la intención de incorporar la electricidad generada a las cargas a las que se aplique con un ritmo próximo al del consumo. En definitiva, la búsqueda de un sistema eléctrico eficiente y coherente.
- Incorporar a los diseños el concepto de cogeneración para acoplar la generación a los consumos, no solo de electricidad sino también de calor, en tamaño y tiempo.
- Analizar la posibilidad de emplear adicionalmente un combustible almacenable en hibridación con la parte solar para garantizar que la electricidad se genera en los momentos en que se necesita.

Con todas las tecnologías solares es posible hacer esto que propongo.

Daré, para terminar, un repaso a la situación de las tres tecnologías actualmente dominantes y unas sugerencias para los pasos subsiguientes en los desarrollos que se avecinan.

Canales cilindro parabólicos. Es la tecnología de la que existe mayor experiencia con 350 MW en funcionamiento desde hace más de veinte años en Estados Unidos y con un gran número de proyectos en España, de los cuales dos de 50 MW están ya en construcción en la provincia de Granada. Todos ellos son con aceite térmico como fluido de transferencia de energía térmica que entiendo como la primera generación de este tipo de dispositivos.

Ya apunta en el escenario inmediato un cambio esencial con la sustitución del aceite por agua en cambio de fase líquido-vapor en el receptor cilíndrico del dispositivo (proyecto DISS en la Plataforma Solar de Almería). Con ese cambio se elimina un factor limitante del rendimiento global de las plantas ya que no es necesario el intercambiador de calor aceite-vapor de agua que relaciona el sistema solar con la parte convencional del sistema de potencia. (fig. 11 y 12)

Por supuesto, hay que seguir proponiendo nuevos desarrollos e innovaciones de todo tipo que mejoren las prestaciones de estas instalaciones.



Figura 11. Planta electrosolar Andasol I en construcción, en Granada



Figura 12. Proyecto DISS (Plataforma Solar de Almería)

Centrales de receptor central y campo de helióstatos. Esta tecnología también ha sido estudiada durante bastante tiempo y en bastantes lugares pero no se había dado todavía el salto al terreno de lo comercial. Hasta que la legislación del estado español ha permitido a las empresas más involucradas en estas cuestiones dar el paso definitivo. En efecto, en estos días se están culminando las pruebas de puesta en marcha de la planta PS 10 (11 MW) (fig. 13) en las cercanías de la ciudad de Sevilla y ya han comenzado las obras de la siguiente central de este tipo, la PS 20 (20 MW) junto a la anterior.



Figura 13. Planta termosolar PS 10, en Sanlúcar la Mayor (Sevilla)

En cuanto a las posibles mejoras tecnológicas ya se han estudiado y ensayado varias en un pasado reciente que habrá que incorporar sucesivamente a las plantas comerciales que se vayan instalando en el futuro inmediato. En concreto, se han evaluado las posibilidades de helióstatos autónomos y controlados por radio así como diversos tipos de receptores de agua y de aire (receptores volumétricos) y, naturalmente, sistemas de cálculo y de control. Pero quedan muchas posibilidades para el futuro de la I+D en este terreno aprovechando las instalaciones que han servido como lugar de experimentación y de formación de técnicos. En particular la Plataforma Solar de Almería (fig. 14) ha sido la instalación de I+D de tecnologías solares que más ha contribuido a estos desarrollos.

Paraboloide de revolución y motor Stirling. Esta tecnología está también suficientemente ensayada y a punto para pasar al terreno comercial con dispositivos bien probados. En concreto hay dos modelos, uno americano y otro europeo dispuestos a incorporarse a esta auténtica revolución energética. En el caso americano se trata de un dispositivo de 25 kW que se incorporará en número de 125000 unidades en una planta encargada por la San Diego Utility al fabricante (SES). (fig. 15)



Figura 14. Plataforma Solar de Almería



Figura 15. Disco parabólico con motor Stirling de 25 kW (USA)

En Europa, el proyecto Envirodish (heredero del Eurodish) ha desarrollado cuatro prototipos que se han instalado en Alemania, Francia (fig.16), Italia y España como referentes para posibles plantas comerciales. El prototipo español se encuentra en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla bajo mi responsabilidad y tenemos cerca de dos años de resultados experimentales de su conexión a la red eléctrica general. Fig. 17 y 18).

Esta tecnología presenta muy buenas perspectivas para desarrollos futuros toda vez que se refrigera por aire por lo cual es muy adecuada para lugares donde la escasez de agua sea la característica esencial como es el caso de muchos lugares de muy alta radiación. Por otro lado permite la cogeneración y la hibridación aspectos en los que habrá que incidir en los próximos desarrollos. La modularidad es otra característica que debo destacar. (fig. 19).



Figura 16. Disco Stirling (Envirodish) en el horno solar de Odeillo (Francia)



Figura 17. Disco parabólico y motor Stirling (Envirodish), de 10 kW en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla

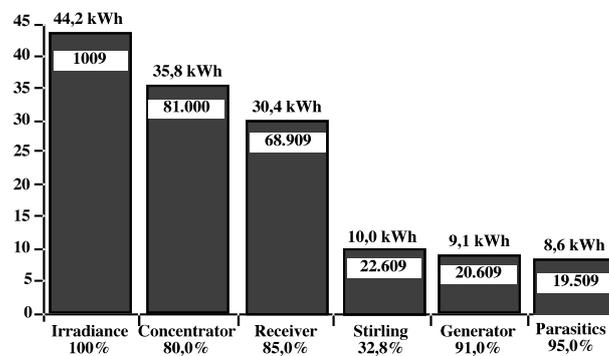


Figura 18. Comportamiento de un disco-Stirling



Figura 19. Aspecto de una pequeña central de Discos-Stirling

En resumen, las tecnologías solares de concentración que permiten alcanzar altas temperaturas y, por tanto, altos rendimientos termodinámicos presentan muy buenas perspectivas para ir sustituyendo a los combustibles fósiles para la generación de electricidad sobre todo en sistemas híbridos con otras formas energéticas y ajustándose muy bien a la curva de consumo.

En repetidas ocasiones me he referido a la hibridación por lo que creo que vale la pena dedicarle un poco de atención. La revisión del RD 436/04 en la legislación española contempla la hibridación como una forma de generar electricidad que puede ser primada a fin de hacerla económicamente interesante para los inversores. Con esa medida espero que los próximos años sean muy buenos para el desarrollo de todas estas tecnologías porque presenta bastantes ventajas aunque según mi criterio lo más importante es la posibilidad real, a la que me referido antes, de generar la electricidad de acuerdo con el consumo (fig. 20).

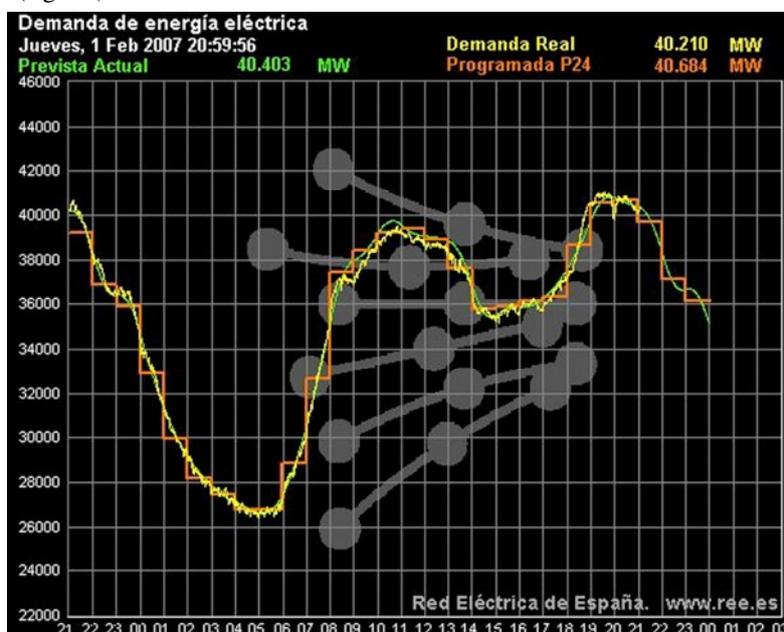


Figura 20. Gestión de los servicios energéticos

Experiencia destacada en Marruecos

Se encuentra en vías de adjudicación en Marruecos una planta sumamente interesante⁷ cuyas características relaciono a continuación:

• **Lugar: AIN BENI MATHAR al Noreste de MARRUECOS**

Proyecto de central termo-solar de ciclo combinado integrado.

La Entidad implicada es la OFFICE NATIONAL DE L'ELECTRICITE (ONE), compañía eléctrica del Reino de Marruecos.

Breve descripción del proyecto:

Licitación Internacional para la Construcción llave en mano (Contrato EPC) + O&M por 5 años (renovable de 5 en 5 años hasta un total de 20 años de O&M) de una Central Termo Solar con Ciclo Combinado Integrado con una potencia total neta combinada menor de 500 MW. Se han presentado dos opciones:

- Potencia total neta de 480MW, de los cuales 20MW son del campo solar.
- Potencia total neta de 490 MW, de los cuales 30MW son del campo solar.

La descripción de cada una de las Plantas es como sigue:

Campo Solar formado por un campo de espejos cilindro-parabólicos.

Ciclo Combinado formado por dos Turbinas de Gas + una Turbina de Vapor + dos HRSG's + Generadores y refrigeración mediante torres de refrigeración.

I+D en las tecnologías solares de media y alta temperatura.

Según lo insinuado en los párrafos anteriores, es evidente que se deben plantear varias fases que deben progresar en paralelo.

- a) La más inmediata y evidente es incorporar lo ya estudiado e investigado en el pasado y que no se había incorporado a los desarrollos ya en funcionamiento. Algunos ya se han citado.
- b) Nuevos dispositivos y técnicas pero con elementos y técnicas ya conocidas. Creo que hay que acudir a ciclos combinados y a turbinas de gas adaptadas a estas aplicaciones. Desde luego también a nuevos sistemas de almacenamiento con hidrógeno y otras sustancias químicas de interés (carburo de calcio, por ejemplo)
- c) Nuevas técnicas y materiales. Me refiero sobre todo a nuevas configuraciones de los materiales y sustancias con características mejoradas respecto de las habituales. La nanotecnología se presenta como una expectativa muy interesante a explorar.

6.CONCLUSIONES

- El sistema energético actual tiene que cambiarse en profundidad.
- El sistema energético del futuro tiene que ser:
 - Más eficiente
 - Más distribuido y descentralizado
 - Más justo y solidario

⁷ Coincide plenamente con mis planteamientos teóricos SOL-GAS.

- Menos contaminante
- Basado preferentemente en energías renovables
- Algunos países ya están haciendo algo en esa dirección, aunque tímidamente y de forma demasiado lenta.
- Marruecos tiene una situación privilegiada en este tema.

BIBLIOGRAFIA

Consejo Mundial de la Energía. Referencia de los 2000 millones sin electricidad.
Eurostat. <http://www.codigotecnico.es>.
IEA. Agencia Internacional de la Energía. <http://www.iea.org>.
IPCC.
IDAE. <http://www.idae.es>.
Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (<http://www.mityc.es>).
Ministerio de la vivienda.
Oficina Española de Cambio Climático OECC.
RUIZ, V. (2006), *El Reto Energético. Opciones de futuro para la energía*, Ed. Almuzara.

ANEXO

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

A título de ejemplo de cómo debería ser de detallado una actividad en el ámbito de la energía promovida por la Academia detallo a continuación un programa de I+D+I+D+F en energías renovables.

INDICE

- 1. Fuentes y recursos:** Radiación y temperatura ambiente, biomasa (forestal, agrícola, agroindustrial), vientos, hidráulica
- 2. Fundamentos de conversión:** Básico, química, bioquímica, fotovoltaica, fototérmica
- 3. Tecnología de conversión**
 - 3.1. Nivel elementos**
 - 3.2. Sistemas**
- 4. Desarrollos y aplicaciones:** Sistemas híbridos. Grandes plantas y centrales
- 5. Otros aspectos**
 - 5.1. Fuentes y recursos**
 - 5.1.1. Radiación solar, terrestre y de cielo:**

Mejora de la información disponible:

- Recopilación de los datos básicos y estudio de su validez (validación de datos y depuración)
- Obtención de funciones de transferencia entre datos de radiación (directa, global y difusa) y otras variables (horas de sol, temperatura, proximidad al mar, altitud, etc.)
- Nuevas estaciones de medida y contenido.
- Mejora de las estaciones existentes.
- Estudio de distribuciones temporales y espaciales (relación con medidas por satélite).
- Métodos de cálculo de directa y global en superficie inclinada.

5.1.2. Temperatura ambiente (seca y húmeda)

- Distribución espacial y temporal de temperatura seca y húmeda (o humedad relativa).
- Posibilidades de bombas de calor reversibles.
- Ahorro energético y mejora de nivel de confort. Influencia de la temperatura en la gestión de la demanda, tanto eléctrica como de combustibles.

5.1.3. Biomasa

- Biocarburantes. Bioetanol y biodiesel.
- Residuos agrícolas y ganaderos. Evaluación de posibilidades energéticas de los residuos forestales, agrícolas y ganaderos. Mecanismos de transformación en energía disponible (pellets, briquetas, biogas,...)
- Cultivos energéticos.

5.1.4. Eólica

- Inventario de posibilidades con medidas existentes.
- Nuevas estaciones de medida. Lugares idóneos.
- Estudio de emplazamientos para pequeñas explotaciones híbridas con hidráulica, fotovoltaica y biocarburantes.
- Almacenamiento con hidráulica e hidrógeno.

5.1.5. Hidráulica

- Inventario de centrales actuales (en servicio y fuera de él). Inclusión en el estudio de microcentrales y antiguos molinos de agua
- Estudio de posibilidades de nuevas explotaciones mini y micro en sistemas híbridos con fotovoltaica, eólica y biocarburantes.

5.2. Fundamentos de la conversión de fuentes primarias en intermedias y consumo.

5.2.1. Aspectos generales y básicos

- Apoyándose en los datos disponibles e inventarios, análisis de posibilidades y actuaciones necesarias.
- Fundamentos legales y jurídicos del aprovechamiento.
- Estudios ambientales y sociales.

5.2.2. Conversión fotoquímica

- Mecanismos de conversión (energéticos y no energéticos).

- Detoxificación de efluentes.
- Hidrógeno.

5.2.3. Conversión bioquímica

- Mecanismos de conversión.
- Microalgas. Factores de conversión y desarrollo temporal.
- Posibilidades de la captura de CO₂ en cultivos acelerados.

5.2.4. Conversión fotovoltaica

- Nuevos desarrollos.
- Mejora de características.
- Rendimiento máximo.
- Concentración.
- Paneles mixtos (cogeneración solar)

5.2.5. Conversión fototérmica.

- Estudio de materiales (emisividad, absorptancia, reflectancia, transmitancia).
- Selectividad frente a radiación de onda corta y larga.
- Mecanismos básicos de la conversión térmica.
- Aislamientos

5.2.6. Conversión eólico-eléctrica

- Mecanismos básicos.

5.2.7. Conversión hidráulica-eléctrica

- Mecanismos básicos.

5.3. Tecnología de la conversión

5.3.1. Nivel elementos

- Conversión fotoquímica: reactores y acumuladores.
- Conversión fotobioquímica: biodigestores, reactores, acumuladores.
- Conversión fotovoltaica: células y paneles, convertidores, reguladores (serie, paralelo y seguidores de máxima potencia,...), baterías, elementos de seguridad (desconectores por baja y alta tensión), dispositivos de uso en corriente continua.
- Conversión fototérmica:

Elementos pasivos en la edificación

Paneles térmicos (para calentamiento y enfriamiento)

Acumuladores (calentamiento y enfriamiento)

Otros elementos de instalaciones de baja temperatura (descalcificadores, sustancias antiheladas, anticongelantes y anticorrosivos,...)

Reflectores y refractores para media y alta temperatura

Absorbedores

Heliostatos (grandes, pequeños, autónomos, por radio, ...)

Seguidores

Electrónica e informática de sistemas solares

Receptores de media y alta temperatura

Motores Stirling, turbinas de vapor y de gas

Reconcentradores

- Biomasa.

Elementos de plantas de compactación

Elementos de recogida de residuos (urbanos, industriales y agrícolas y forestales)

Digestores

- Eólica. Alternadores, dínamos, reguladores, multiplicadores, Electrónica asociada.

- Hidráulica. Igual eólica.

- Ambiente. Bombas de calor reversibles. Elementos de máquinas de sorción (absorbedores, generadores,...). Otros elementos.

- Sistemas mixtos. Captadores híbridos térmico-FV. Receptores sol-gas,....

5.3.2. Nivel sistemas

- Sistemas químicos: de producción (H_2 , H_2O_2 , metano, carburo de calcio,...); y de almacenamiento.

- Sistemas bioquímicos y biológicos: de producción y recogida de algas y plantas.

- Sistemas fotovoltaicos y eólicos:

Alumbrado y abastecimiento eléctrico doméstico y público

Aplicaciones rurales: vivienda, bombeo, riego y abrevaderos.

Telecomunicaciones y señalización

Diseño de sistemas híbridos

- Sistemas fototérmicos:

Baja temperatura:

Arquitectura solar pasiva

Instalaciones ACS y climatización

Calentamiento de piscinas e invernaderos

Desalación y potabilización de agua

Secado

Media temperatura:

Calefacción y climatización (CPC, CP)

Industria (calor de procesos y otros)

Detoxificación

Desalación y potabilización

Alta temperatura:

Cogeneración

Producción de energía eléctrica

Productos químicos

Materiales especiales

5.4. Desarrollos y aplicaciones

5.4.1. "Instalación tipo" para viviendas (urbana y rural)

- De agua caliente

- De refrigeración, calefacción y climatización

- 5.4.2. “Instalación tipo” fotovoltaica (conectada a red y aislada)
- 5.4.3. Planta de cogeneración y ciclo combinado con sistema de concentración CP
- 5.4.4. Planta de cogeneración y ciclo combinado receptor central
- 5.4.5. Instalaciones integradas todas las posibilidades

5.5. Otros aspectos

- 5.5.1. Jurídicos y legales
- 5.5.2. Formativos
- 5.5.3. De comunicación y difusión
- 5.5.4. Sociales

- 1 La mayor parte (100 millones de km²) en el hemisferio Norte
- 2 Recientes estudios del Instituto Nacional de Meteorología de España estiman entre 4 y 8 °C el aumento de temperatura en la Península Ibérica hacia finales de este siglo.
- 3 Microrred con fotovoltaica.
- 4 Más de un tercio de la población mundial.
- 5 Recientemente (17-01-07) se ha aprobado en España la obligatoriedad del etiquetado energético de los edificios además de otras medidas de interés en el ámbito energético.
- 6 En Marruecos puede resultar especialmente fácil al haber una sola empresa nacional.
- 7 Coincide plenamente con mis planteamientos teóricos SOL-GAS



RECHERCHE ET ENERGIE

Robert GUILLAUMONT

Membre de l'Académie des Technologies, France

Résumé

Face à la demande croissante en énergie, à la nature des approvisionnements possibles et aux conséquences prévues de leur utilisation, on assiste depuis quelques années à une accélération de la prise de conscience des problèmes liés à l'énergie. Tous les pays sont concernés. Les données établies par les scientifiques et les experts sont maintenant largement relayées par les médias et dans les discours politiques, qui s'appuient pour cela sur des études prospectives internationales. L'information devient surabondante. Il est souvent difficile d'en extraire la limite des solutions préconisées pour suppléer à l'épuisement des ressources fossiles ou pour éviter les dangers pour notre planète. Il est tout aussi difficile de savoir si la Science sera prête à temps pour assurer leur mise en œuvre. L'Académie des Sciences a examiné quelles recherches devaient être conduites 1) au regard des évolutions inévitables de la production d'énergie, centralisée ou non, produisant au non des gaz à effet de serre, et 2) au regard de l'évolution du climat. Cette réflexion a conduit, en particulier aux conclusions suivantes. Il convient de poursuivre et d'intensifier les recherches sur le climat, qui sont une nécessité quels que soient les choix énergétiques. La capture et le stockage pérenne du gaz carbonique sont des sujets prioritaires mais difficiles, qui visent à pouvoir utiliser massivement le charbon. Le relais des carburants liquides fossiles par des fluides ne produisant pas de dioxyde de carbone, comme l'hydrogène, est un point dur de la recherche. L'alimentation électrique aux mégapoles sans accroître les désordres climatiques passe par l'utilisation de l'énergie nucléaire de fission (ou des centrales au charbon avec séquestration) et à ce sujet il faut continuer les recherches sur la gestion des déchets nucléaires et la valorisation des matières fissiles. L'utilisation massive des énergies intermittentes dérivées de l'énergie solaire passe par le stockage temporaire de l'électricité. D'une façon générale le stockage de l'énergie (électricité, hydrogène, chaleur) aura un rôle central à jouer pour remplacer celui joué implicitement par le stockage du gaz ou du pétrole et pour corriger les rythmes production continue – utilisation de pointe. Les études sur ce point devraient passer dans les priorités. L'utilisation de la biomasse cellulosique qui n'entre pas en compétition avec les cultures vivrières demande des recherches pour la synthèse de nouveaux carburants. Toutes les recherches actuellement ponctuelles sur les sources diffuses d'énergie méritent un nouvel examen. L'Académie des Sciences appelle l'attention sur les aspects sociétaux qui conditionnent l'efficacité énergétique et qui occultent souvent les aspects scientifiques et techniques. Les aspects sociétaux font l'objet de peu de recherche.

Constats

Face, à la demande croissante en énergie primaire commercialisée, à la nature des approvisionnements possibles et aux conséquences prévues de leur utilisation (GIEC crée en 1988) on assiste depuis une décennie à une accélération de la prise de conscience des problèmes liés à l'énergie.

Tous les pays sont concernés à titre divers par les approvisionnements et collectivement par les conséquences.

Les données établies par les scientifiques et les experts (faits et prévisions du GIEC 2007, www.ipcc.ch) sont maintenant largement relayées par les médias et dans les discours politiques, qui s'appuient pour cela sur des études prospectives internationales (scénarios d'évolution, DOE 2006, AIE 2006 et beaucoup d'autres).

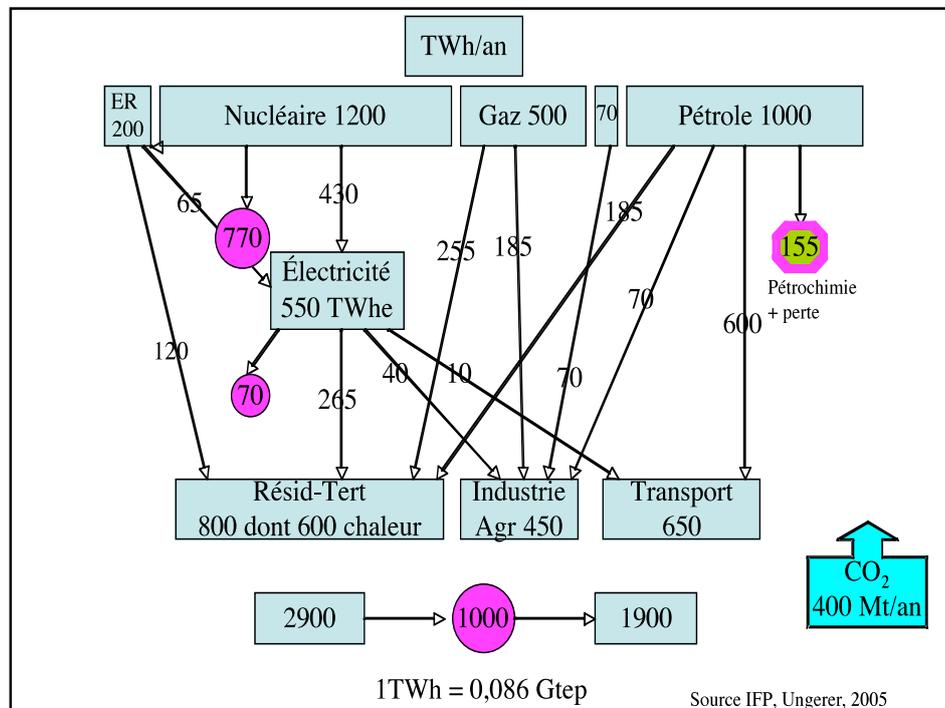
L'information devient **surabondante**.

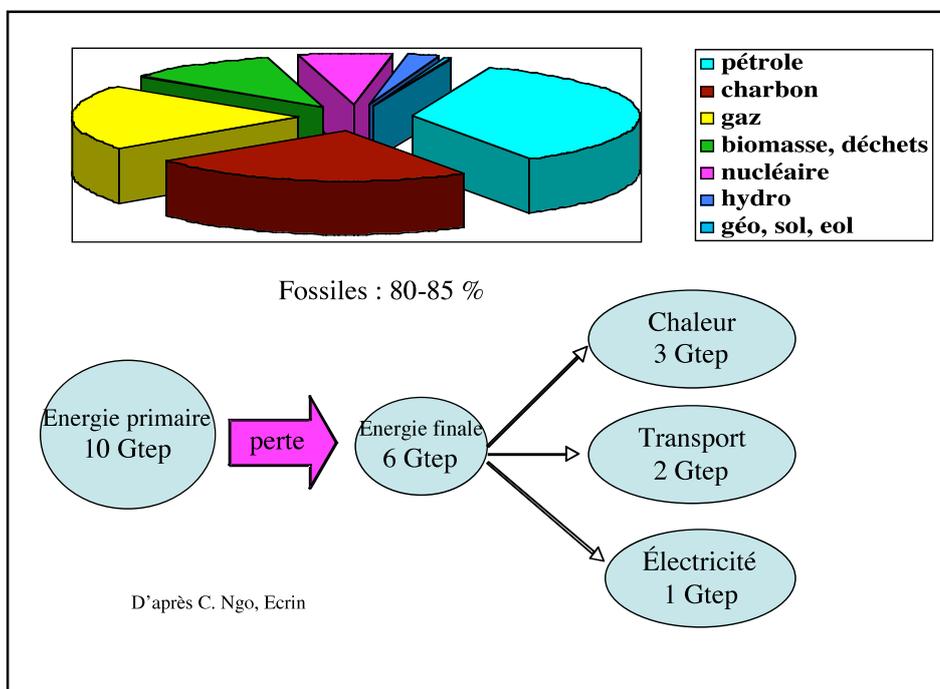
Il est souvent difficile d'en extraire **les limites** des solutions préconisées pour suppléer à **l'épuisement** des ressources fossiles ($\Delta E = \pm 100$ Gtep sur les ressources en pétrole et gaz entraîne $\Delta t = \pm 10$ ans pour des consommations de 3.5 Gt ou Gtep/an de pétrole et 3,5 Gtep/an de gaz) ou pour éviter les **dangers** pour notre planète (ΔT moyen 5 °C en 2100 ?).

Il est difficile de savoir si la **Science sera prête à temps** pour assurer leur mise en œuvre.

L'Académie des Sciences a examiné dans quels **domaines les recherches** devraient être soutenues **I**) au regard de **l'évolution du climat**, **II**) au regard des **évolutions** inévitables dans la **production d'énergie**, centralisée ou non, produisant ou non des GES selon différents scénarios, 2 sujets récurrents dans toutes les analyses

- Cette réflexion a conduit aux conclusions qui vont suivre, au regard de **deux besoins** qui apparaissent incontournables : **avoir de l'électricité** concentrée ou diffuse et **avoir du carburant** pour les transports. Elles rejoignent évidemment les innombrables et importants programmes déjà lancés. Elles mettent l'accent sur des **problèmes majeurs** ressentis par les scientifiques.
- Perspectives énergétiques, B. Tissot coordonnateur, Académie des sciences, DNBR, Tome VIII, 2005 (voir site)
- Prospective sur l'énergie au XXIe siècle, G. Ruelle coordonnateur, Académie des technologies, 2004 (voir site)





Quelques données bien connues :

Energie commerciale : environ 10 Gtep consommés, croissance estimée à 2-2,5%/an conduisant à environ 15 Gtep en 2030, demandes et croissance très inégales selon les pays, actuellement écart d'un facteur 6 (voire 10 pour l'électricité).

Energie non commerciale : environ 1 Gtep.

Approvisionnements : pétrole, gaz, charbon, uranium, sources intermittentes dues à l'action directe et indirecte du soleil, très inégaux selon les pays.

Utilisations : résidentiel-tertiaire-agriculture, industrie, transport.

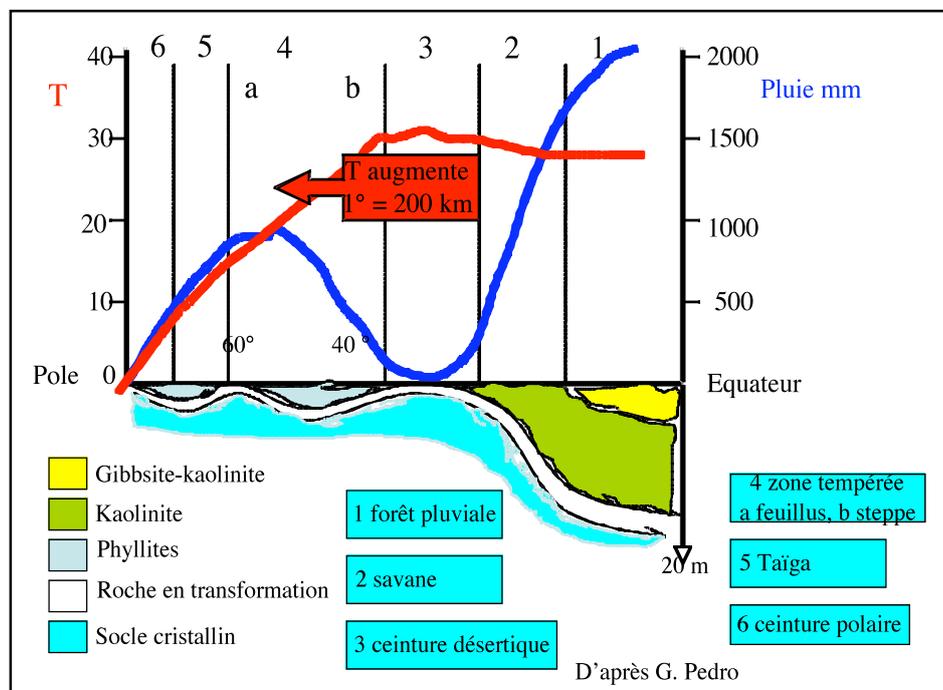
(suite)

Conséquence majeure pour la planète:

- émission **annuelle de GES** qui ajoutent $2,30 \text{ W/m}^2$ à l'atmosphère dont **60 %** sont dus au CO_2 et le reste à CH_4 (environ **30 Gt** de CO_2 rejetés restant **100 ans** dans l'atmosphère - **25** de combustibles fossiles, **5** de déforestations), pollutions diverses de l'atmosphère, prévision de rejet de **40 Gt** de CO_2 en 2030.

- **T moyenne augmente**, $0,74 \text{ }^\circ\text{C}$ sur 100 ans, prévue entre **2 et $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$** pour **550 ppmv** ($0,5 \text{ l/m}^3$) de CO_2 valeur que l'on pourrait stabiliser vers 2050, aujourd'hui on est à **380 ppmv**, l'augmentation prévue est de **2 ppmv/an**. En GES les valeurs sont **650 et 430**

- perturbation **globale et assez rapide** de la machine hydrique et perturbations **régionales** des cycles naturels de l'eau (événements singuliers et abrupts). $1 \text{ }^\circ\text{C}$ fait remonter le climat de **200 km** vers les pôles



I - Recherche et Climat

Il convient de poursuivre et d'intensifier les recherches sur le climat, qui sont une nécessité quels que soient les choix énergétiques.

Les modèles prenant l'effet des GES sont ajustés sur des valeurs physiques spatio-temporelles moyennes correspondant à 30 ans de mesures (atmosphère, continents, hydrosphère, cryosphère, cycle du Carbone).

La réponse est toujours positive. Sur 100 ans elle est encore incertaine.

Les modèles vont prendre en compte d'autres processus (chimie de l'atmosphère, cycles biogéochimiques), affiner les rétroactions (l'effet de serre est dû pour 2/3 à H₂O et 1/3 à CO₂) et aller vers une échelle régionale.

II - Recherche et Energie

Les recherches sont pilotées par la fiabilité et la compétitivité économique dans le perspective du court terme (2030) et du long terme (après 2050).

La séquence à parcourir, faisabilité scientifique, technique, industrielle peut demander des décennies.

Les recherches sont pluridisciplinaires.

Quels que soient les domaines les matériaux (massifs à nanodispersés) jouent un rôle essentiel (nucléaire, H₂, PAC).

La dimension des problèmes est énorme car planétaire.

1 – Trilogie : Charbon - GES - Nouveaux carburants

Les recherches sur la **capture et le stockage** pérenne du CO₂ visent à pouvoir utiliser massivement le charbon (chaleur, électricité).

Le charbon apparaît en outre être le relais ultime des carburants liquides fossiles pour faire des carburants de synthèse (1 litre de pétrole qui se transporte facilement contient 10 kWh).

L'utilisation massive du charbon est inéluctable à l'échelle de décennies et pour longtemps.

L'impossibilité de séquestration du CO₂ diffus conduit à envisager ce **relais par des fluides ne produisant pas de CO₂ (carburant issus de la biomasse, hydrogène)**.

Cela correspond à 3 immenses champ de recherches

1.1 Séquestration du CO₂

La production de CO₂ par un combustible diminue quand le rapport H/C augmente (pour 1 kWh les rejets sont 1 kg pour le charbon, 0,75 pour le pétrole, 0,5 pour le gaz, 0 pour H₂). Le charbon est le plus polluant (CO₂, SO₂, poussières, 100 fois plus de radioactivité que le nucléaire).

La capture actuelle du CO₂ se fait sur des gaz **à composition bien définie** et **constante**. Pour des centrales thermiques alimentées avec **divers charbons** c'est un autre problème, même dans les meilleures conditions de combustion (O₂, faible température, ..).

Elle diminuera évidemment le rendement énergétique de 10 à 15 % et augmentera le coût. Le transport du CO₂ vers le stockage s'imposera

Le stockage du CO₂ par injection dans **des couches géologique** (aquifère salins) plus ou moins profondes (au delà de 800 m pour le CO₂ supercritique) nécessite une **caractérisation fine des roches** (physique pour les fuites, chimique pour les interactions avec les minéraux du calcaire) et une **modélisation spatio-temporelle** difficile.

Les expériences actuelles portent sur 1 à 2 Mt/an. Pour un effet significatif sur l'effet de serre **il faudrait stocker quand on commencera et pour x siècles 10 à 20 Gt/an.**

On est dans un rapport 10⁵ dans l'expérimentation et l'ordre de grandeur des ouvrages à réaliser prend ici toute son importance (financement, possibilité réelles)

Les valeurs numériques qui circulent sur les **volumes offerts** au stockage géologique du CO₂ n'ont **guère de fondement** vu le nombre d'incertitudes qu'il faudra maîtriser

Le stockage par injection **en mer profonde** (lacs de CO₂) touche à la capacité de l'océan à tolérer une très forte concentration locale en CO₂ (retour à terme vers l'atmosphère, écosystème marin)

Au total le stockage du CO₂ demande d'intervenir sur le cycle du carbone.

1.2 Carburants relais des combustibles fossiles

Charbon (et gaz naturel) peuvent être **transformés en essence**. L'agent gazéifiant, O₂ + H₂O, conduit à des mélanges CO₂, CO, CH₄, H₂, base des procédés de synthèses de type Fischer-Tropsch, nécessitant un apport de H₂. Les rendements de 50-60 % **sont à améliorer** (pétrole en essence 90 %)

1.3 Carburants issus de la Biomasse

La biomasse est un amplificateur d'énergie. Avec 1 litre de pétrole on peut produire 2 litres de bioéthanol (8 au Brésil) avec des plantes sucrières et 3 litres d'esters de colza avec des plantes oléagineuses (et le double en en hydrogénant).

C'est l'utilisation de la **biomasse ligno-cellulosique** qui n'entre pas en compétition avec les **cultures vivrières** qui devrait être développée et qui demande des recherches pour la synthèse de nouveaux carburants selon les principes de la transformation du charbon ou l'utilisation de biotechnologies (4 kWh/kWh contre 3 et 2).

Le bilan énergétique « du sol à la roue » reste à faire en tenant compte des pouvoirs calorifiques respectifs de l'éthanol et de l'essence (2 litres d'éthanol correspondent à environ à 1 litre d'essence).

1.4 H₂ vecteur d'énergie (moteur thermique ou PAC)

La production massive de H₂ (autre qu'à partir de réserves fossiles) demande des **fluides à haute température** pour dissocier l'eau (électrolyse à haute température, cycles thermochimiques) produits par de l'énergie électrique sans GES. Le transport, le stockage, la distribution et l'utilisation directe de H₂ pour assurer le relais du pétrole posent des problèmes difficiles et repoussent une éventuelle « économie de l'hydrogène » après 2050. Aussi les piles à combustibles associées à H₂ pour les transports ou pour utilisation stationnaire ont peu de chance d'être utilisées dans un proche futur.

Il y a de nombreuses recherches sur ce sujet.

2 – Electricité

L'alimentation électrique **aux mégapoles** (50 % de la population, 400 villes de plus de 1 million d'habitants, 20 de plus de 10 millions, 80 % de la population en 2030) sans accroître les désordres climatiques passe par l'utilisation de **l'énergie nucléaire de fission** (ou des centrales au charbon avec séquestration, ce qui renvoie au problèmes de séquestration du CO₂) et la grande hydraulique.

L'alimentation **électrique diffuse** passe le « solaire ».

L'utilisation **massive des énergies intermittentes dérivées de l'énergie solaire** passe par le **stockage temporaire de l'électricité**.

Cela correspond à 3 immenses champ de recherches

2.1 Energie électrique très concentrée sans GES

Elle peut être fournie par la grande hydraulique (1 à 20 GWe par barrage), des centrales solaires (1 à 100 MWe), le grand éolien (2,5 MWe mais 0,5-0,6 MWe effectif) qui doit cependant être suppléé par une centrale au gaz (pour une puissance de plus de 10-15 % du réseau). Le prix du kWh va du prix standard à 3 fois plus (**bien qu'indépendant des GES**).

L'énergie nucléaire (**la seule ne relevant pas de l'énergie de notre soleil**) est sans commune mesure avec l'énergie chimique (1 g de matière fissile - U235, Pu 239, 241- donne 24 MWh, 1 g de pétrole 0,016 kWh)

L'énergie électrique nucléaire (réacteurs de Génération II et bientôt de Génération III) provient de **réacteurs à neutrons thermiques** alimentés avec Unat (et Pu) sur des réserves pour **le siècle** (70 ans pour 350 GWe et 2650 TWh).

L'unité de base est un réacteur de 1 GWe qui donne 7 TWh/an. Le prix du kWh est le prix standard.

Une prochaine étape pourrait être **les réacteurs électrogènes de faible puissance (300-600 MWe) et des réacteurs cogénérateurs électricité-chaleur à haute température (100-300 MWe, 900 °C, production de H₂, industries).**

Le principal problème est la **gestion définitive des déchets MHA VL (radiotoxicité sur des millénaires).**

Plusieurs voies sont explorées pour la réduire: Séparation-Transmutation (ST) et stockage géologique (SG).

La ST passe par une nouvelle génération **de réacteurs à neutrons rapides**, attendue après 2050 (Génération IV). Ils permettraient de porter l'utilisation de Unat de 0,71 % à 100 % (en théorie) et **travaillant à haute température d'augmenter** les réserves en matières fissiles à **plusieurs millénaires**. Un relais multiplicateur par le Th est aussi possible.

Un effort **considérable de recherche** reste à mener au niveau mondial pour lancer les **réacteurs à neutrons rapides** ainsi que pour lancer les **installations associées** car le retraitement du combustible est obligatoire (Forum international Gene IV, 13 pays).

Combustible nucléaire usé (CU) source de matières fissiles (U et Pu) et de déchets (PF et actinides mineurs)

Quantités annuelles calculées (en kg) de PF et d'actinides produites dans un REP de 1 GWe (facteur de charge 85 %, 7,4 TWh) chargé avec un combustible UOX2 puis brûlé à 45 GWj/t (21 t déchargées).

PF: 987 (dont 23,6 de ^{99}Tc , 4,9 de ^{129}I et 10,1 de ^{135}Cs), U :19 758, Pu: 236,7, Np: 12,8, Am: 14,13, Cm: 1,76

Après 5 ans de déchargement la Radioactivité est de l'ordre du Ci/g et la Chaleur dégagée de 25 kW/t.

Périodes radioactives (année) : ^{99}Tc : $2 \cdot 10^6$, ^{129}I : $1,6 \cdot 10^9$, ^{135}Cs : $3 \cdot 10^6$, $2,5 \cdot 10^5 < \text{U} < 4,5 \cdot 10^9$, $6 \cdot 10^3 < \text{Pu} < 3,7 \cdot 10^5$, ^{238}Pu : 87,7, ^{241}Pu : 14,4, ^{237}Np : $2,4 \cdot 10^6$, ^{241}Am : 432, ^{243}Am : $7,38 \cdot 10^3$, ^{244}Cm : 18,1, ^{245}Cm : $8,5 \cdot 10^3$

On totalisait en 2004, 440 réacteurs électrogènes dans 31 pays (366 GWe, 2620 TWh). En moyenne 10 000 t de «CU» sont annuellement déchargées à des taux de combustion variables. Le stock est de 175 000 t et 75 000 t ont été retraitées. La production moyenne mondiale de Pu civil dans le CU est de 75 t par an. Il en faut 10-15 t pour lancer un RNR.

Période de temps à considérer dans la gestion des déchets nucléaires (CU ou déchets de retraitement MHA VL), par SG ou par ST.

Gérable par la société

50 ans pour le refroidissement des CU ou HAVL (PF, actinides à vie courte)

100-300 ans pour appliquer une solution: 100 pour le remplissage du SG, 200 pour la ST (PF, actinides à vie courte)

Gérable par la géologie

Jusqu'à 100 000 ans: isoler/confiner par des barrières artificielles ^{99}Tc , ^{129}I , ^{135}Cs , ^{239}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am

Au delà de 100 000 ans: confiner par la géologie ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{242}Pu (quasiment impossible pour I et Cs)

Impact radiologique toujours de l'ordre de celui de la radioactivité naturelle

Le confinement des radioéléments doit être 10⁴ fois plus efficace que pour les éléments toxiques (C_{Pu} dans l'eau limitée à 10⁻¹⁰ M pour 1 mSv)

La stratégie ST diminuerait les quantités d'actinides (100 fois?) et faciliterait la stratégie SG.

2.2 Energie électrique peu concentrée sans GES

La petite hydraulique (10 MWe), le petit éolien (1-10 MWe), voire la géothermie donnent un kWh 2 fois plus cher que le standard.

La souplesse vient du solaire photovoltaïque, PV, (1 kWh- 1 MWe, 100-250 kWh/m²/an) même si le prix du kWh est très élevé (15 fois plus et 50 fois plus si on lui associe des batteries).

Le PV repose sur le Si très cher à obtenir et la recherche se concentre sur l'augmentation du rendement du Si polycristallin (15 %) ou amorphe (8 %). La récupération de l'énergie consommée pour la fabrication demande 5 ans de fonctionnement d'une cellule et plus pour batterie.

2.3 Stockage de l'énergie

D'une façon générale le stockage de l'énergie (électricité, hydrogène, chaleur) aura un rôle central à jouer pour remplacer celui joué implicitement par le stockage du gaz ou du pétrole, tellement aisé que l'on en parle plus, et pour corriger les rythmes production continue/discontinue –utilisation de pointe.

L'optimisation entre énergie stockable (masse, volume) et énergie utile (durée et nombre d'utilisation) est délicate.

Le stockage de faibles ou d'importantes quantités d'électricité est possible. Leurs coûts importent peu (piles, batteries) ou est faible (barrages). Le stockage de quantités moyennes (parc d'éoliennes, parcs de capteurs photovoltaïques) n'est pas encore actuellement résolu de manière efficace (compression d'un fluide dans des cavernes souterraines ou dans des réservoirs construits).

Le problème du **stockage de l'électricité pour la propulsion d'une voiture** avec une autonomie raisonnable est très complexe (charge, poids, volume des batteries).

Le stockage saisonnier de la chaleur (basse et haute température, **eau ou béton** ayant de bons capacités spécifiques, GWh) relève de la technologie des **grands réservoirs** de surface ou souterrains.

Il est plus difficile de transporter la chaleur (10 à 100 km avec une puissance de 0,1 – 1 GW). Le couplage au solaire thermique est intéressant (200-600 kWh/m²/an).

2.4 - Autres recherches techniques

Toutes les recherches actuellement ponctuelles sur les **sources diffuses** d'énergie méritent un nouvel examen (énergie des mers, biogaz, thermoélectricité..).

L'utilisation de la chaleur (ou du froid) est un domaine clé pour les économies. Il conviendrait

-de mieux utiliser la **chaleur des rejets thermiques massifs** (cycle de Carnot) pour le chauffage (2 TWh rejetés pour 1 TWh fourni) voire de faire de la **cogénération** (prélèvement d'une puissance électrique pour avoir de la chaleur) et de développer le **transport** de la chaleur à grande distance. Avec un réacteur nucléaire de 1 GWe en diminuant le rendement de 3 % on disposerait de 6 TWh)

-de développer les **amplificateurs d'énergie** pour utiliser la chaleur à basse température de l'eau et de la terre (1 kWh donne 3 à 4 kWh de chaleur en refroidissant de l'eau).

-Toutes les recherches de piégeage du CO₂ par dilution en mer méritent examen

III - Recherche en sociologie

Les aspects sociétaux (**valeurs sociales, valeurs économiques, éducation**) conditionnent l'efficacité énergétique. Les aspects politiques occultent souvent les aspects scientifiques et techniques.

Comment développer les **modèles économiques à l'échelle séculaire** intégrant démographie, coûts externes des filières énergétiques, taux d'actualisation, , ...

Comment **organiser la (les) recherche** pour aller dans les directions qu'indiquent les études déjà conduites.

Comment **changer les comportements individuels et collectifs**

- vis à vis des **économies d'énergie** qui passent par l'incitation financière aux nouvelles technologies et la modification des comportements dans le **Résidentiel et Tertiaire** (chauffage et vie courante) et dans les **Transports** en accord avec de nouvelles « architectures ». Le gain pourrait être de 30 à 40 %. Ce qui coûte en terme d'énergie ce n'est pas la nourriture (2,7 kWh/j pour se nourrir, 150kWh/j pour vivre, nourrir la planète demande 500 Mtep soit 5-6 % de l'énergie).

-vis à vis de l'**acceptabilité** des modes de production de l'énergie et de leurs conséquences

Conclusion

Il est urgent de développer un **effort scientifique** et technique très **ambitieux**. Les travaux effectivement menés dans le domaine de l'énergie restent modestes en face de la gravité de la situation et de l'ampleur des problèmes.

On doit faire face à une **double inertie**, technologique et sociétale (même ordre de grandeur)

Les pré-supposés que les technologies permettront de résoudre tous les problèmes doivent devenir des certitudes.

Les résultats acquis permettent-ils déjà de dégager les meilleurs choix ? Les verrous de connaissances sont-ils bien identifiés pour développer et optimiser les nouvelles technologies ? Les recherches déjà entreprises sont-elles à la hauteur des attentes ? Les recherches innovantes nécessaires sont-elles lancées ?

Ne pas faire de l'**utopie scientifique** qui entraîne l'**utopie économique et politique**.

Equivalences

1 t de produits pétrolier = 1tep = 11620 kWh = 11,6 MWh

1 t de GPL = 1,095 tep

1 t d'essence = 1,048 tep

1 t de charbon = 0,619 à 0,405 tep

1 t d'éthanol = 0,638 tep

1 t de bioester = 0,876 tep

1 t de bois = 0,147 tep

1000 m³ de gaz naturel TPN = 1 tep

1 t d'hydrogène (10 000 m³ TPN) = 2,86 tep

1 MWh = 0,086 tep, 1Mtep = 1/0,086 TWh

Rendement d'un réacteur nucléaire : 0,33

Rendement de la géothermie : 0,01



DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS LE MIX ENERGETIQUE DES PAYS INDUSTRIALISES, EMERGENTS ET EN DEVELOPPEMENT

Yves MAIGNE

Directeur de la Fondation Énergies pour le Monde
Membre de l'Académie des Technologies, France.

1. INTRODUCTION

L'analyse des différents contextes énergétiques dans lesquels la production d'électricité renouvelable évolue, celle du potentiel et de la dynamique des principales filières renouvelables aux niveaux mondial et régional permettront de proposer des orientations pour que les technologies des énergies renouvelables participent pleinement aux futurs mix énergétiques.

La problématique du réchauffement climatique est devenue palpable. Le rapport Stern a précisé le coût de l'effet de serre évalué à 5 500 milliards d'euros si aucune mesure radicale n'était prise au cours des dix prochaines années.

Les nations conscientes des conséquences du réchauffement climatique ont intérêt à agir, mais grande est la tentation de laisser son voisin agir seul avec le risque de voir la situation se détériorer. Parallèlement, les contraintes sur les énergies fossiles sont aujourd'hui connues et affectent tous les pays non producteurs: fluctuations des cours, balance des paiements, insécurité d'approvisionnement.

Au-delà des nécessaires mesures de maîtrise de l'énergie, les énergies renouvelables peuvent contribuer à réduire l'ampleur du changement climatique et desserrer les contraintes des énergies fossiles.

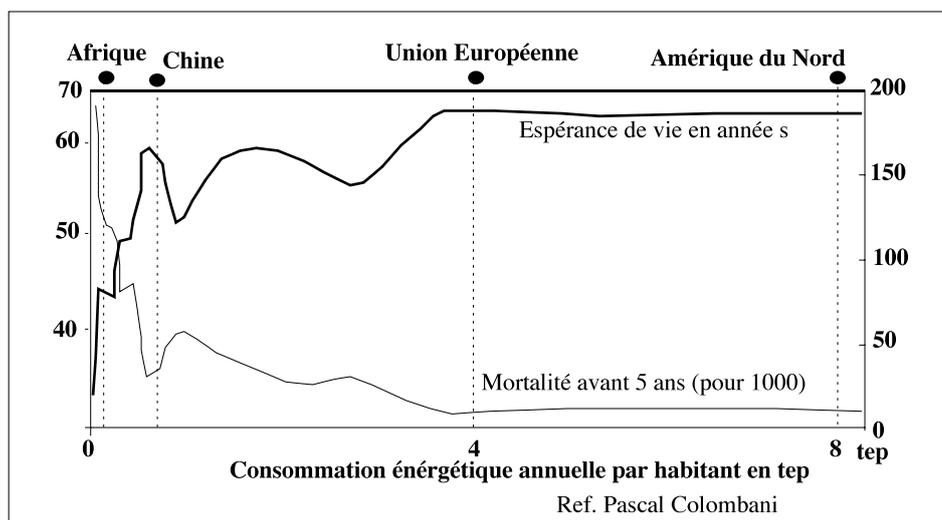
2. CONTEXTES LOCAUX

Les situations et choix énergétiques sont variés, selon le contexte local.

2.1. Pays moins avancés

Ces pays se focalisent sur leur survie (Figure 1a). Conscients du réchauffement climatique et déjà affectés par ses premiers effets, touchés durement par l'augmentation du prix des hydrocarbures, ils n'ont pas les moyens d'y faire face. Seule l'aide internationale est en

mesure de réduire l'ampleur de leurs impacts et de favoriser l'utilisation de technologies énergétiques respectueuses de l'environnement.



2.2. Grands pays émergents

Pour ces pays, la priorité est donnée à leur essor économique rapide. Ces nations tentent de répondre à l'augmentation phénoménale de leur consommation énergétique. Si le développement durable passe après le développement économique, ces pays expriment cependant un souci croissant de limiter les dégâts écologiques.

2.3. Pays émergents de moindre importance

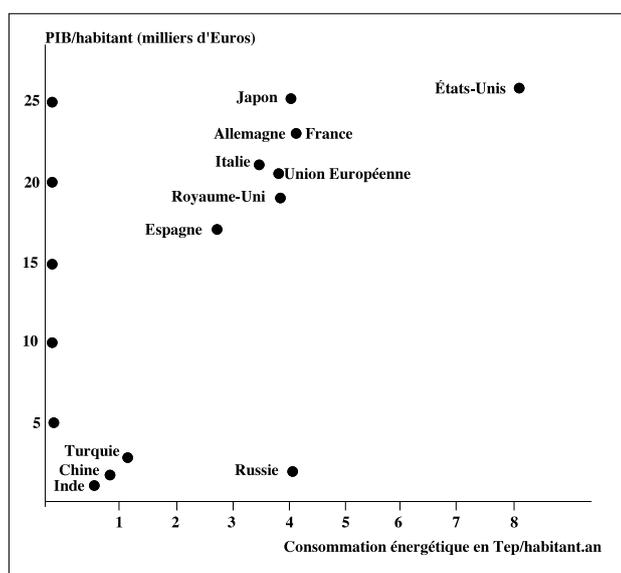
Ces nations tentent elles aussi et selon leurs moyens de valoriser les potentiels énergétiques renouvelables disponibles au sein du merit order des différentes technologies pour se constituer un mix énergétique adapté.

2.4. Pays industrialisés

Au sein des pays industrialisés, deux grandes tendances s'expriment, représentées par l'Amérique du nord, d'une part et l'Europe et le Japon d'autre part (Figure 1b).

- Dans l'immédiat, pour l'Amérique du Nord qui dispose de réserves importantes en charbon, mais voit la fin proche de son autosuffisance en gaz naturel et une dépendance croissante de l'extérieur pour le pétrole, la sécurité d'approvisionnement et la volonté de maintenir l' "american way of life" sont les priorités. Si des recherches importantes sont menées sur les technologies capables de réduire les pollutions des combustibles fossiles, cette position explique la politique américaine au Moyen Orient, en Asie centrale, en Russie, en Alaska, en vue de s'assurer par tous les moyens le contrôle des approvisionnements et l'attitude vis-à-vis du protocole de Kyoto.

- Les autres pays de l'OCDE sont beaucoup plus sensibles aux questions environnementales et dépendants d'énergies importées. La plupart, comme la France avec son objectif de réduction par 4 de ses émissions de gaz à effet de serre en 2050, le scénario Facteur 4, voit la dérive climatique comme préoccupation première. Ils ont signé le Protocole de Kyoto et explorent la voie réglementaire plus activement que les voies de la recherche technologique.



Cette analyse rapide a montré l'expression actuelle des différentes volontés politiques d'intégration des énergies renouvelables dans les bouquets énergétiques nationaux.

3. POTENTIEL D'EXPLOITATION

Le potentiel d'exploitation des gisements d'énergies renouvelables est au rendez-vous et permet d'être beaucoup plus ambitieux :

- Pour les pays les moins avancés, les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, biomasse) sont susceptibles d'apporter une réponse adaptée compte tenu des gisements énergétiques locaux. Situés pour la plupart dans la ceinture des tropiques, ils bénéficient de l'ordre de 2 500 heures d'ensoleillement annuel.

Les gisements hydrauliques, mal répartis, sont importants dans certaines régions (Fouta Djallon, Afrique centrale, Amérique du sud, Péninsule indienne, Asie du sud-est). Seuls les sites capables de fournir des puissances supérieures à 5 MW sont clairement répertoriés, les autres ne le sont pas.

Le gisement de biomasse est immense, mais son utilisation à des fins énergétiques doit être analysée au regard de celle destinée à l'alimentation et de l'exploitation raisonnée du patrimoine forestier. Seul le gisement éolien est limité à certaines zones côtières ou des configurations géographiques particulières. Il est encore mal connu.

- Dotés de gisements en énergie solaire, hydraulique, éolienne et de biomasse, les pays émergents, grands ou petits, disposent de ressources encore largement inexploitées. à titre d'exemples, la Chine dispose de très importants gisements exploitables, 250 GW en éolien et 380 GW hydraulique, le Brésil de près de 600 GW en hydraulique et l'Inde de 80 GW.

Les pays du Maghreb disposent d'un potentiel solaire couvrant largement la demande.

- Les pays de l'OCDE sont ceux dont les ressources renouvelables semblent être les plus limitées, excepté l'éolien pour l'Europe, mais d'un potentiel encore largement inexploité.

Entre choix énergétique et potentiels d'exploitation, un bref inventaire de l'évolution de la production d'électricité par énergies renouvelables permet de mesurer le chemin parcouru. Les obstacles rencontrés permettront enfin de proposer des orientations pour l'avenir.

- La production d'électricité renouvelable, ayant fourni en 2005 3 283 TWh soit 18,1 % de la production mondiale, fait partie intégrante du système énergétique. Elle est bien entendu inférieure à la filière thermique (66,4 %) mais supérieure à la filière nucléaire (15,2 %).
- La filière hydraulique qui en représente 89,5 % croît d'environ 1,5 % par an depuis 1995 alors que les autres sources bénéficient, sur la même période, d'un taux de croissance de 8,5 %, faisant passer la part des nouvelles énergies renouvelables à près de 4 %.
- L'électricité d'origine éolienne a cru de près de 30 %, celle d'origine solaire de 20 % et celle issue de la biomasse de près de 6 %.

Ces évolutions et leurs impacts sont différents selon les régions et les pays :

- Dans les pays les moins avancés, c'est en particulier pour favoriser l'accès aux services de l'électricité en milieu rural que les énergies renouvelables voient leur plus large utilisation. La production locale d'énergie, dispensant des réseaux de transport électrique et d'hydrocarbure en sont les deux principaux atouts. Le coût d'investissement des équipements représente l'obstacle majeur de la banalisation des énergies renouvelables, qu'elles soient hydraulique ou solaire. Cette dernière technologie, bien que la plus facile à mettre en œuvre et à exploiter, fait face au nécessaire stockage du à l'intermittence du rayonnement solaire et aux limitations en énergie électrique fournie.
- Les pays émergents, par contre, se lancent plus volontairement dans l'exploitation des sources d'énergies renouvelables mais la part qu'elles représentent diminue compte tenu de l'augmentation de la consommation électrique.

L'exemple du Maroc, mais aussi ceux de l'Inde, de la Chine ou du Brésil, montrent combien les défis posés par le changement climatique et la sécurité d'approvisionnement sont pris à bras le corps, mais aussi combien l'essor économique appelle de nouvelles capacités de production. Malgré l'augmentation des capacités de production des énergies renouvelables, leur contribution baisse.

- En Chine, près de 15 % de la production électrique sont d'origine renouvelable grâce à l'hydraulique. Si en 2005, 1 700 MW éoliens étaient installés, le double est prévu. Le XIème plan (2006-2010) a alloué 175 milliards \$ pour le développement des énergies renouvelables et la protection de l'environnement. Mais la part des énergies renouvelables a reculé de 4 % de 1995 à 2005.
- En Inde, la production à partir de renouvelables a cru de 4 % en 2005 mais la part des renouvelables a baissé de 2 % et ne contribue plus qu'à 15 % de la production totale.

- Au Brésil, si 94 % de l'électricité était d'origine hydraulique en 1995, les récents investissements dans des centrales à combustibles fossiles ont fait chuter cette contribution à 87 % de malgré des investissements dans l'hydraulique, la biomasse, l'éolien et le solaire.

Cette dynamique favorable doit être renforcée et poursuivie par la pérennité des Mécanismes pour un Développement Propre après 2012 mais surtout associée à des politiques volontaristes de maîtrise de l'énergie, complément indispensable à toute politique de développement des énergies renouvelables.

- Quant aux pays de l'OCDE, des efforts significatifs sont menés en Europe sous l'impulsion de la Commission européenne pour atteindre, en 2010, 21 % de la consommation d'électricité à partir d'énergies renouvelables.

Au regard des 14 % atteints fin 2005, les objectifs ne seront vraisemblablement pas atteints, mais la croissance et les perspectives de l'éolien devraient permettre de s'en rapprocher. Le Japon se donne un objectif de 3 % en 2010, contre 1,6 % en 2002, avec pour cela 3 GW d'éolien, 4,8 GW en solaire photovoltaïque et 4,5 GW issus de la biomasse.

- Sans vouloir forcer le trait, ce ne sont malheureusement que des Katrina à répétition, ou peut-être et il faut l'espérer, un changement de majorité qui permettront, au-delà des efforts que mènent plusieurs de ses États, au gouvernement fédéral des États Unis de s'orienter vers une politique énergétique plus réaliste.

Ces dynamiques doivent aujourd'hui tenir compte des obstacles qu'elles rencontrent pour n'être ni freinées, ni rejetées.

4. SUGGESTIONS POUR UN CHANGEMENT D'ÉCHELLE

4.1. Au niveau financier

- Pour les PMA, l'aide publique au développement doit privilégier les projets d'infrastructures énergétiques faisant appel aux énergies renouvelables et favoriser les options alternatives aux opérations conventionnelles, selon des modalités financières adaptées ;
- Dans les pays émergents, aux côtés des mécanismes de financement habituels, les mécanismes de valorisation de la quantité de CO₂ évitée doivent être améliorés et poursuivis au-delà de 2012 pour compenser les coûts d'investissement élevés des systèmes d'énergies renouvelables ;
- Dans les pays industrialisés, des incitations financières individuelles, crédits d'impôts, tarifs d'achat garantis, certificats verts, doivent être banalisées pour, là encore, compenser les différences de coûts ;
- Quels que soient les contextes, la question de l'acceptabilité de ces sources d'énergie doit être abordée : acceptation de l'engagement financier que représente le développement de ces nouvelles technologies, acceptation des infrastructures décentralisées de production.

4.2. Au niveau technique

- Les gisements énergétiques locaux, et particulièrement ceux des pays les moins avancés, doivent être connus plus précisément ;

- Les pays industrialisés, conjointement aux pays émergents, doivent accroître leurs efforts de recherche pour abaisser les coûts des technologies existantes et favoriser des ruptures technologiques;
- Des solutions doivent être apportées pour faciliter l'intégration de ces sources d'énergie aléatoires dans les réseaux, devenus " intelligents ";
- Le stockage de l'électricité doit faire l'objet de recherches pour le remplacement des accus électro-chimiques;
- Il n'est pas inutile de rappeler l'indispensable effort de maîtrise de l'énergie à mener dans les secteurs du bâtiment et des transports.

4.4. Au niveau institutionnel

- Aux acteurs habituels de l'énergie doivent être associées toutes les parties concernées et en particulier par :
- Un accompagnement de la société civile, dans ses capacités d'innovation et d'inventivité ;
- L'association de l'approche par secteurs à une approche par acteurs;
- Une implication des collectivités territoriale forte;
- Une démarche " bottom-up " doit être promue, combien difficile dans les pays à tradition centralisée;
- Une meilleure appréciation de la vulnérabilité des modèles doit permettre une meilleure sécurité d'approvisionnement.

5. CONCLUSION

Ce rapide tableau des enjeux, des contextes, des stratégies, du chemin parcouru, des obstacles et des suggestions, montre l'urgence des passages que le recours nécessaire aux sources d'énergies renouvelables implique :

- Passage d'énergies primaires commerciales à d'autres qui ne le sont pas,
- Passage d'énergies polluantes à des énergies propres,
- Passage de quelques grandes centrales à un grand nombre de petites et moyennes unités,
- Passage de structures concentrées de sociétés et de propriété à des organisations plus diversifiées.

Le passage à des flux énergétiques différents, change tout. Il représente un changement de paradigme en termes technologique, économique et politique.

Il est de notre responsabilité, à notre niveau, membres de diverses académies et experts du secteur, de tout mettre en œuvre pour convaincre nos responsables politiques de ce nécessaire changement et des mesures, même douloureuses, à prendre.

Il est nécessaire de relever le défi qu'Amartya Sen, indien et prix Nobel d'économie, résume ainsi : "Le développement, au fond, est un processus de responsabilisation, et ce pouvoir peut être utilisé pour préserver et enrichir l'environnement, au lieu de le décimer".

SOURCES

- Académie des Technologies : Prospective énergétique au XXIème siècle
- Document de synthèse Energies renouvelables
- Observ'ER : 8^{ème} inventaire de la production électrique par énergies renouvelables
- Agence International de l'Énergie : World Energy Outlook 2006



CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES: ÉVOLUTIONS ET PERSPECTIVES

Mimoun ZAZOUI¹, Ali AHAILOUF²
& Mohammed FLIYOU³

¹ Faculté des Sciences et Techniques, Mohammedia, Maroc

² Faculté des Sciences et Techniques, Fès, Maroc

³ École Normale Supérieure, Marrakech, Maroc

Résumé

Le concept de production d'électricité par conversion de la lumière à l'aide de cellules photovoltaïques est aujourd'hui bien compris et connaît un essor fulgurant à l'aube du 21^{ème} siècle où le recours aux nouvelles formes d'énergie constitue une priorité de chaque nation. Le principal facteur qui freine encore son utilisation est le coût de son exploitation comparé à d'autres formes d'énergie même si l'énergie solaire est propre et est sans conséquences sur l'environnement. Dans cette présentation, nous rappelons le principe de la conversion photovoltaïque avant de présenter les potentialités des premières filières de cellules solaires à base de silicium. Ensuite on fera une présentation succincte sur les cellules solaires en couches minces en mettant l'accent sur leurs avantages et leurs inconvénients tout en présentant les quelques exemples types qui ont permis d'avoir les plus forts rendements. Une attention particulière sera ensuite consacrée aux cellules solaires multijonctions de hautes performances, inventées pour permettre un meilleur balayage du spectre solaire et assurer ainsi de meilleurs rendements. Certains résultats seront présentés et commentés. En dernière partie on fera le point sur les nouvelles cellules solaires organiques, hybrides et de Graetzel en présentant leurs atouts et leurs inconvénients. L'exposé sera conclu par une présentation des potentialités nationales nécessaires à faire émerger l'énergie solaire et les axes de recherches qui y sont attachés et à explorer pour un développement durable.

INTRODUCTION

L'augmentation croissante de la population mondiale et l'explosion du développement industriel des pays industrialisés débouche sur une augmentation croissante des besoins énergétiques. A l'échelon mondial, la production actuelle en énergie est essentiellement basée sur des ressources dites «non renouvelables» telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon ou encore l'uranium. Une fois ces ressources épuisées, l'homme sera condamné à trouver d'autres alternatives pour produire cette énergie dont il s'est rendu dépendant.

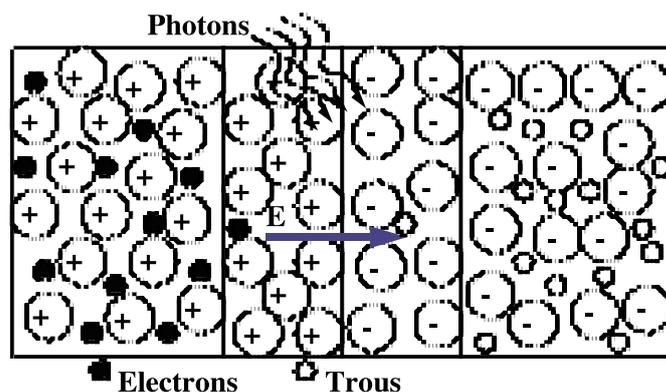
On distingue actuellement plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Ce dernier consiste à transformer directement la lumière en électricité. Il constitue une solution bien adaptée pour le secteur du résidentiel tertiaire

qui représente un peu plus de 40 % de la consommation énergétique mondiale. Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de lumière en électricité, la plus connue est certainement la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semiconducteurs tel que le silicium (Si) ou les composés semiconducteurs tel que le tellure de cadmium (CdTe) ou le cuivre-indium-(gallium)-disilénide (CIS/CIGS), les cellules Grätzel ou cellules dites tandem. Nous présentons dans cet article les différentes technologies de cellules solaires associées aux matériaux cités ci-dessus.

1. PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

1.1. Effet photoélectrique et jonction PN

L'effet photoélectrique, découvert en 1839 par le physicien Edmond Becquerel, correspond à la création de paires électrons-trous dans un matériau suite à l'absorption de photons.



La seule condition est que l'énergie du photon soit supérieure ou égale à la bande interdite du matériau. Cet effet, crée au point de jonction entre deux matériaux un potentiel électrique ce qui donna naissance à l'idée de pouvoir transformer l'énergie solaire (photons) en énergie électrique. Depuis le challenge des scientifiques du monde entier fut de pouvoir utiliser cette énergie abondante et gratuite (soleil) pour générer de l'énergie électrique [1].

Profitant des progrès de la microélectronique au milieu du 20^{ème} siècle, les recherches sur le développement des cellules solaire se sont focalisées sur la possibilité de générer du courant électrique suite à l'illumination d'une jonction p-n. Cette structure est obtenue en dopant différemment deux zones adjacentes dans un semiconducteur, le silicium par exemple. En effet dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés sont immédiatement séparées sous l'effet du champ électrique qui règne dans cette zone et sont drainés vers les zones neutres où apparaît alors une différence de potentiel électrique. Si le dispositif est relié électriquement à une charge on observe alors un passage de courant électrique qui prend naissance uniquement sous l'effet de l'illumination. C'est ce principe qui est utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques.

1.2 Limitations

Une première limitation vient du fait qu'on ne peut pas transformer tous les photons du spectre solaire en paire électrons trous, en effet tous les photons dont l'énergie est inférieure au gap d'énergie ne seront pas absorbés. Pour le silicium par exemple seuls les photons ayant une énergie supérieure ou égale à 1,14 eV (soit une longueur d'onde inférieure à 1100 nm) seront en principe absorbés car une certaine portion se perd aussi dans les réflexions aux interfaces. En plus tous les porteurs photogénérés ne participent pas au courant, puisque une certaine partie d'entre se perd à travers les différents processus de recombinaison. Ces phénomènes de recombinaisons ont pour origine les défauts de structure intrinsèques au matériau et même certains facteurs technologiques tels que les interfaces et les contacts. Tous ces paramètres font que les rendements théoriques ne sont jamais atteints et que les meilleurs prototypes ont un rendement en-deçà de la limite de 31% rapportée dans la littérature [2].

2. Les filières silicium cristallin

Le silicium est un des éléments les plus abondants dans la nature. Son utilisation dans l'industrie de la microélectronique et la maîtrise de sa technologie font de lui l'élément de base 'naturel' pour le développement des cellules solaires. Le problème est que son gap d'énergie est de 1.14 eV et il ne peut absorber toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire. Malgré cet inconvénient les cellules solaires à base de silicium occupent la part du lion dans le marché des cellules solaires avec 90% de part de marché. Les cellules solaires à base de silicium ont été développées sur trois variétés.

Les cellules à base de silicium monocristallin ont un rendement qui avoisine les 16% dans les meilleurs cas pour les modules photovoltaïques; elles sont onéreuses quant au prix de revient de l'électricité générée, mais elles ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année. Elles sont secondées par les cellules à base de silicium polycristallin qui ont un rendement légèrement plus faible mais un coup de revient largement en dessous de celles du silicium monocristallin. En effet cette technologie utilise beaucoup les chutes du silicium de la filière microélectronique et n'en produit que très peu. Ces cellules couvrent une part importante du marché du photovoltaïque. Néanmoins leur utilisation reste très limitée par le prix de revient relativement élevé du watt photovoltaïque.

3. Cellules couches minces

La cherté des cellules de première génération a permis le développement des cellules solaires en couches minces réduisant la quantité du matériau absorbant et donc le coût de revient de l'énergie. Ces composants réalisés sur des couches minces sont connus par les cellules solaires de deuxième génération.

Les cellules couche mince les plus développées utilisent comme matériau de base le silicium amorphe, le Tellurure de Cadmium (CdTe) et le Diséléniure de Cuivre Indium (CIS).

3.1 Silicium amorphe (a-Si)

Le silicium amorphe est une forme non cristalline du silicium. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible). Le compromis est toutefois viable. La fabrication de cellules au silicium amorphe nécessite moins de silicium et moins d'énergie que celle de cellules au silicium cristallin. Donc c'est un matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium mais avec de faibles rendements (5 à 6%) et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement lorsqu'on l'expose au soleil et aux intempéries.

Cependant, des améliorations ont été effectuées à partir de travaux en laboratoire ainsi le rendement augmenté dans certains cas peut aller jusqu'à 11%.

Comparativement aux cellules cristallines, les cellules amorphes sont moins gourmandes en matière première et nécessitent des températures de fabrication nettement inférieures. Malgré le fait que les cellules solaires amorphes souffrent de phénomènes de dégradation (effet Staebler-Wronski) les cellules amorphes suscitent un intérêt grandissant: elles peuvent être déposées sur (presque) n'importe quel type de substrat, y compris des films plastiques. Ces cellules ont généralement été utilisées là où le coût est un facteur limitant ou quand très peu d'énergie est nécessaire (alimentation des montres, calculatrices, luminaire de secours, ornements de façades, etc...). Actuellement elles sont de moins en moins utilisées.

3.2 Tellurure de Cadmium (CdTe)

Ce matériau présente un gap énergétique de 1,45 eV, un fort coefficient d'absorption et constitue de ce fait le matériau idéal pour que la quasi-totalité du spectre solaire soit absorbée sur une très faible profondeur. La plupart des cellules au CdTe utilisent une couche de CdS de type n comme fenêtre d'entrée de la lumière et comme barrière de potentiel (hétérojonction CdS-CdTe). De plus un bon nombre de techniques de fabrication des films se prêtent à une production de masse de ce type de cellules constituant ainsi un autre avantage pour leur développement.

Bien que des rendements atteignant 10% soient atteints, le développement de cette filière est freiné par deux facteurs majeurs, le premier est dû à la forte résistance électrique des films de CdTe de type p qui augmente les pertes résistives et le second est d'ordre environnemental car le cadmium est un métal lourd et donc polluant. La part de marché actuelle des cellules CdTe tourne autour de 0.5% de la production mondiale

3.3 Les cellules CIS et CIGS

Le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), CuInSe_2 , est un matériau composé de type I-III-VI possédant un gap énergétique de 1,02 eV. En y incorporant du Gallium (Ga) et en adaptant la rapport atomique In/Ga on arrive à moduler le gap de 1,02 (pour Ga=0) à 1,68 eV pour la composition CuGaSe_2 . Cette variation du gap permet une meilleure

optimisation de l'absorption du spectre solaire. Ces cellules sont classées parmi les plus efficaces et les plus stables atteignant des rendements de 12,8% pour les modules industriels. Cependant ces cellules, CIGS, sont plus complexes à fabriquer et les techniques de production requièrent de multiples étapes sous vide qui pèsent sur les coûts de production.

4 Cellules multi-jonctions à haut rendement

Une autre catégorie de cellules solaires, utilise un principe innovant du fait qu'elle associe plusieurs jonctions en superposant différents semiconducteurs de largeurs de bandes de plus en plus petites, à mesure qu'on pénètre dans la structure. Ainsi les photons de faible énergie finissent par être absorbés dans les couches inférieures ce qui augmente considérablement les rendements. Ces cellules sont ainsi appelées cellules solaires de hautes performances. Le développement de ces composants est motivé en priorité par les applications spatiales où les performances de la cellule priment sur les coûts de fabrication (alimentation des satellites ou sondes spatiales).

Les premiers travaux ont d'abord porté sur les cellules à double jonction GaAs/GaInP. La première réalisée en GaInP, matériau de gap élevé (1,85 eV) qui absorbe les photons de plus forte énergie, que l'on fait croître sur une autre cellule, fabriquée avec un matériau de gap plus faible comme GaAs (1,45 eV) et qui absorbe les photons d'énergie inférieure. Ensuite sont apparues les cellules triple jonction GaInP/GaInAs/Ge (1.8eV/1.4eV/0.67eV) qui détiennent le record de rendement avec 37.3%. Même si cette architecture optimise l'absorption du spectre solaire, ces composants restent vulnérables aux irradiations rencontrées dans l'espace, milieu de leur utilisation.

Des recherches portant sur l'amélioration des architectures, l'augmentation des nombres de jonction mais surtout sur la fiabilité et la dégradation de ce type de cellules sont engagées dans plusieurs laboratoires.

Les caractérisations sont faites par des techniques électriques ou optiques. On peut citer par exemple les travaux de l'équipe du laboratoire de la matière condensée de la faculté des sciences Mohammedia qui s'est investie dans ce sujet en s'intéressant à la dégradation de ces cellules solaires à partir de mesures de courant et des mesures d'électroluminescence [3-7]. Ces mesures d'électroluminescence constituent un moyen très sensible pour étudier l'évolution des caractéristiques électrique et optiques des matériaux et des composants à base de semiconducteurs. L'équipe Composant et Microélectronique de la FST de Fès et l'équipe de physique des nanostructures de l'ENS de Marrakech œuvrent ensemble pour la mise en point d'un dispositif expérimental de mesure de l'électroluminescence et ont énormément avancé dans la modélisation de ces mesures [8-10]

5. Cellules organiques

La " **Troisième Génération** " de cellules solaires utilise de nouveaux matériaux, en particulier les polymères. Bien qu'encore caractérisées par des efficacités relativement faibles par rapport à leurs équivalents inorganiques, les cellules organiques pourraient

révolutionner le marché du Photovoltaïque grâce à leur faible coût de fabrication et leur facilité d'utilisation (flexibilité, légèreté). La recherche dans ce domaine est extrêmement active depuis plusieurs années et les avancées sont rapides. Les dernières cellules en polymères synthétisés en laboratoire convertissent la lumière avec une efficacité dépassant 5% tandis que les cellules à colorants organiques dites de Grätzel atteignent 10%. Ces développements commencent à attirer l'intérêt des industriels et des entrepreneurs.

5.1 Cellules organiques polymère(s)

Depuis plusieurs années, les matériaux organiques à base d'oligomères ou de polymères conjugués sont beaucoup étudiés pour leurs propriétés optoélectroniques, plus particulièrement pour fabriquer des diodes électroluminescentes organiques (et des afficheurs à écrans plats), mais aussi dans l'optique d'applications photovoltaïques.

Le principe de base des cellules organiques est le transfert photo-induit d'un électron depuis un polymère semiconducteur donneur d'électrons vers un polymère (ou une molécule, comme le fullerène C60) accepteur d'électrons. Les charges doivent ensuite être transportées aux électrodes, et il faut donc que les matériaux utilisés présentent une bonne conductivité. L'un des facteurs limitant ces dispositifs organiques est, la mobilité des porteurs qui reste très faible et limite la conduction du dispositif. Des solutions à tous ces problèmes sont à l'étude en laboratoire. On cherche par exemple à augmenter l'efficacité des cellules en développant des cellules hybrides dans lesquelles on introduit des canaux de conduction en matériau inorganique.

5.2 Les cellules hybrides

Les cellules inorganiques ont un avantage majeur sur les cellules organiques : une mobilité intrinsèque des porteurs de charges largement supérieure, ce qui réduit les pertes de courant par recombinaison. On peut donc penser gagner en rendement en développant des structures hybrides dans lesquelles le transport de charges (et notamment des électrons) est partiellement assuré par un matériau semiconducteur inorganique. Les premiers prototypes utilisent des films nanoporeux de matériaux semi-conducteurs tels que l'oxyde de titane (TiO_2), l'oxyde de zinc (ZnO_2), ou le sulfure de cadmium (CdS) ou des réseaux de nanotubes de carbone mono-paroi, qui forment des nanostructures ordonnées dont on remplit les pores ou espaces libres avec un polymère conjugué. Ce type de structure donne aux porteurs de charge un chemin direct et continu jusqu'aux électrodes. Une autre approche consiste à incorporer dans le polymère des nanoparticules de semi-conducteur (ZnO, CdSe, CdS, CdTe). Outre qu'elles permettent d'améliorer le transport de charges, ces nanoparticules ont une grande efficacité d'absorption optique. L'équipe de physique des nanostructures de l'ENS de Marrakech a énormément avancé dans l'étude théorique des propriétés électroniques et optiques de ces nanostructures semi-conductrices [11-13].

5.3 Les cellules de Grätzel

Les cellules de Grätzel [14], qui portent le nom de leur inventeur suisse, fonctionnent selon un principe différent des cellules inorganiques car elles différencient les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques.

Les cellules de Grätzel sont constituées d'une couche mésoporeuse d'un oxyde semi-conducteur à large gap, le plus souvent l'oxyde de titane (TiO_2) (gap de 3.2eV) immergée dans un électrolyte. Un colorant organique dit le sensibilisateur recouvre la surface des nano-cristaux de TiO_2 et le rend sensible aux photons de longueurs d'ondes situées dans le visible malgré son large gap. Sous illumination, le colorant absorbe les photons incidents et gagne suffisamment d'énergie pour pouvoir injecter un électron dans la bande de conduction du dioxyde de titane, qui migre ensuite dans la couche conductrice de TiO_2 jusqu'à l'électrode collectrice de courant. Ce colorant est ensuite régénéré à l'aide d'une réaction d'oxydo-réduction. La contre-électrode est généralement couverte de platine pour catalyser la réduction de l'électrolyte. Les procédés de fabrication sont relativement simples et n'exigent pas d'importantes installations contrairement aux cellules inorganiques. L'efficacité obtenue est remarquable, le record actuel en laboratoire étant de 10,8% soit plus de deux fois le rendement maximum d'une cellule organique à polymères. Cependant, pour pouvoir devenir réellement compétitives, les cellules de Grätzel devront maintenir des performances stables sur plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années. En effet l'interface solide/liquide des cellules a tendance à se dégrader au fil du temps et des problèmes d'étanchéité se posent. Les chercheurs tentent de remplacer l'électrolyte liquide par un matériau solide, mais les derniers résultats obtenus dans ce sens font état d'une efficacité qui n'atteint que 3-4%. Ces cellules sont sur le point d'être commercialisées.

CONCLUSION

L'énergie solaire connaît un regain d'intérêt, plusieurs gouvernements ont mis en place des programmes pour la recherche et le développement de cette forme d'énergie. L'innovation dans ce domaine passe par une recherche de premier rang, étroitement liée à l'industrie. Bien que les prix des modules en silicium baissent et leurs performances augmentent constamment ceci reste insuffisant pour envisager une utilisation à grande échelle. Un grand espoir est fondé sur le développement des cellules organiques ou des cellules en couches minces. L'émergence récente de ces nouveaux types de cellules a relancé l'espoir de voir un jour émerger une technologie disruptive permettant une baisse drastique du coût du kWh de l'électricité solaire. Cependant il faudra au moins 10 ans avant que les efforts de recherche et développement puissent déboucher sur une telle technologie. Enfin il faut noter que le budget consacré au photovoltaïque reste très faible par rapport aux sommes considérables investies dans les énergies fossiles et nucléaires. Seuls quelques états consacrent des sommes importantes au soutien de la filière. Ce qui manque au Maroc, c'est un programme d'incitations à la recherche fondamentale et appliquée dans ce domaine pour faire réellement décoller le photovoltaïque.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. GRATZEL , Photoelectrochemical cells, Nature, **414**, 338-344, 2001.
- [2] Solar cell efficiency tables (version 27), Martin A. Green, Keith Emery, David L. King, Yoshihiro Hisikawa, Wilhelm Warta, University of New South Wales, Dec. 2005

- [3] M. HADRAMI, L. ROUBI, M. ZAZOUI, J.C. BOURGOIN, Relation between solar cell parameters and space degradation, *Solar Energy Materials and Solar cells* **10**, 1486 -1497, 2006.
- [4] S. MAKHAM, M. ZAZOUI, G.C. SUN and J.C. BOURGOIN, Prediction of proton induced degradation of GaAs space solar cells, *Solar Energy Materials and Solar cells* **10**, 1513 -1518, 2006.
- [5] J. JABBOUR, M. ZAZOUI, G.C. SUN, J. C. BOURGOIN and O. GILARD, Radiation Resistance of GaAs/GaAlAs Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, *J. Appl. Phys.* Feb, 2005.
- [6] S. MAKHAM, M. ZAZOUI, G.C. SUN and J.C. BOURGOIN, Non-empirical prediction of solar cell degradation in space ", *Semicond. Sci. Technol* **20**, 699-704, 2005.
- [7] S.MAKHAM, J. MEZIANE, M. ZAZOUI , J. C. BOURGOIN and R. ADHIRI, Degradation of GaInAs material used in multijunction solar cells: modelization & experiment, *PHYSICAL AND CHEMICAL NEWS*, **16**, 100-103, 2004.
- [8] M. LAHBABI, M. JORIO, A. AHAITOUF, M. FLIYOU, E. ABARKAN, Temperature effect on electroluminescence spectra of silicon p-n junctions under avalanche breakdown condition. *Materials Science and Engineering* **B86**, 96-99, 2001.
- [9] M. LAHBABI, A. AHAITOUF, E. ABARKAN, M. FLIYOU, A. HOFFMANN, J.-P. CHARLES, BHARAT L.BHUVA, S. KERNS, D.V.KERNS JR, Simulation of gallium arsenide electroluminescence spectra in avalanche breakdown using self-absorption and recombination models. *Appl. Phy. Lett.* **80**, 1004-1006, 2002.
- [10] M. LAHBABI, A. AHAITOUF, M. FLIYOU, E. ABARKAN, J.P. CHARLES, A. BATH, A. HOFFMANN, S.E. KERNS, D.V. KERNS, JR. Analysis of electroluminescence spectra of silicon and gallium arsenide p-n junctions in avalanche breakdown. *J. Appl. Phys.* **95**, 1822-1828, 2004
- [11] R. Charrou , M. Bouhassoune , M .Fliyou and al . Binding energy of hydrogenic impurities in polar cylindrical quantum dot . *J.Phys: Condens.Matter_Vol.12* , p.4817(2000)
- [12] N . Es-sbai , M . Fliyou , A. Sali and E. Aberkan. Electron – Confined Longitudinal – Optical phonon interaction and strong magnetic field effects on the binding energy in GaAs quantum wells *Journal of Applied Physics Vol . 91 N° 4* , p. 2093 (2002)
- [13] B. EL Amrani and M. Fliyou . Effects of Confined Longitudinal Optical Phonons on the Exciton Binding Energy in a Cubic Quantum Dot. *Jour. App. Phys. Vol. 94 N° 1*, p. 437 (2003)
- [14] P. Wang, S. M. Zakeeruddin, J. E. Moser, M. K. Nazeeruddin, T. Seguchi and M. Graetzel, nature materials, advanced on line publication, 1-6

SESSION 3
BIOTECHNOLOGIES



ESTABLISHING BIOMATERIALS RESEARCH ACTIVITIES

Gerald G. FULLER

Department of Chemical Engineering, Stanford University, USA
Associate member of the Hassan II Academy of Science and Technology

Abstract

Biomaterial development is an important component of bioengineering. However, the applied biological sciences represent a broad, interdisciplinary field and research activities most often demand collaborations that bring together scientists from a broad spectrum of backgrounds and interests. Fostering and establishing efforts that span conventional departmental structures in our universities is a challenge that is recognized and grappled by most institutions. This paper describes the approach undertaken by Stanford University through its "Bio-X" program. This comprehensive enterprise has successfully accomplished an integration of research in applied and fundamental biology at the University by targeting resources using a strategic combination of funding, building, and billet allocations. This lecture describes the philosophy of this program and highlights its successes and challenges. Since its inception only seven years ago, the Bio-X program has brought together the more than 50 departments in five separate schools at the university to address problems that include biomaterials, systems biology, bioinformatics, biomedical, tissue engineering, regenerative medicine, and drug delivery. As an illustrative example of one such success, a collaborative project involving the author and faculty from the Department of Surgery in the School of Medicine is described. This effort, which is aimed at developing stimulus responsive materials to aid in the process of anastomosis, was made possible through the Interdisciplinary Initiatives Program of Bio-X.

1. INTRODUCTION

Biomaterial development is a broad interdisciplinary area within the general discipline of bioengineering. Indeed, because the range of research activities into new biomaterials is so far-reaching, this paper will not attempt to review the many different and exciting possibilities in materials design. Rather, the challenge of organizing effective research programs in biomaterials that properly bring diverse communities together to address important applications will be discussed. This will be accomplished by describing one successful effort: the Stanford University Bio-X program. This campus-wide enterprise was initiated in 1998 with a desire to engage the many parties at the University with a stake in applied and fundamental research in biology and medicine. The principal philosophies, goals, and strategies of Bio-X will be described along with a description of one example of a successful collaborative project growing out of the program.

2. FOSTERING COLLABORATIVE RESEARCH IN THE LIFE SCIENCES

The primary resources required to bring people across a university to engage in common purposes are well-understood. These are buildings, faculty billet allotments, and budget assignments. The Bio-X program at Stanford has access to all three of these elements. These resources are brought together to achieve the principal goals of the program: (1) imaging and simulating life from molecules to mind, (2) restoring the health of cells and tissues, (3) decoding the genetics of health and disease, and (4) designing therapeutic devices and molecular machines. Allocation of these resources is governed by the following foundational principals:

- Give students new opportunities,
- Support existing graduate student programs,
- Include all faculty who want to participate,
- Ignore traditional scientific boundaries,
- Emphasize people over instrumentation,
- Avoid top-down designation of research goals.

The most visible evidence of this commitment to collaborative education and research in biological science and engineering is the Clark Center, with 146,000 square feet of laboratory, office, and lecture hall space. This facility houses 43 faculty members that represent departments within the three Schools of Medicine, Science, and Engineering. Indeed, the Center also houses the Department of Bioengineering, which is jointly administered by the Schools of Medicine and Engineering. Having a department directly affiliated with two separate Deans is a new challenge for Stanford, but it has brought significant, new opportunities and synergisms. In addition to housing these faculty members, the Center contains central facilities that are essential to the conduct of multidisciplinary research. These include large scale computing facilities and imaging laboratories. However, Bio-X is a broad affiliation representing a number of faculty members that far exceeds the 43 persons housed within Clark. Indeed, hundreds of Stanford faculty members from more than 50 departments have applied for membership within the program.

Also existing within the Clark Center is “hotel space” consisting of 65 bright yellow, three-foot benches that are provided to researchers for temporary occupancy. These benches facilitate a close proximity in collaborative research projects as new ideas are incubated and launched. All Stanford faculty affiliated with Bio-X are able to apply to utilize hotel space.

Financial resources are also an essential to foster interdisciplinary research. New collaborations between researchers from diverse backgrounds often require seed funding to establish working relationships. This can be particularly true in bioengineering applications where many groups with the capabilities of making important contributions face the difficulty of not having the background to properly communicate across boundaries separating disciplines. In the case of my own group in chemical engineering, our knowledge of interfacial transport phenomena and rheology can certainly be important to biological processes, but without a background in the applied life sciences, it is often difficult to

recognize where to apply one's expertise. This limitation is addressed within the Bio-X program through its "Interdisciplinary Initiatives Program". This is a source of two-year funding opportunities to enhance interdisciplinary programs among the scientific communities at Stanford in computer science and technology, engineering, the basic sciences, the earth sciences, and pre-clinical and clinical sciences in the School of Medicine. Since the purpose of this funding is to foster new, collaborative projects, successful applications for these resources must forge research between groups coming from distinctly different departments within the University. If the groups are already collaborating, the proposal must establish a new avenue of research instead of extending an existing line of study. Since 1999, more than 64 proposals have been funded for \$9M to establish 64 teams involving more than 162 Stanford faculty members. These researchers come from 49 departments and 5 different schools. This has been a very productive effort resulting in more than 119 published manuscripts and 7 patents filed. Importantly, the initial funding of \$ US 6M has translated into \$ US 62M from external funding sources with an additional \$ US 80M in large "team grants" for a total of \$ US 142M.

3. EXAMPLE OF COLLABORATIVE RESEARCH IN BIOMATERIALS

Recently, a collaboration was established between the Fuller group in chemical engineering and the group of Professor Gurtner in the Department of Surgery. The new joint effort entitled "Surgical Anastomosis using Phase Reversible Gels" is aimed at developing new, biocompatible polymer materials that will facilitate the joining of veins and arteries and is funded by the Interdisciplinary Initiatives Program of Bio-X. Anastomosis is one of the most frequently encountered tasks in surgeries and is defined as the union of hollow organs (blood vessels and parts of the intestine, for example). The standard practice follows the technique established by Alexis Carrel in 1902 whereby sutures are applied around the perimeter defined by the joint. However, there are problems associated with this approach that are addressed by the proposed research. First, the skill required to join very small vessels can be formidable and current practice places a lower limit on the vessel diameter of approximately 1 mm. In addition, as the population ages due to lengthened longevity, brittle blood vessels are often encountered that cannot accommodate piercing by surgical needles. Furthermore, the very act of installing sutures necessarily causes tissue damage that can lead to stenosis after the joint has healed. Finally, a surgeon is faced with the difficult task of handling very pliable, soft tissues that are easily collapsed. The very act of applying sutures can easily close the very openings that are being manipulated.

The Fuller/Gurtner collaboration is centered upon the formulation of a phase reversible polymer gel that can transition from a liquid state to a gel state. A number of external stimuli have been explored with the majority of work focused on the use of thermo-reversible materials. In this case, an increase in temperature induces a liquid-to-gel transition and the ultimate gel state has a mechanical modulus that is sufficiently high to stabilize the geometry of the hollow tubes that are to be joined.

Furthermore, the use of the gel allows the anastomosis to be accomplished using surgical adhesives, thereby avoiding the use of sutures. The biomaterial research has focused on

creating a formulation that is properly biocompatible and where the liquid-to-gel transition occurs in the vicinity of physiological conditions.

This new method of performing anastomosis procedures has proven to be extremely successful. Compared with standard suturing methods, where a single procedure can take 45 minutes to join 1 mm diameter vessels, this technique can accomplish the joining in about 3 minutes. Furthermore, the absence of suture damage means much less stenosis and higher fluid flow.



Pr. Gerald Fuller, Stanford University - USA, membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Panorama du marché de la biotechnologie au Maroc et piste de développement



Aymen CHEIKH LAHLOU

Directeur Général
Cooper Maroc Pharmaceuticals

1 Doc.T5170107

Eléments de contexte

- Le Maroc est un des marchés africains les plus importants mais il reste limité par rapport aux pays européens ou nord américains .
- Nous représentons à peu près le 1/40 du marché Français.
- Nous représentons une région à potentiel limité.
- Cooper Maroc et l'industrie pharmaceutique locale sont ouverts à toute forme de collaboration - réaliste-: **synergie Industrie- Université- capital**

2

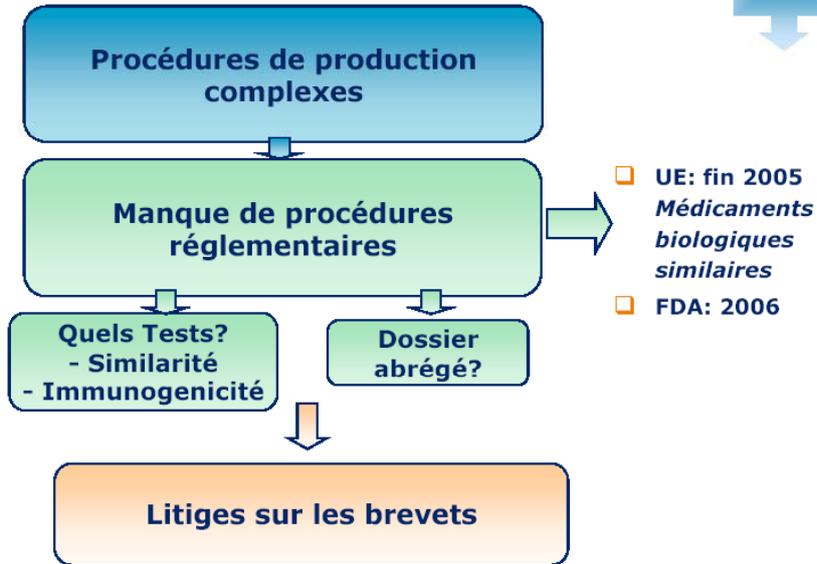


Biothérapie

■ **Définition :** Utilisation des produits de biotechnologie pour le diagnostic ou le traitement des maladies

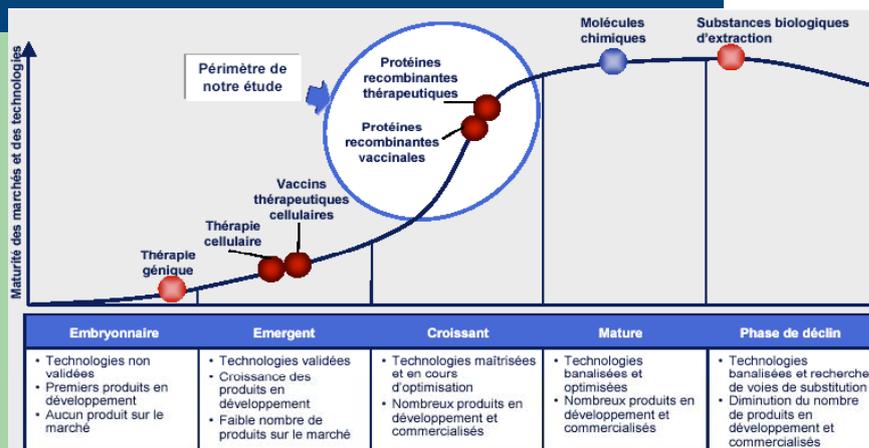
- Corriger les déficits de substances endogènes
- Stimuler les processus physiologiques naturels
- Bloquer les protéines ou les acides nucléiques non fonctionnels

Il existe des barrières certaines



ims

Le marché biopharmaceutique mondial



7

Arthur D Little

Comité biotechnologies du Loom - 28 novembre 2005

Les principaux bio médicaments

- Eprex: en régression
- Aranesp: EPO retard évolution remarquée
- Mabthera , Avastin:

Chimiothérapie ciblée un énorme chiffre d'affaire et une évolution certaine

Le nombre de bio médicaments dans la catégorie des blockbusters s'accroît avec 11 produits ayant dépassé le milliard de dollars en 2004

8



Les principaux bio médicaments

En 2004, 11 biomédicaments étaient des blockbusters...

Produit	Rang	Ventes mondiales 2004 (Million)	Croissance 2003-2004
Procrit / Eprex	1	3 589	- 9,9 %
Mabthera / Rituxan	2	3 355	+ 30,5 %
Aranesp	3	3 068	+ 104 %
Epogen	4	2 648	+ 10,3 %
Enbrel	5	2 455	+ 88 %
Neulasta	6	2 063	+ 53 %
Avonex	7	1 519	+ 30 %
Avastin	8	1 236	Lancé en février 2004
Neupogen	9	1 194	- 9 %

9



Les principaux bio médicaments

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Eprex: EPO alpha• Recormon: interféron• Neupogen: filgrastim | <ul style="list-style-type: none">• Aranesp• pegasys : peg interféron• neulesta |
|--|---|

1^{ère} génération

2^{ème} génération

10



Au Maroc

- Faible pouvoir d'achat: le marocain consomme 200 DH de médicaments par an!
- Contexte économique particulier: sensibilité extrême au coût du traitement

11



Au Maroc

- Les produits de biotechnologie de l'industrie pharmaceutique s'adresse à des maladies relativement rares ce sont ce qu'on appelle des produits de niches
- Des produits qui s'adressent essentiellement à l'oncologie et à la virologie (hépatite B et C).
- En terme d'unités ces produits sont loin des quantités industrielles – en l'état actuel des choses- qui permettrait d'envisager une production locale du moins à l'étape de remplissage.

12



Molécules

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Néphrologie: <ul style="list-style-type: none"> - Molécule de 1ère génération: EPO - Molécule de 2ème génération: - Darabapoetine alpha | <ul style="list-style-type: none"> • Virologie: <ul style="list-style-type: none"> - Molécule de 1ère génération interféron - Molécule de 2ème génération pegintérféron |
|---|---|

*Cancérologie: rituximab
filgrastim
Le Pegfilgrastim lancé en Occident*

13



Les érythropoïétines au Maroc

Specialités	DCI	laboratoires
EPREX	alpha poetine	J CILAG
RECORMON	beta poetine	ROCHE
ARANESP	darbapoetine	Amgen Sothema
EPOTIN	alpha poetine	julphar
EPO MAYNE	alpha poetine	Mayne Afrique Phar

14



Autres produits biotech sur le marché marocain

specialités	DCI	laboratoires
Neupogen	Filgrastim	ROCHE
MABTHERA	Rituximab	ROCHE
RECORMON	Intérféron	ROCHE
PEGASYS	Peginterferon	ROCHE
METALYSE	Tenecteplase	Bohringer Ingelheim BOTTU

Ce sont des produits importés
les firmes locales assurent uniquement
et la distribution et la promotion

15



Perspectives

- Ce sont des quantités qui ne permettent pas d'envisager une production industrielle
- Une éventuelle croissance de ce marché - toutefois attendue- permettrait dans un premier temps de délocaliser l'ultime étape de fabrication...

**Un transfert de technologie
accroître nos connaissances
point de départ**



16

Perspectives recherche et développement

- Actuellement et à notre connaissance il n'y a pas de programme de recherche et de développement à proprement dit dans le domaine de la biotechnologie pharmaceutique au Maroc?
- projet pilote:
 - Proteina SA
 - Hybrida A suivre...!



17

Zoom sur un bio génériqueur régional

Bio Mena Tunisie

18



Bio Challenge

- Le projet, amorcé en 2003, est un investissement de quelque 48 millions USD qui proviennent de banques nord-africaines et européennes ainsi que d'investissements privés de la Tunisie et des régions environnantes.
- Grâce à la technologie de pointe de ProMetic (canada) dont elle détient la licence exclusive, Bio Mena sera en mesure de produire des bio médicaments répondant à de très hauts standards de qualité et de les commercialiser localement, dans les pays de la MENA et dans certaines régions de l'Europe de l'Est, et ce, à des prix hautement compétitifs

19

Plus de 80 % à l'export!



Une unité basé sur le transfert de technologie

Etablie à Montréal, ProMetic Sciences de la Vie inc. est une société biopharmaceutique spécialisée dans la recherche, le développement, la fabrication et la commercialisation d'un éventail d'applications commerciales tirées de sa technologie facilitante exclusive, Ligand Mimetic.

La Société met également le potentiel de sa technologie au service de ses activités de découverte de médicaments, en remplaçant des protéines complexes et coûteuses par des composés mimétiques synthétiques. ProMetic possède des installations de R & D et de fabrication au Royaume-Uni et des activités de développement aux Etats-Unis, en Asie et dans les pays du Moyen-Orient et Afrique du Nord.

20



Un exemple de bio parc

- Depuis 2000, Singapour a placé les domaines des biotechnologies et des sciences biomédicales au coeur de sa stratégie de développement, la ville-état y voyant une manière d'assurer la pérennité de son modèle économique.

21



Un exemple de bio parc

- La production totale de l'industrie des sciences biomédicales de Singapour a atteint les 12 milliards de dollars singapouriens en 2004 (dont 80 % provenant de l'industrie pharmaceutique). Le secteur économique emploie plus de 7600 personnes.

22



Un exemple de bio parc

- L'Economic Development Board, chargé d'attirer les entreprises et capitaux étrangers à Singapour, est fortement impliqué dans le soutien aux entreprises pratiquant la recherche en cellules souches. Il aide les entreprises biomédicales à se développer et participe à la recherche privée en cellules souches.

24





NEW TRENDS IN MEDICAL BIOTECHNOLOGY: CURRENT SITUATION IN DEVELOPED AND DEVELOPING COUNTRIES

Abdelali HAOUDI

East Virginia Medical School, Virginia, USA
Corresponding member of the Hassan II Academy of Science and
Technology

When the Human Genome Project completed the first draft of all human genes, the stage was set for great advances in medicine and biotechnology applications. First, scientists would more quickly identify the genes that foster common diseases and people would start having their genomes analyzed early in life to reveal their risks. Then, armed with that information, we would all adopt lifestyles -maybe even take medicines- tailored to our own needs «personalized genomics or medicine». This enthusiasm was even enhanced by the promises that new combinations of genomic, proteomic and bioinformatics research will provide deeper insights into disease mechanisms, novel markers for diagnostics, new molecular targets for therapeutic intervention and for new drug discovery. The field is being driven forward both by innovative biotechnology companies and by academicians who are introducing the technology required for the parallel identification of individual proteins. This presentation will shed some light on the current innovative approaches in functional genomics, proteomics, stem cells and medical nanotechnology, their biotechnology applications and prospects for Morocco to be positioned on the map of world leaders in developing new insights into human health and its translation into preventive medicine.

Content

- Translational Medicine and Therapeutics
 - Genomics, Proteomics & Bioinformatics: *Proteomics Microarrays*
 - Other functional Genomics Approaches: *siRNA*
 - HAPMAP
 - Stem cells
 - Medical Nanotechnology
- Biotechnology
- Developed countries
- Developing countries
- Prospects for Morocco

Economic Return on Investment for Biomedical Research

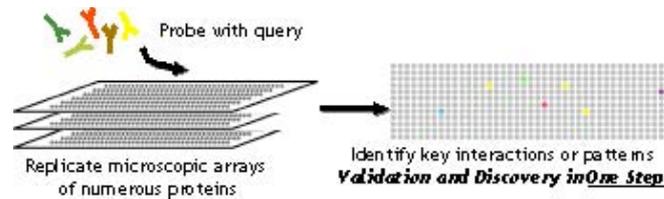
Annual historical financial gain	\$2.8 trillion
Annual historical contribution to reduced mortality in heart disease	\$1.5 trillion
Economic return for every dollar invested in research	\$80.00
Net worth of 1% reduction in the mortality from cancer	\$500 billion
Economic value of curing heart disease	\$48 billion
Economic value for eliminating deaths from cancer	\$47 trillion

1. THE TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICATIONS

- Bioprocessing Technology: antibiotics, birth control pills, amino acids, vitamins, etc
- Monoclonal Antibodies: powerful diagnostic tools, therapeutic compounds.
- Cell Culture: therapies based on adult stem cells, embryonic stem cells
- Recombinant DNA Technology: Produce new medicine and safer vaccines, treat some genetic diseases, control viral diseases, etc.
- Cloning: Artificial embryo twinning, somatic cell nuclear transfer
- Protein Engineering: drug development, vaccines, etc
- Biosensors: detecting devices that rely on the specificity of cells and molecules to identify and measure substances at extremely low concentrations.
- Nanobiotechnology: powerful disease diagnostics, getting functional molecules into cells, improving drug delivery, etc
- Microarrays: DNA, protein, tissue, whole cell, small molecules microarrays.

2. HEALTH-CARE APPLICATIONS

- Diagnostics
- Therapeutics
- Personalized Medicine
- Regenerative Medicine
- Vaccines
- Plant-made Pharmaceuticals



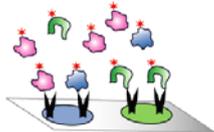
Protein Microarrays

3. FUNCTIONAL PROTEOMICS: PROTEOMICS MICROARRAYS

Applications of Protein Microarrays

- Abundance – Measure the relative abundance of biomolecules
- Drug selectivity – Which kinases are bound by candidate inhibitor?
- Unintended drug targets – Which unintended proteins bind to drug?
- Enzyme substrate identification – Which proteins are ubiquitylated?
- Protein-protein interactions – whole proteins or domains
- Protein mutational analysis – Which protein domains are key for function?
- Biomarker discovery – which antigens recognized by autoantibodies?

Direct labeling



Advantages/Disadvantages

- +Assay multiple samples simultaneously
- +Compare two states with different color labels
- Requires chemically modifying sample
- Cross reactive ASRs give false reading

Sandwich immunoassay



- +Avoids labeling sample
- +Increased specificity using two ASRs
- Requires two ASRs for each target
- More difficult to multiplex

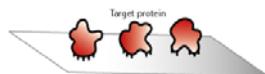
Reverse phase blot



- +Rapid screen of many samples
- Cross reactive ASRs give false reading
- Narrow dynamic range
- Rare proteins may not be captured

Abundance based arrays

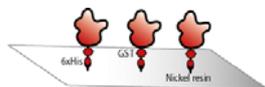
Chemical linkage



Advantages/Disadvantages

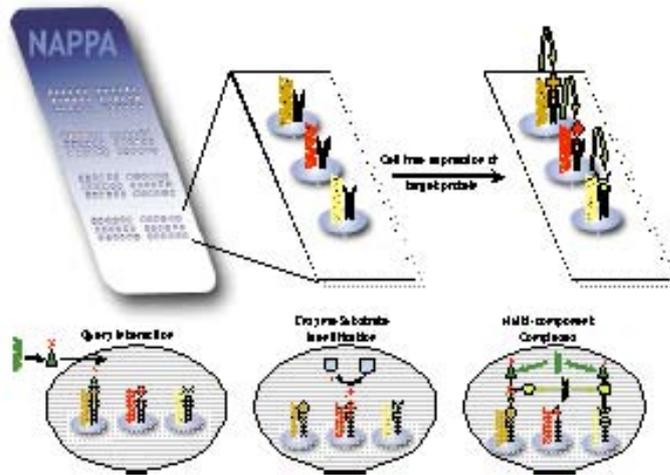
- +Random orientation
- +Covalent binding
- Bound close to surface
- Chemical linkage may affect folding

Peptide fusion tag



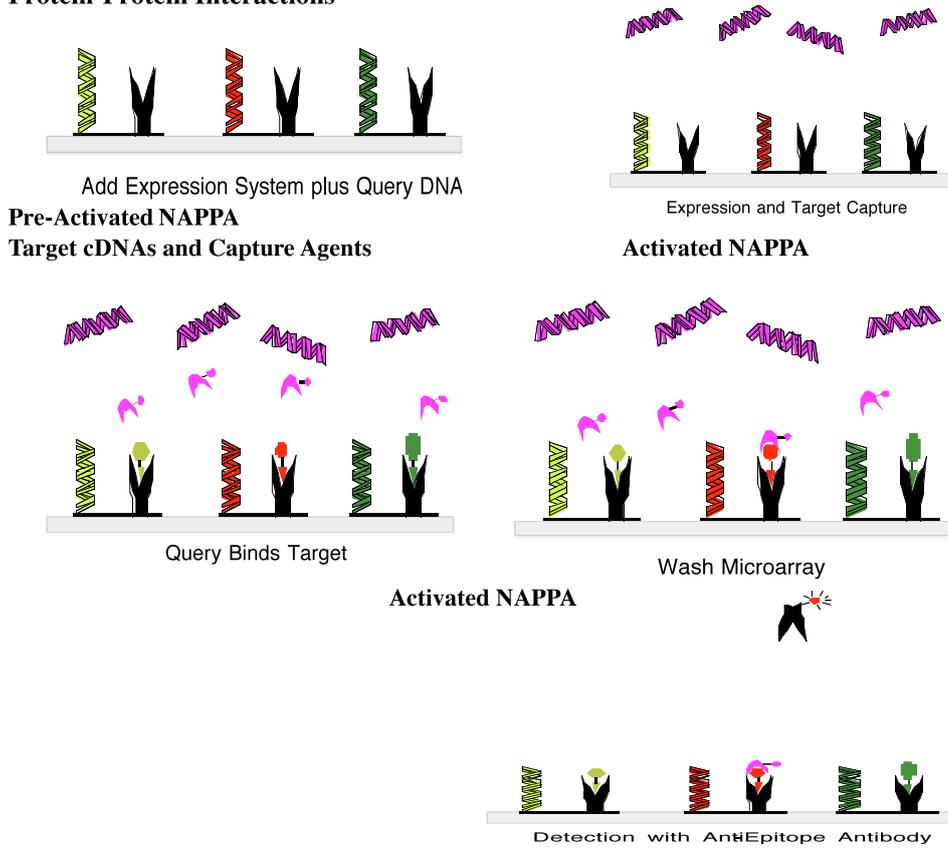
- +Uniform orientation
- +Protein held away from surface
- N- or C-terminus always blocked
- Proteins must be tagged

Target protein arrays

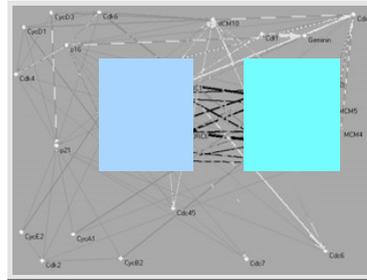


Nucleic Acid Programmable Protein Array

Protein-Protein Interactions

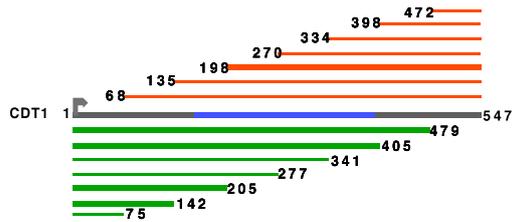


Studying Protein Domains



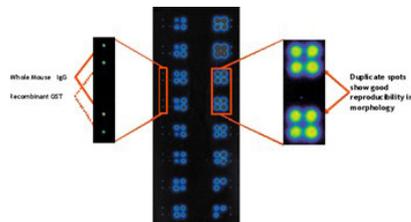
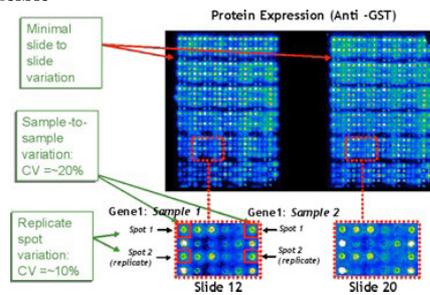
- 1000 potential interactions interrogated
- 110 interactions observed
- 85% of all known binary interactions were detected
- 65 novel interactions identified
- All interactions exhibited expected selectivity

Proteins Interaction Map



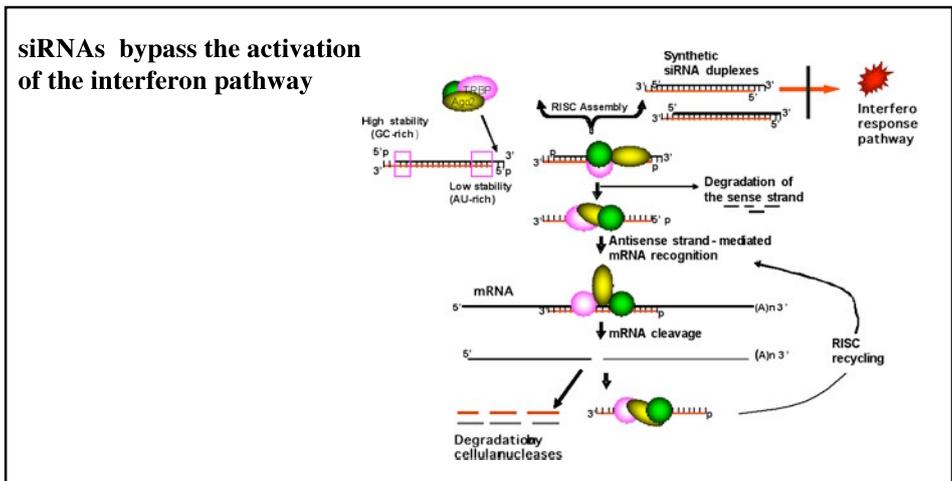
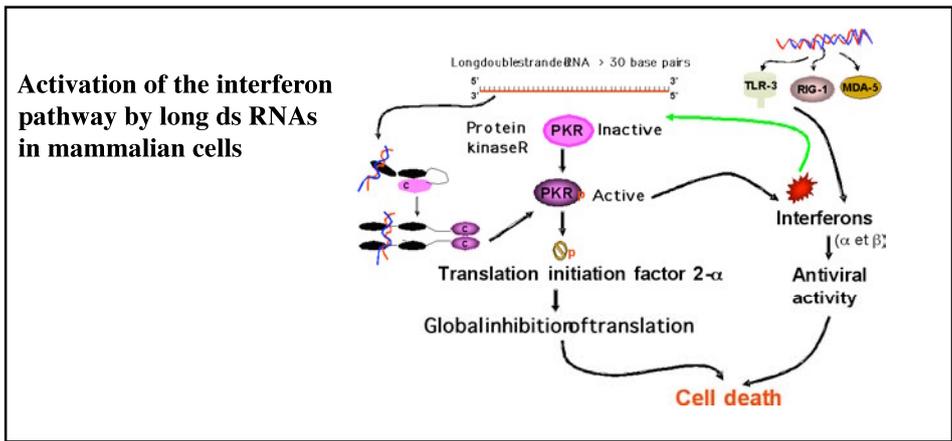
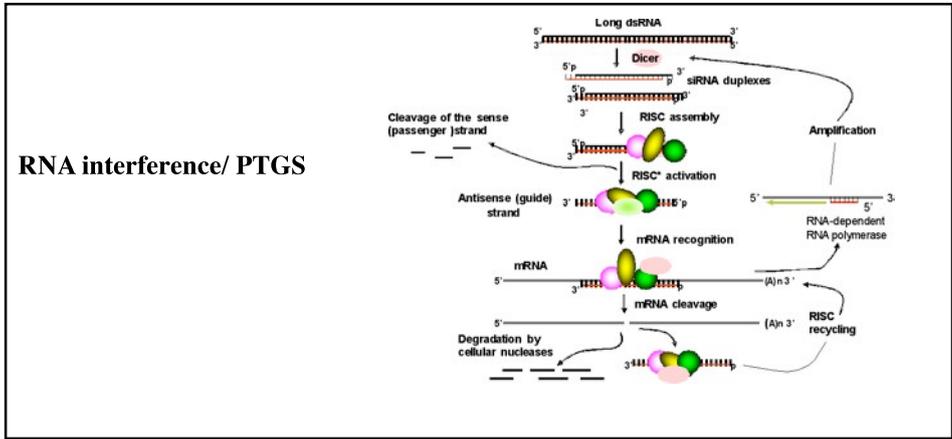
Identify binding domains of Geminin to Cdt1?

NAPPA is Highly Reproducible

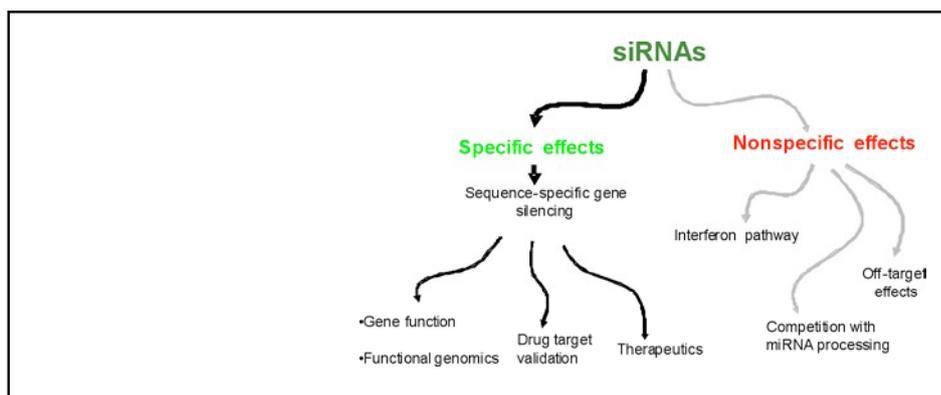
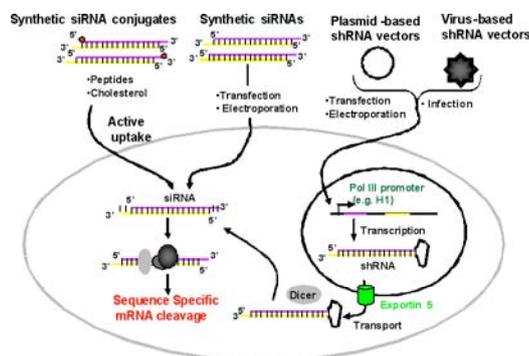


Features of NAPPA

4. OTHER FUNCTIONAL GENOMICS APPROACHES: SIRNA



Basic Delivery Strategies into Mammalian Cells



5. HAPLOTYPE MAP

5.1. Description

- The HapMap is a catalog of common genetic variants that occur in human beings.
- HAPMAP provides:
 - Description of these variants
 - Their location in DNA
 - Their distribution among people within populations
 - Among populations in different parts of the world
- The project is not using the information in the HapMap to establish connections between particular genetic variants and diseases.

5.2. HAPMAP Objectives

- Five countries (Canada, China, Japan, Nigeria, the United Kingdom and the United States) contributed \$138 Million to fund the International HapMap Project (www.hapmap.org).

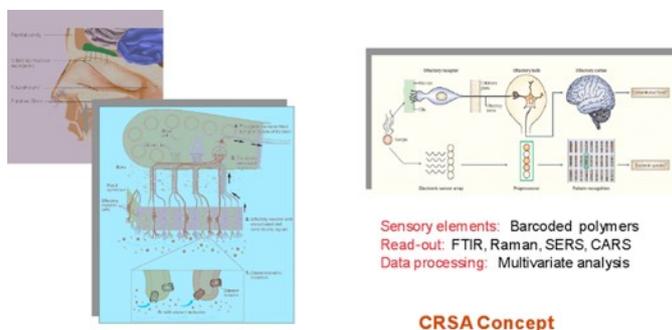
- Goal: will benefit human health by providing an extensive resource that researchers can use to discover the genetic variants involved in disease and individual responses to therapeutic agents
- The HapMap is now being used for:
 - To find genetic variants behind common diseases,
 - To examine the genome's architecture,
 - To study natural selection.
- The final version is slated to include more than 4.5 million single-nucleotide polymorphisms (SNPs).

6. MEDICAL NANOTECHNOLOGY

- Nanomedicine: the monitoring, repair, construction and control of human biological systems at the molecular level, using engineered nanodevices and nanostructures.
- A sample list of areas covered by and converged with nanomedicine include: Biotechnology, Genomics, Genetic Engineering, Cell Biology, Stem Cells, Cloning, Prosthetics, Cybernetics, Neural Medicine, Dentistry, Cryonics, Veterinary Medicine, Biosensors, Biological Warfare, Cellular Reprogramming, Diagnostics, Drug Delivery, Gene Therapy, Human Enhancement, Imaging Techniques, Skin Care, Anti-Aging.
- The National Science Foundation estimates that by 2015 the market for nanotech products could exceed \$1trillion.

6.1. Applications of Medical Nanotechnology

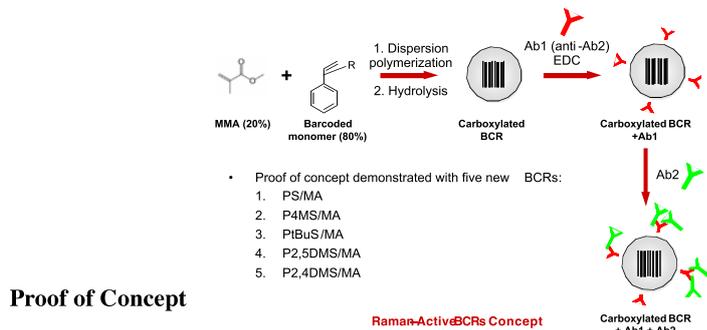
- **Drug Delivery:** optimize the delivery of pharmaceutical products
- **Drug Encapsulation:** Protecting drugs as they are delivered through the body (liposomes and polymers).
- **Drug Discovery:** nanotechnologies in combination with combinatorial chemistry, computational biology, computer-aided drug design, data mining, and data processing tools are being explored as new ways in increasing the discovery and the development of new drugs.
- **Implantable Materials and Tissue Repair:** new generation of biocompatible nanomaterials for repairing and replacing human tissues.
- **Bioresorbable Materials:** used in degradable medical applications like sutures and orthopedic fixation devices. Bioresorbable implants will biodegrade and do not have to be removed manually.



- **Smart Materials:** nanomaterials that respond to changes in temperature and other changes in the environment (artificial muscle with greater mechanical strength and flexibility).
- **Implantable Devices:** can provide early detection and even initiate timely treatment with a higher chance of success before damage occurs.
- **Sensors:** to continuously monitor key body parameters including pulse, temperature and blood glucose (chemotherapy with sensors programmed to dispense precise amounts of medication at the right times; powerful devices to restore lost vision and hearing functions).
- **Smart Instruments:** Surgical tools such as scalpels, forceps, grippers, retractors and drills are being embedded with miniature sensors to provide real-time information and added functionality to aid surgeons
- **Robotics:** Robotic surgical systems are being developed to provide surgeons with unprecedented control over precision instruments
- **Other Applications:** New imaging technologies, Nanoprobes can be used with MRI

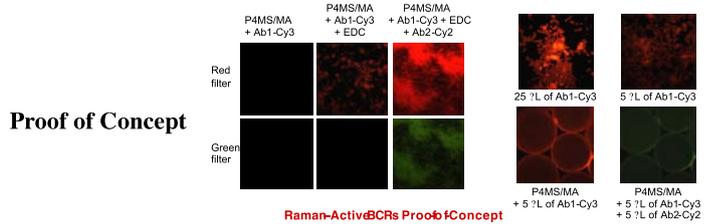
6.2. Application to Nanoarrays: Proteomics

The cross reactive sensor arrays operate like an olfactory system. They are devices composed of an array of independent, semi-selective and reversible sensory elements, the output of which is analyzed by some form of pattern recognition algorithm.



Proof of Concept

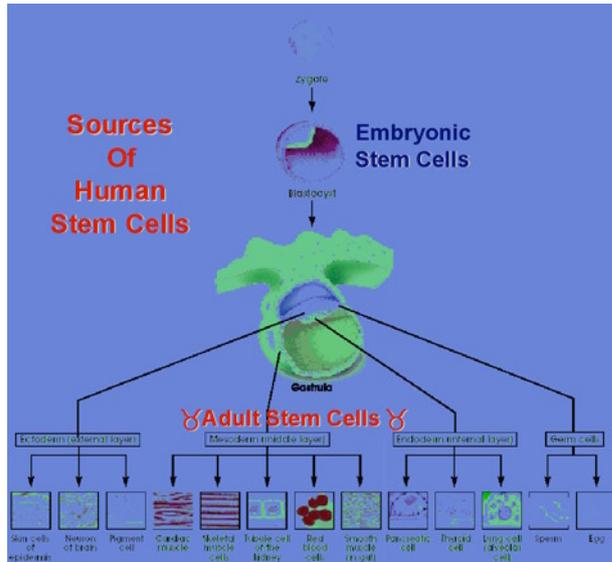
Ab1-Cy3 (1.5 mg/mL); Donkey IgG raised against rabbit IgG, conjugated with Cy3 (orange)
Ab2-Cy2 (1.5 mg/mL); Rabbit IgG conjugated with Cy2 (green)



7. STEM CELLS

Sources of Human Embryonic Stem Cells

- *In vitro* Fertilization (IVF)
 - sperm + egg = IVF embryo (complete nucleus)
 - IVF embryo fi *dissociate* = ES cell culture (PGD Approach?)
- Somatic Cell Nuclear Transplantation (SCNT): “Therapeutic Cloning”
 - egg - incomplete nucleus = enucleated egg
 - enucleated egg + complete nucleus = cloned embryo
 - cloned embryo fi *dissociate* = ES cell culture

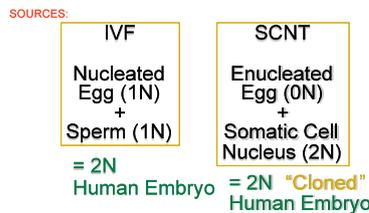


- Genetically-engineered SCNT - Defective Embryos
 - “Altered Nuclear Transplantation;” “Oocyte-Assisted Re-programming”

© 2001 Terese Winslow, Caitlin Duckwall

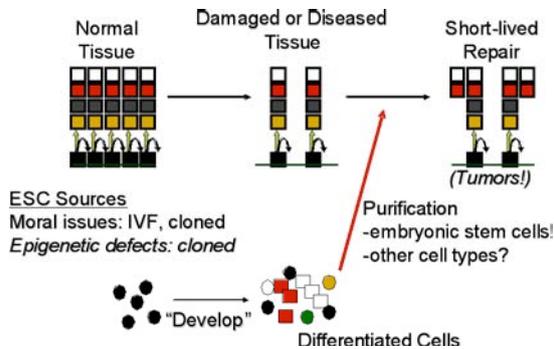
- Human-Animal Chimera Embryos (Human DNA)

Cell Therapy with Embryonic Stem Cells



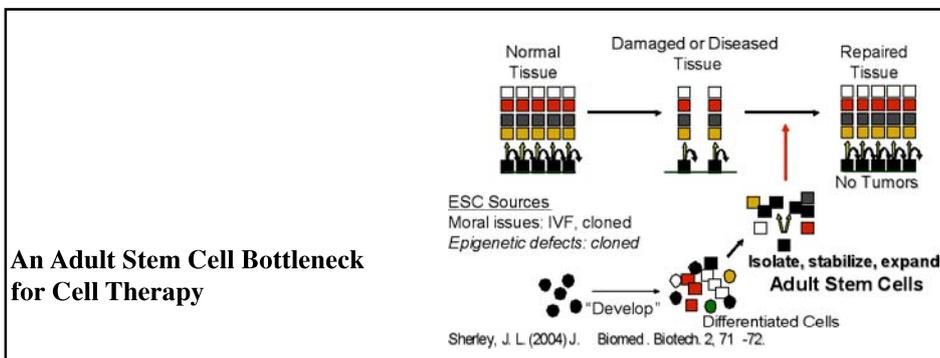
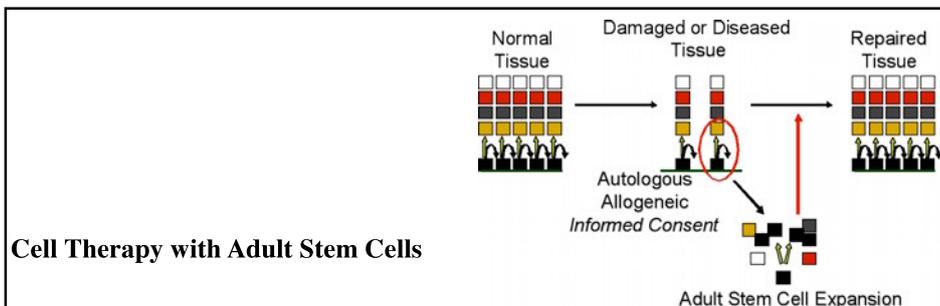
Epigenetic Defects

Cell Therapy with Embryonic Stem Cells



Therapeutic Targets for Adult Stem Cell-Based Biomedicine

<ul style="list-style-type: none"> • Bone Marrow <ul style="list-style-type: none"> - cancer - blood formation diseases - gene therapy (HSC-targeted) • Bone and cartilage: <ul style="list-style-type: none"> - regeneration - grafts • Pancreas: <ul style="list-style-type: none"> - diabetes • Brain: <ul style="list-style-type: none"> - neurodegenerative diseases 	<ul style="list-style-type: none"> • Liver <ul style="list-style-type: none"> -liver cell replacement (Also ADMET) • Skin: <ul style="list-style-type: none"> - skin grafts - hair replacement • Muscle: <ul style="list-style-type: none"> - muscular dystrophy
--	--



CLEAR DILEMMAS

- **Moral**
 - Human embryos are living human beings.
 - Shall we destroy them for the potential gain of others?
- **Ethical**
 - Human embryos cannot consent to their sacrifice.
 - Egg donor recruitment and treatment “Fetal-farming” for eggs
- Are the promises of human embryonic stem cell research valid, plausible?

8. BIOTECHNOLOGY IN DEVELOPED AND DEVELOPING COUNTRIES: SOME PERSPECTIVES

8.1. Biotechnology: Historical Facts

• 4000–2000 B.C.

- Biotechnology first used to leaven bread and ferment beer, using yeast (Egypt).
- Production of cheese and fermentation of wine (Sumeria, China and Egypt).
- Babylonians control date palm breeding by selectively pollinating female trees with pollen from certain male trees.

• 500 B.C. :First antibiotic: moldy soybean curds used to treat boils (China).

• AD: Before the 20th Century

- 1322 An Arab chieftain first uses artificial insemination to produce superior horses.
- 1802 The word «biology» first appears.
- 1830 Proteins are discovered.
- 1833 The cell nucleus is discovered. The first enzymes are isolated.
- 1855 The *Escherichia coli* bacterium is discovered. It later became a major research, development, and production tool for biotechnology.

• AD: First Half of the 20th Century

- 1902 The term «immunology» first appears.
- 1906 The term «genetics» is introduced.
- 1907 The first *in vivo* culture of animal cells is reported.
- 1909 Genes are linked with hereditary disorders.
- 1911 The first cancer-causing virus is discovered by Rous.
- 1914 Bacteria are used to treat sewage for the first time in Manchester, England.
- 1915 Phages, or bacterial viruses, are discovered.
- 1919 The word «biotechnology» is first used by a Hungarian agricultural engineer.
- 1938 The term molecular biology first coined
- 1941 The term *genetic engineering* is first used, by Danish microbiologist A. Jost.

8.2. Industrial Biotechnology: From 1970s

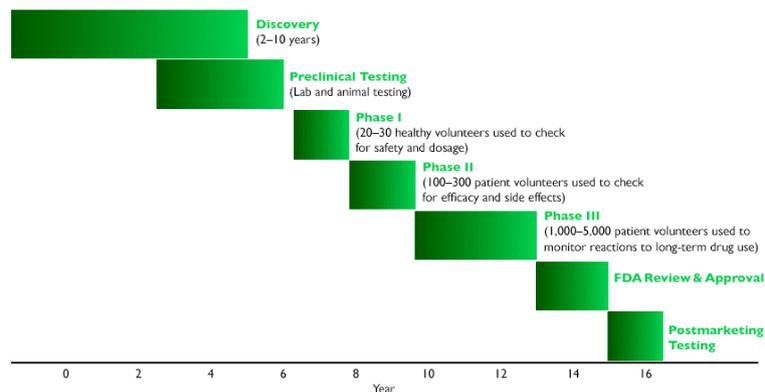
- 1976 The modern biotechnology industry was born about 31 years ago, with the founding of Genentech in April 1976.
- 1979 The first monoclonal antibodies are produced.
- 1982 Humulin, Genentech's human insulin drug produced by genetically engineered bacteria for the treatment of diabetes, is the first biotech drug to be approved by the Food and Drug Administration.
- 1986 The first biotech-derived interferon drugs for the treatment of cancer, Biogen's Intron A and Genentech's Roferon A, are approved by the FDA
- 1989 Amgen's Epogen is approved for the treatment of renal disease anemia.
- 1991 Amgen develops Neupogen, the first of a new class of drugs called colony stimulating factors, for the treatment of low white blood cells in chemotherapy patients.
- Immunex's Leukine, used to replenish white blood counts after bone marrow transplants, is approved.
- Genzyme's Ceredase is approved for the treatment of Gaucher's disease.

- **1993** Chiron's Betaseron is approved as the first treatment for multiple sclerosis in 20 years.
- **1996** Biogen's Avonex is approved for the treatment of multiple sclerosis. The company builds a \$50 million plant in Research Triangle Park, N.C., to manufacture the recombinant interferon drug.
- **2004** The FDA approves the first anti-angiogenic drug for cancer, Avastin (bevacizumab).
- The FDA clears the first DNA microarray test system, the AmpliChip Cytochrome P450 Genotyping Test, to aid in selecting medications and disease for a wide variety of common conditions.
- An RNA-interference product for age-related "wet" macular degeneration becomes the first RNAi product to enter a clinical trial.
- First cloned pet, a kitten, delivered to its owner.
- **2005** At Harvard University report success in converting skin cells into embryonic stem cells through fusion with existing embryonic stem cells.
- **2006** The NIH begins a 10-year, 10,000-patient study using a genetic test, that predicts breast-cancer recurrence and guides treatment. The genetic test, Oncotype DX™ was developed by the biotech company Genomic Health and is already commercially available.

9. OTHER BIOTECHNOLOGY APPLICATION AREAS

- **Environmental biotechnology** products make it possible to clean up hazardous waste more efficiently by harnessing pollution-eating microbes without the use of caustic chemicals.
- **Industrial biotechnology applications** have led to cleaner processes that produce less waste and use less energy and water in such industrial sectors as chemicals, pulp and paper, textiles, food, energy, and metals and minerals. For example, most laundry detergents produced in the United States contain biotechnology-based enzymes.
- **DNA fingerprinting**, a biotech process, has dramatically improved criminal investigation and forensic medicine, as well as afforded significant advances in anthropology and wildlife management.

10. BIOTECHNOLOGY DRUG DEVELOPMENT PROCESS



11. BIOTECHNOLOGY IN DEVELOPED COUNTRIES: INDUSTRY FACTS

- Revenues of publicly traded biotech companies worldwide grew 18 percent in 2005 to US\$63.1 billion, an all-time high in the sector's 30-year history,
- Biotechnology is a \$30 billion a year industry that has produced some 160 drugs and vaccines.
- There are more than 370 biotech drug products and vaccines currently in clinical trials targeting more than 200 diseases, including various cancers, Alzheimer's disease, heart disease, diabetes, multiple sclerosis, AIDS and arthritis.
- Biotechnology is responsible for hundreds of medical diagnostic tests that keep the blood supply safe from the AIDS virus and detect other conditions early enough to be successfully treated. Home pregnancy tests are also biotechnology diagnostic products.
- Genetic engineering is sweeping the world's farms. Seven million farmers in 18 countries grew genetically engineered crops on 16.72 million acres last year.
- Consumers already are enjoying biotechnology foods such as papaya, soybeans and corn. Hundreds of biopesticides and other agricultural products also are being used to improve our food supply and to reduce our dependence on conventional chemical pesticides.

12. BIOTECHNOLOGY IN THE US

- As of Dec. 31, 2005, there were 1,415 biotechnology companies in the United States, of which 329 were publicly held.
- Market capitalization, the total value of publicly traded biotech companies (U.S.) at market prices, was \$410 billion as of Dec. 31, 2005.
- The biotechnology industry has mushroomed since 1992, with U.S. health-care biotech revenues increasing from \$8 billion in 1992 to \$50.7 billion in 2005.
- biosciences—including not just biotechnology but all life sciences activities—employed 1.2 million people in the United States in 2004 and generated an additional 5.8 million related jobs.
- Biotechnology is one of the most research-intensive industries in the world. The U.S. biotech industry spent 19.8 billion on research and development in 2005.
- The top five biotech companies invested an average of \$130,000 per employee in R&D in 2005.

- Most biotechnology companies are young companies developing their first products and depend on investor capital for survival. Biotechnology attracted more than \$20 billion in financing in 2005 and has raised more than \$100 billion since 2000.
- The United States remains the global biotech leader by a significant margin:
 - U.S. biotech companies raised 80 percent of venture capital.
 - Seventy-eight percent of biotech revenues are U.S.-generated.
 - Over 50 percent of the public companies are still U.S.-based.
- The biotech industry is regulated by the U.S. Food and Drug Administration (FDA), the Environmental Protection Agency (EPA) and the Department of Agriculture (USDA).

13. BIOTECHNOLOGY IN EUROPE

- Distribution of European companies

- Therapeutics	37%
- Genomics, proteomics and enabling technologies	24%
- Diagnostics	12%
- Drug discovery technologies and services	9%
- Drug delivery	5%
- Tissue engineering	5%
- Agbio	5%
- Industrial biotech	3%

14. BIOTECHNOLOGY IN THE ASIA PACIFIC

- Biotech hotbeds emerge in the Asia-Pacific region, particularly in Japan, India, and China.
- Other Asian Pacific countries with emerging biotech: South Korea, Singapore and Australia.
- Asian countries are making Biotechnology a top strategic priority
 - The focus on biotech stems from:
 - Economic liberalization (deregulation, privatization, international trade)
 - Boost intellectual property protection
 - Technology-based industry
- A long-awaited surge in IPOs, including 17 in Asia-Pacific.
- Asian Biotech sector increased in 2005 by 46% compared to 2004 to reach about \$3 billion revenues and 716 public and private companies.

15. BIOTECHNOLOGY IN DEVELOPING COUNTRIES: MENA REGION

? R &D		? Several efforts throughout the region: Some R&D but essentially academic research
? Products development		? No development of local products yet
? Biotech industry		? Quasi absent but efforts are being made

16. R&D ACTIVITIES IN HEALTH BIOTECH FIELD IN SOME MENA COUNTRIES

- **Morocco** : Pasteur Institute and universities. Some National (CooperMaroc) and International Pharma companies (Roche, Pfizer, Bristol-Myers Squibb, Eli-Lilly, Idex-Pharm, Merck Sharp & Dohme, etc), Casablanca technology Park, Bouznika technology Park.
- **Algeria** : Pasteur Institute and universities, Technopark El Boustene, Technopark Ibnou Sina, Park of Sidi Benour.
- **Tunisia** : Pasteur Institute, Institute of neurology, Sfax Biotechnology Center and universities, SOTP, Technopark of Bizerta (AgBio), Technopark of Borj Cedria, Technopark of Sidi Thabet
- **Egypt** : Several universities, MUCSAT, Sinai Technology Valley
- **Qatar**: Qatar Science and Technology Park (under development)
- **Saudi Arabia**: Techno Valley Science Park, King Abdullah Bin Abdulaziz science Park, Jeddah Biocity science Park
- **Jordan**: Private sector (Hekma, Dar Eddawa, Arab Pharma company, etc)
- **Kuwait**: Kuwait Technology Park (under development)
- **UAE**: Dubiotech (Under construction), Dubai Technology Park Mohammed Bin Rashid
- **Bahrain**: Bahrain Technology Park (under development)

17. BIOTECHNOLOGY PERSPECTIVES FOR MOROCCO

- Morocco is well placed to be competitive in several key areas (Competitive niches):
 - **Contract research/Manufacturing**
 - To reduce cost and increase returns for investors and stakeholders (Outsourcing)
 - Challenge: heavily regulated industry (GMP, GSP, GLP)
 - **Vaccines**
 - Develop vaccines at more affordable prices (infectious diseases, etc)
 - **Generics/Bioenerics**
 - 2005 was Pharma's biggest patent expiration year ever.
 - Estimated \$23 Billion worth of products losing protection
 - **IT/Bioinformatics**
 - Potential competitive niche due to the convergence between IT and biotechnology
 - **Traditional strengths**
 - Biodiversity/Medicinal plants as a vast pool of untapped active compound
 - If combined with modern drug discovery tools (HTS) could accelerate the commercialization of new therapeutics
 - **Disinvested Technologies ??**
 - Stem cell
 - Gene Therapy

18. ISSUES FACING BIOTECHNOLOGY DEVELOPMENT IN DEVELOPING COUNTRIES

- Lack of scientific and technical Capacities
- Lack of access to propriety technologies.
- Weak biosafety regulations
- Weak IPRs regulations
- Poor investments
- Difficulty to access to information

19. INGREDIENTS FOR SUCCESSFUL BIOTECHNOLOGY INDUSTRY

- Combination of a strong university research with experienced VC and management
- Highly educated labor force
- Laws that support technology transfer
- Regulatory regimes meeting global standards (GMP, GSP, GLP)

ACKNOWLEDGMENTS

- **Dr. Joshua LaBaer:** Harvard Medical School (Harvard Institute of Proteomics), USA
- **Dr. James Sherley:** Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA
- **Dr. Vladimir Larionov,** National Cancer Institute, National Institutes of Health (NIH), USA
- **Dr. Hicham Fenniri:** National Institute for Nanotechnology, Canada
- **Dr. Mouldy Sioud:** Cancer Research Center, Norwegian Radium Hospital, Norway



IMMUNOGÉNÉTIQUE DE LA TUBERCULOSE, CONCEPTION DE PEPTIDES IMMUNOGÉNIQUES MULTI-ÉPITOPHIQUES SPÉCIFIQUES DE *Mycobacterium tuberculosis*

Rajae EL AOUAD

Directrice de l'Institut National d'Hygiène, Rabat, Maroc
Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Le travail exposé dans le cadre de la table ronde des biotechnologies en santé est le résultat d'une collaboration entre le laboratoire d'immunologie de l'institut national d'hygiène/Rabat, le laboratoire des maladies infectieuses INMM-CNR/Rome et les départements de médecine interne et de biologie de l'université Tor Vergata/Rome dans le cadre de la collaboration bilatérale maroco-italienne.

1. INTRODUCTION

Mycobacterium tuberculosis (MTB) est capable d'induire une puissante réponse immune de type Th1, permettant la détection rapide de cellules T productrices d'IFN- γ . Cette capacité a été largement exploitée pour concevoir des tests diagnostic *in vitro* sur le sang périphérique pour le diagnostic de l'infection tuberculeuse latente (1, 2, 3). Suite à la démonstration que les protéines codées par la région génomique de différenciation RD1 de MTB c.a.d la protéine ESAT-6 (early secreted antigenic target 6-kDa), et le CFP-10 (culture filtrate protein) pouvaient stimuler la production d'IFN- γ par les cellules T du sang périphérique chez 81 à 97% des patients atteints de tuberculose, des test sanguins basés sur la production d'IFN- γ ont été développés pour le diagnostic de la tuberculose latente (1,2).

Dans ce contexte, nous avons émis l'hypothèse que des protéines exprimées préférentiellement par des modèles de croissance intracellulaire ou lors d'infection par MTB peuvent constituer des cibles idéales pour la conception de nouveaux tests diagnostics plus sensibles et plus spécifiques de l'infection MTB, et éventuellement pour la conception de vaccins (4, 5).

Dans ce but, un panel de peptides MTB multi-épitopiques, HLA restreints, identifiés par immunogénétique reverse a été utilisé (6, 7).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Prédiction des épitopes et sélection des peptides antigéniques

Soixante quinze peptides multiepitopiques HLA-restreints ont été dessinés par analyse quantitative des motifs de liaison de peptides à partir de 3 gènes de protéines MTB exprimées dans les macrophages humains activés (MA), de 4 gènes exprimés durant la croissance dans des macrophages humains non activés (MN-A), de 12 gènes de ménage ou house keeping genes (HKG) et de 6 gènes de la région RD1. La technique d'immunogénétique reverse consiste à reproduire *in vitro* grâce à l'utilisation de la bioinformatique, méthode *in silico*, ce que la cellule présentatrice d'antigènes fait *in vivo* (<http://www.imtech.res.in/raghava/propred/page2.html>)(8) (<http://www.ebi.ac.uk/blast/>).

2.2. Population étudiée

La population de patients étudiée incluait 22 patients avec une tuberculose pulmonaire active nouvellement diagnostiquée, et 23 patients tuberculeux sous traitement standard depuis 2 à 4 mois, dont dix ont pu être évalués avant et après deux mois de traitement. Trente quatre sujets sains, dont 9 sujets sains intradermo-réaction (IDR) négatifs sans histoire d'exposition à la tuberculose (contrôles non exposés) et 25 professionnels de santé avec une histoire ancienne ou récente d'exposition à la tuberculose IDR positifs (contrôles TB-exposés) ont été évalués.

Table 1. Caractéristiques démographiques des différents groupes étudiés

Groupe	Nombre	Age moyen (années)	M/F	Nationalité	Vaccination
MTB-Non exposés TST-contrôle négatif	9	30	5/4	Italien	0/9
MTB-Exposés TST- contrôle positif	25	46	13/12	Italien	18/25
Patients avec TB active, non traités	22	39	13/9	3 Bulgares, 9 Italiens 7 Romains, 1 Brésilien 1 Moldave, 1 Polonais	12/21 (1 inconnu)
Patients avec TB active, sous traitement	23	38	20/3	10 Bulgares, 2 Italiens 2 Romains, 1 Albanais 1 Macédonien, 1 Egyptien 1 Indien, 1 Ukrainien 1 Somalien, 1 Colombien 1 Chinois, 1 Philippin	15/18 (5 inconnus)

2.3. Évaluation de la production d'INF- γ par les peptides spécifiques

La numération des cellules T productrices d'INF- γ (spot forming cells ou SFC) a été réalisée par la technique d'Elispot sur les monocytes du sang périphérique (PBMCs) stimulés avec les peptides sélectionnés (7).

Le consentement éclairé a été obtenu auprès de tous les sujets. Le diagnostic de la tuberculose active a été confirmé par l'isolement du MTB en culture dans tous les cas.

3. RÉSULTATS

3.1. Sélection des peptides

A partir des 24 protéines MTB, 75 peptides ont été sélectionnés et utilisés dans cette étude (Patente N° RM2006A000080).

3.1.1. Analyse de la réponse des cellules T aux peptides sélectionnés chez les patients tuberculeux comme contrôles positifs

Tous les peptides sélectionnés montrent une réponse plus importante chez les patients tuberculeux comparés aux sujets contrôles non exposés (IDR négatifs 1.4 ± 2.1 spots moyen par peptide/million PBMCs; TB active 12.6 ± 9.8 ; $p < 0.006$ (Figure 1, panel A)]. Chez ces patients l'intensité moyenne de la réponse aux peptides dérivés des protéines MA (7.1 ± 3.5), MN-A (6.9 ± 1.1) ou HKG (8.2 ± 3.2) était plus faible que celle engendrée par les peptides dérivés des protéines RD1 (21.3 ± 10.8 ; $p < 0.01$ toutes comparaisons) (Figure 1, panel A)

3.1.2. Analyse de la réponse des cellules T aux peptides sélectionnés chez les sujets exposés

Chez les sujets IRD positifs, patients présentant une infection tuberculeuse latente, tous les peptides sélectionnés occasionnent une production d'INF- γ significative [MA 7.6 ± 3.5 ; MN-A 8.9 ± 3.5 ; HKG 7.9 ± 4.5 ; RD1 12.9 ± 6.8 ; $p < 0.02$ comparés aux sujets IRD négatifs (Figure 1, panel B)].

Comme déjà démontré avec les peptides multi-épitopiques de liaison dérivés de ESAT-6 et CFP-10, l'intensité moyenne de la réponse des cellules T aux peptides dérivés de RD1 est plus faible chez les sujets exposés IRD positifs (12.9 ± 6.8) c'est-à-dire les patients avec une tuberculose latente, comparée aux patients souffrant d'une tuberculose active (21.3 ± 10.8 ; $p < 0.003$). A l'opposé, il n'y a pas de différence dans la réponse aux peptides dérivés des protéines MA, MN-A et HKG entre les patients IRD positifs comparés aux patients souffrant de tuberculose active ($p > 0.05$, toutes comparaisons).

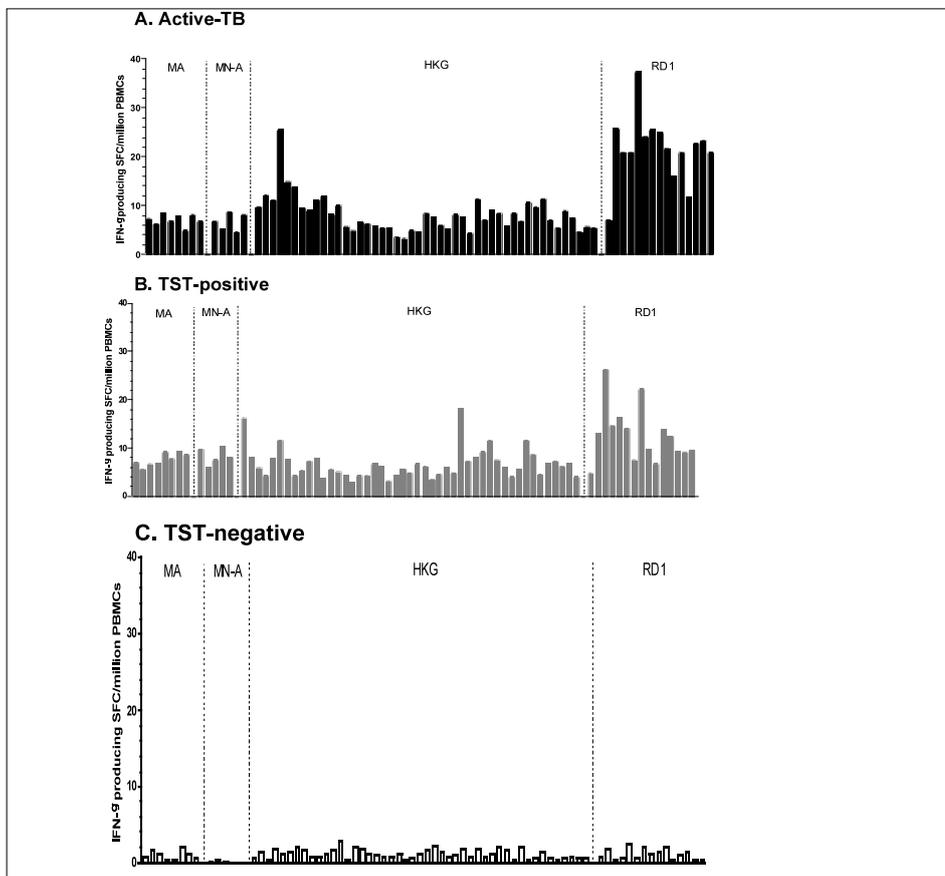


Figure 1. Réponse IFN- γ induite par les 75 peptides de MTB multiépitopiques HLA restreints obtenus à partir des 24 protéines de MTB. L'énumération des cellules productrices d'IFN- γ stimulés par les peptides sélectionnés a été réalisée par Elispot chez les patients avec TB active (panel A, barre noire), les patients IDR ou TST positifs (panel B, barre grise) et les patients IDR ou TST-négatifs (panel C, barre non colorée). Les données sont reportées en moyenne de SFC par million de PBMC pour chaque peptide. Les peptides sont regroupés par groupes de gènes exprimés dans les macrophages humains activés (MA), dans les macrophages humains non activés (MN-A), housekeeping genes (HKG) et les gènes de la région RD1 (RD1).

3.1.3. Analyse de la réponse des cellules T aux peptides sélectionnés durant l'évolution de la tuberculose active.

La réponse des cellules T aux peptides dérivés des protéines MA, MN-A et HKG a également été analysée chez les sous-groupes de patients tuberculeux actifs traités et non traités de même que chez un groupe sélectionné de patients tuberculeux testés avant et 2 mois après chimiothérapie standard. Comme attendu, la réponse des cellules T vis-à-vis des peptides dérivés des protéines RD1 était plus élevée chez les 22 patients tuberculeux

actifs non traités (SFC 251 ± 116) comparée aux 23 patients traités (SFC 155 ± 129 , $p < 0.01$). Curieusement, nous avons trouvé une réponse aux peptides dérivés des protéines MA plus élevée chez les patients traités (SFC 121.8 ± 44.6) comparée aux patients non traités (SFC 52 ± 29 ; $p < 0.01$), alors qu'aucune différence n'a été notée dans les réponses vis-à-vis des peptides dérivés des protéines MN-A (SFC 38 ± 12 ; 33 ± 9 ; $p > 0.05$) et de HKG (SFC 389 ± 45 ; 306 ± 78 ; $p > 0.05$) entre patients tuberculeux actifs non traités et traités respectivement. Cette observation a été confirmée chez les 10 patients tuberculeux actifs suivis durant les 2 mois de chimiothérapie standard. La production d'IFN- γ engendrée par les peptides dérivés des protéines RD1 a diminué chez 8 patients sur les 10 au bout de 2 mois de traitement (Figure 2 panel A $p < 0.02$). Au contraire, la réponse vis-à-vis des peptides dérivés des protéines MA a curieusement augmenté (Figure 2 panel B $p < 0.02$) $p < 0.01$). Comme déjà mentionné, aucune différence n'a été notée avec les peptides dérivés des protéines MN-A et de HKG ($p > 0.05$ toutes comparaisons).

4. DISCUSSION

Les tests basés sur la production d'IFN- γ par les cellules T stimulées par des protéines dérivées du MTB tels « Quantiféron-TB » et « T-spot TB » sont doués d'une sensibilité allant de 81 à 97% pour l'identification des patients avec prolifération active du MTB dans les lésions tissulaires (9).

Cette étude a permis d'identifier 19 protéines hautement immunogéniques, puisqu'ils sont capables d'induire une réponse Th1 chez les sujets présentant une tuberculose latente

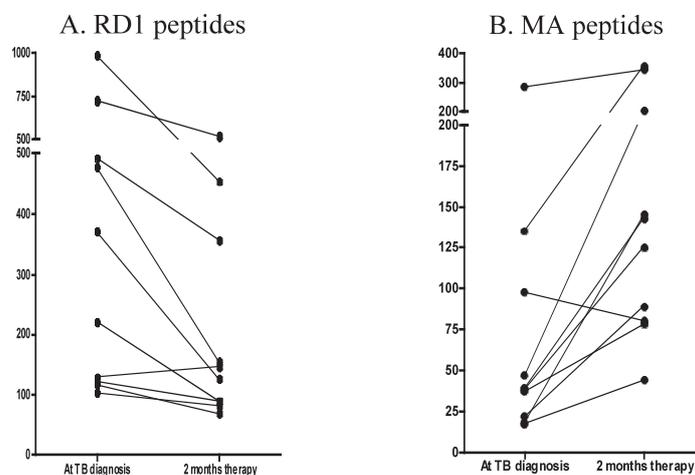


Figure 2. Évaluation de la réponse *in vitro* des peptides dérivés de RD1 (panel A) et des peptides sélectionnés à partir des gènes exprimés dans les macrophages humains activés (MA, panel B) au moment du diagnostic de la tuberculose active et après 2 mois de traitement standard chez un sous-groupe de tuberculeux actifs. Le nombre des SFC productrices d'IFN- γ par million de PBMCs pour chaque patient est reporté en ordonnées.

aussi importante que celle induite par les peptides dérivés de RD1, l'actuel test diagnostic standard.

De plus, la comparaison des réponses induites par les peptides dérivés des protéines MA, MN-A et HKG et celle induite par les peptides dérivés des protéines RD1 durant l'évolution de la maladie chez les patients tuberculeux actifs, suggère que la production d'IFN- γ secondaire aux peptides RD1 pourrait être liée à la charge bactérienne, et de là dépendante de la concentration d'antigène et déclinant de ce fait avec la réduction de la charge mycobactérienne occasionnée par la chimiothérapie standard. De façon intéressante, les réponses engendrées par les peptides dérivés des protéines MA, MN-A et HKG semblent plus stables, pouvant même augmenter dans le temps comme démontré pour les peptides MA. La limitation de cette étude réside dans le fait que nous n'avons pas pu vérifier si les peptides mycobactériens exprimés dans le modèle *in vitro* et utilisés dans ce modèle *ex vivo* sont les produits de gènes réellement exprimés dans les organes atteints chez les patients tuberculeux actifs. Toutefois, les données démontrent que le modèle *in vitro* d'infection intracellulaire pour la sélection des produits de gènes MTB pour une évaluation *in silico* et *in vitro* de leur immunogénicité présente un potentiel intéressant pour identifier de nouveaux antigènes susceptibles d'être inclus dans de nouveaux tests diagnostics.

5. RÉFÉRENCES

1. Mazurek G.H., Jereb J., Lobue P., Iademarco M.F., Metchock B., Vernon A.. 2005. Guidelines for using the QuantiFERON-TB Gold test for detecting *Mycobacterium tuberculosis* infection, United States. MMWR Recomm Rep. 54: 49-55.
2. National Collaborating Centre for Chronic Conditions. 2006. Tuberculosis: clinical diagnosis and management of tuberculosis, and measures for its prevention and control. London, UK: Royal College of Physician.
3. Pai M., Riley L.W., Colford J.M. Jr. 2004. Interferon-gamma assays in the immunodiagnosis of tuberculosis: a systematic review. Lancet Infect. Dis. 4:761-76.
4. Cappelli G., Volpe E., Grassi M., Liseo B., Colizzi V., Mariani F. 2006. Profiling of *Mycobacterium tuberculosis* gene expression changes during human macrophages infection: up-regulation of the alternative sigma factor G, of a group of transcriptional regulators and of proteins with no known function. Res. Microbiol. 157:445-455.
5. Mariani F., Cappelli G., Riccardi G., Colizzi V. 2000. *Mycobacterium tuberculosis* H37Rv comparative gene-expression analysis in synthetic medium and human macrophage. Gene. 253:281-91.
6. Amicosante M., Gioia C., Montesano C., Casetti R., Topino S., D'Offizi G., Cappelli G., Ippolito G., Colizzi V., Poccia F., Pucillo L.P. 2002. Computer-based design of an HLA-haplotype and HIV-clade independent cytotoxic T-lymphocyte assay for monitoring HIV-specific immunity. Mol Med.; 12:798-807.
7. Vincenti D., Carrara S., De Mori P., Pucillo L.P., Petrosillo N., Palmieri F., Armignacco O., Ippolito G., Girardi E., Amicosante M., Goletti D. 2003. Identification of early secretory antigen target-6 epitopes for the immunodiagnosis of active tuberculosis. Mol Med. 9:105-116).
8. Sing H, Raghava G.P.S 2001. Propred: prediction of HLA DR binding sites. Bioinformatics. 17:1236-37.
9. Richeldi L. 2006. An Update on the Diagnosis of Tuberculosis Infection. Am. J. Respir. Crit. Care Med. 23.



LA PREDISPOSITION GENETIQUE AUX CANCERS : EXPERIENCE MAROCAINE

Abdelaziz SEFIANI

Institut National d'Hygiène, Rabat, Maroc

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

Résumé

Le cancer est une maladie fréquente, le plus souvent grave, nécessitant une prise en charge lourde et onéreuse. Les formes avec prédisposition génétique sans agrégation familiale sont fréquentes, par contre les cancers héréditaires avec transmission mendélienne associées à un risque tumoral élevé représentent moins de 5 à 10% des cancers. Ces derniers sont dus à des mutations germinales qui touchent des gènes le plus souvent impliqués dans la croissance et la prolifération cellulaire et dans les mécanismes de réparation de l'ADN. L'étude de ces gènes chez les personnes à risque constitue une des premières applications, en pratique médicale courante, des recherches en cancérogenèse. La possibilité d'identifier les mutations génétiques associées à des formes familiales de cancers a permis le développement de l'oncogénétique: une médecine prédictive des cancers basée sur l'évaluation clinique d'un risque héréditaire de cancers et la mise en place de procédures de prévention adaptée. L'oncogénétique soulève évidemment, comme toutes les branches de la médecine prédictive, de nouvelles questions spécifiques d'ordre clinique, psychologique, social et économique. Au Maroc, le cancer constitue aujourd'hui un problème majeur de santé publique, en particulier en raison de la transition épidémiologique et l'augmentation de l'espérance de vie de la population. L'intérêt des scientifiques pour les prédispositions génétiques à cette pathologie est récent et les premières mutations génétiques ont été décrites chez des familles atteintes de cancers des seins, de la thyroïde ou du colon. Il ressort des résultats préliminaires qu'il est nécessaire de soutenir la recherche scientifique dans ce domaine et d'intégrer le dépistage des personnes à haut risque de développer des cancers dans la politique globale de prévention des cancers.

1. INTRODUCTION

Les premières observations rapportant une concentration de cancers dans une même famille ont été rapportées avant la fin du dix-neuvième siècle. Ces familles sont restées des curiosités médicales jusqu'à la deuxième moitié du vingtième siècle, lorsque des études épidémiologiques ont montré que le risque relatif de développer un cancer était supérieur chez un apparenté au premier degré d'un sujet atteint que chez un sujet de la population générale. Dans les familles à risque élevé de développer des cancers, ceux-ci avaient tendance à survenir à un âge beaucoup plus jeune que chez le reste de la population et certaines familles avaient la particularité d'être une agrégation de cancers touchant des organes différents, parfois chez une même personne. Ces agrégations familiales plus ou moins importantes de cancers peuvent être le résultat de situations diverses:

moins importantes de cancers peuvent être le résultat de situations diverses :

- soit c'est une association fortuite qui est le reflet du simple hasard, en raison de la fréquence élevée des cancers dans la population générale.
- soit que plusieurs personnes partagent un patrimoine génétique commun dont plusieurs gènes de susceptibilité génétique au développement de tumeurs. C'est le cas d'un grand nombre de cancers avec prédisposition génétique dans la population générale, mais les agrégations familiales sont faibles (peu de cas) et les tumeurs surviennent à un âge tardif. Les gènes impliqués dans ce type de prédisposition sont fréquents dans la population mais leur pénétrance est faible, modulable par l'environnement et par conséquent leur étude n'a pas d'applications pratiques dans le suivi des familles à risque.
- Soit une mutation germinale d'un gène qui se transmet dans la famille en conférant un risque important de développer un cancer. Ces gènes ont une forte pénétrance, ils sont peu nombreux mais l'agrégation familiale est importante (plusieurs cas avec début précoce). Dans la majorité des cas ces prédispositions génétiques aux cancers se transmettent selon un mode monogénique autosomique dominant avec pénétrance incomplète et le déclenchement du processus tumoral se fait selon le modèle de Knudson. Ce dernier avait élaboré en 1971 son hypothèse, aujourd'hui confirmée par les données de la biologie moléculaire, selon laquelle deux mutations qui inactivent les deux allèles d'un même gène sont nécessaires pour l'apparition d'une tumeur. Chez les personnes prédisposées, une première mutation est germinale et présente, dès la conception, dans toutes les cellules de l'organisme, alors que les deux événements sont somatiques chez les sujets sans antécédents familiaux.

2. GÈNES DE PRÉDISPOSITION AUX CANCERS à FORTE PÉNÉTRANCE

Sur le plan moléculaire, le cancer est une maladie complexe due à l'accumulation, au sein des cellules tumorales, de multiples mutations qui perturbent l'expression des gènes contrôlant différents processus de régulation cellulaire (prolifération, différenciation, réparation des lésions d'ADN, apoptose, la motilité et l'angiogenèse). Ces perturbations conduisent à l'initiation de l'oncogenèse mais également à l'évolution vers des phénotypes de plus en plus invasifs et résistant aux traitements. La connaissance des gènes impliqués dans les différentes étapes de la cancérogenèse a débuté dans les années 1980, grâce au développement de nouvelles techniques de l'analyse du génome. La cancérologie clinique a rapidement bénéficié des retombées de ces recherches, pour la prévention, le diagnostic, la prédiction et la prise en charge thérapeutique.

Les gènes de prédisposition au développement des tumeurs avec une forte pénétrance (Tableau 1) appartiennent à trois groupes.

- Les proto-oncogènes, gènes normalement présents dans le génome et dont l'activation dans la cellule tumorale favorise la prolifération cellulaire. Dotés d'une propriété de transformation, ils sont alors appelés oncogènes. Ces gènes appartiennent à différents compartiments cellulaires et subcellulaires et possèdent des fonctions diverses telles que facteurs de croissance, récepteurs de facteurs de croissance, protéines G membranaires, régulateurs cytoplasmiques et facteurs de transcription nucléaires. Les oncogènes agissent habituellement en dominance, au niveau somatique et ne sont qu'exceptionnellement (cas du gène *RET*) à l'origine d'une prédisposition transmise par une mutation germinale.

Tableau 1. Gènes de prédisposition aux cancers (pénétrance élevée)

Syndrome	gène(s)	Type	incidence	pénétrance
Polypose familiale	<i>APC</i>	dominant	1/10000	100%
MAP	<i>MYH</i>	récessif		
Cowden	<i>PTEN</i>	dominant	1/200000	90-95%
Mélanome familial	<i>CDKN2A, CDK4</i>	dominant	inconnu	100%
HBOC	<i>BRCA 1, 2</i>	dominant	1/1000	jusqu'à 85%
Carcinome gastrique diffus	<i>CDH1</i>	dominant	rare	90%
HNPCC	<i>MLH1, MSH2, MSH6, PMS1, PMS2</i>	dominant	1/400	90%
Polypose juvénile	<i>SMAD4, BMPRIA</i>	dominant	1/100000	90-100%
Li-Fraumeni	<i>TP53</i>	dominant	rare	90-95%
MEN de type 1	<i>MEN1</i>	dominant	1/100000	95%
MEN de type 2	<i>RET</i>	dominant	1/30000	70-100%
Neurofibromatose de type 1	<i>NF1</i>	dominant	1/3000	100%
Neurofibromatose de type 2	<i>NF2</i>	dominant	1/40000	100%
Gorlin	<i>PTC</i>	dominant	1/50000	90%
Peutz-Jaeger	<i>LKB1</i>	dominant	1/200000	100%
Rétinoblastome	<i>RB</i>	dominant	1/20000	90%
von Hippel-Lindau	<i>VHL</i>	dominant	1/36000	90-95%
Ataxie-Télangiectasie	<i>ATM</i>	récessif	1/50000	100%
Bloom	<i>BLM</i>	récessif	rare	100%
Anémie de Fanconi	<i>FANCA, B, C, D, E, F, G, L</i>	récessifs	1/360000	100%
Nijmègue	<i>NBS1</i>	récessif	rare	100%
Rothmund-Thomson	<i>RECQIA</i>	récessif	rare	100%
Xeroderma pigmentosum	<i>XPA, XPC, XPE, ERCC2,3,4,5</i>	récessifs	1/1000000	100%

- Les gènes suppresseurs de tumeurs, ils fonctionnent de manière récessive et leurs mutations entraînent au niveau cellulaire des pertes de fonction. Ces gènes agissent comme des inhibiteurs de la croissance cellulaire au sens large (cycle cellulaire, différenciation, apoptose). La découverte, en 1989, du premier gène suppresseur de tumeurs (le gène *Rb*) a permis de confirmer l'hypothèse de Knudson et de fournir à l'oncologie les instruments moléculaires pour dépister, dans les formes familiales de cancers, les personnes réellement à risque qui nécessitent une prise en charge adaptée. Les gènes *BRCA1* et *BRCA2* dans les cancers du sein et des ovaires et le gène *APC* dans les cancers colorectaux sur polypose sont parmi les suppresseurs de gènes pour lesquels des tests génétiques sont actuellement disponibles dans les consultations d'oncogénétique.
- Le troisième groupe de gènes code pour des enzymes de réparation de l'ADN. Ce sont des gènes qui participent au maintien de l'intégrité du génome par la réparation des erreurs de réplication (MMR - MisMatch Repair), la réparation des dimères de thymidine ou les additions de grosses molécules à l'ADN (NER - Nucleotide Excision Repair), la réparation des oxydations, méthylation ou déaminations des bases (BER - Base Excision Repair) et les réparations des cassures (HR et NHEJ - Homologous recombination et Non Homologous End Joining). Dans les tumeurs colorectales héréditaires, deux de ces systèmes de réparation sont impliqués. Dans les cancers coliques héréditaires non

polyposiques (HNPCC), ce sont les gènes de réparation des mésappariements qui présentent des mutations (*MLH1* et *MSH2* principalement). Plus récemment un autre système de réparation de l'ADN, le système BER, a été associé à des cancers coliques (AITassan et coll. 2002). Ces cancers héréditaires coliques se développent sur un phénotype polyposique généralement atténué et en l'absence de mutation du gène APC (polypose familiale colique).

3. LES CONSULTATIONS D'ONCOGENETIQUE

Une des premières applications des avancées réalisées dans l'identification des gènes de prédisposition génétique aux cancers a été le développement de consultations d'oncogénétique. Cette branche de la génétique médicale a pour objectif d'évaluer le risque réel de développer une tumeur, chez les membres d'une famille atteinte d'une prédisposition héréditaire aux cancers et de poser l'indication d'un test génétique. Les tests moléculaires, lorsqu'une mutation du gène soupçonné a été au préalable identifiée chez une personne malade de la famille, permettent de rassurer les individus non porteurs et leur descendance. En plus du confort psychologique, ces tests génétiques permettent d'éviter à ces personnes, des explorations spécifiques de dépistage, et de focaliser la prévention sur les seuls membres de la famille porteurs de la mutation. La recherche d'une mutation, dans une forme familiale, est la seule manière de confirmer le caractère héréditaire d'une prédisposition génétique. Cette recherche est souvent lourde et onéreuse et peut ne pas aboutir à un résultat utile pour les autres membres de la famille. Ces difficultés sont dues en partie la très grande hétérogénéité et au caractère privé et spécifique des mutations dans les familles. En effet, des mutations récurrentes n'ont été décrites, pour certains cancers, que dans quelques populations (les mutations 185delAG et 5382insC de BRCA1 chez les Juifs ashkenazi et 999del5 de BRCA2 chez les islandais). Le caractère laborieux des tests génétiques fait que leur indication est aujourd'hui limitée à des familles qui répondent à des critères d'inclusion établis pour chaque type de cancer. Parmi les arguments souvent exigés, plusieurs cancers dans la même branche parentale, diagnostic précoce, localisations multiples chez une même personnes et bilatéralités pour les organes doubles). En revanche, lorsque une anomalie génétique a été identifiée chez le cas index, sa recherche chez les apparentés potentiellement à risque, qui peuvent être des dizaines par famille, est plus facile et nécessite beaucoup moins de temps et d'effort.

4. PREDISPOSITION GENETIQUE AUX CANCERS AU MAROC

Le cancer constitue un vrai problème de santé publique au Maroc. On estime à 40000, le nombre de nouveaux cas par an dont 1000 cas de cancers chez l'enfant. Ces chiffres sont en progression constante en raison de :

- l'augmentation de l'espérance de vie, le vieillissement progressif de la population et le changement des habitudes alimentaires.
- d'une transition épidémiologique, le succès des programmes de lutte contre les maladies infectieuses et environnementales va faire croître encore plus l'importance relative de la morbidité liée à la pathologie cancéreuse.
- Sur le plan épidémiologique et en l'absence d'un registre national des cancers, les données disponibles ne sont que parcellaires avec probablement quelques biais de sélection. Les

chiffres annoncés par l'Institut National d'Oncologie de Rabat qui recrute près de 50% des patients, peuvent être considérés comme le meilleur reflet dont nous disposons actuellement de la situation épidémiologique au Maroc. Il ressort de ces données que le cancer du sein chez la femme et le cancer du poumon chez l'homme sont les plus fréquents dans notre population (Figure 1).

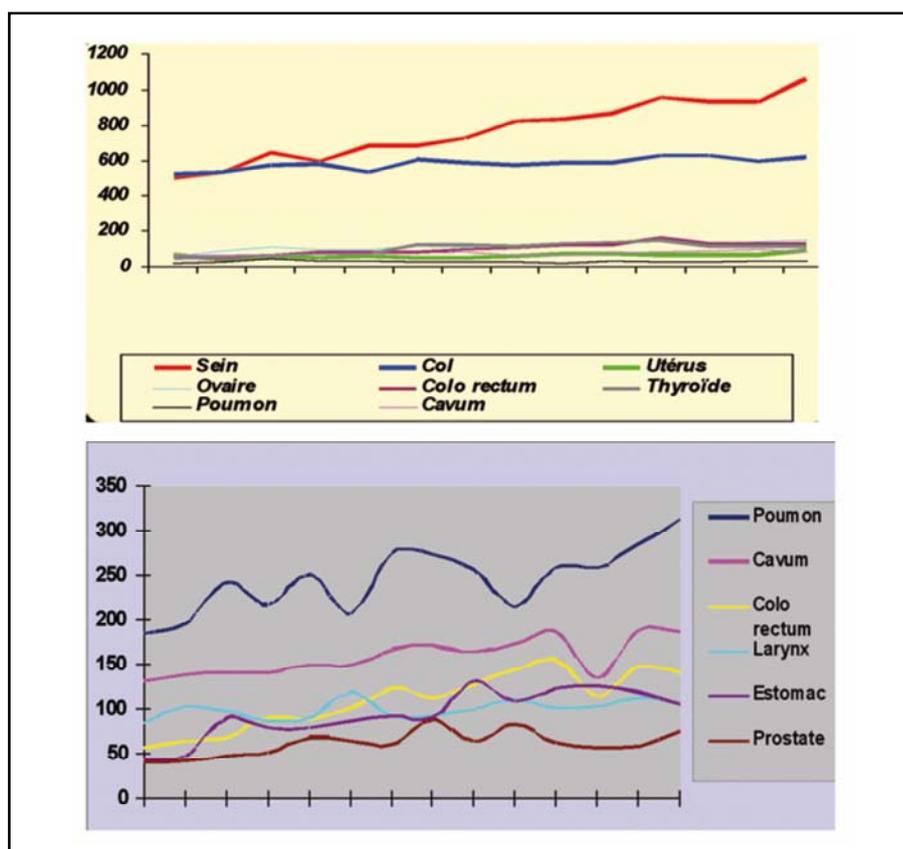


Figure 1. Types de cancers recrutés à l'Institut National d'Oncologie, chez la femme (a) et chez l'homme (b) (D'après Benjaafar N *et al.*)

Les programmes de lutte contre le cancer sont basés au Maroc sur l'amélioration des conditions d'accès aux soins, par la multiplication des centres d'oncologie à travers le royaume, sur la sensibilisation de la population pour éviter certains facteurs de risques (tabagisme par exemple). Un des principaux objectifs de cette politique de prévention est d'amener les patients à consulter à un stade précoce de la maladie, condition nécessaire pour le succès de toute prise en charge thérapeutique. L'identification de personnes saines, mais à haut risque de développer un cancer du fait de leur histoire familiale, est une approche nouvellement introduite au Maroc, en la faveur de programmes de recherche scientifiques.

5. LA PRÉDISPOSITION AUX CANCERS DU SEIN ET DES OVAIRES

Le syndrome de prédisposition héréditaire au cancer du sein et de l'ovaire est transmis selon le mode autosomique dominant. L'identification des gènes *BRCA1* et *BRCA2*, qui confèrent un risque élevé de développer un cancer du sein et/ou de l'ovaire, a permis une meilleure compréhension des formes familiales de cancer du sein. Ces gènes sont responsables, en partie, des familles à cas multiples de cancer du sein et de l'ovaire survenant à un jeune âge. L'estimation de la prévalence et de la pénétrance des mutations de *BRCA1* et *BRCA2* est très variable suivant les populations étudiées, les stratégies d'étude, et la sensibilité des méthodes de détection des mutations. Même si l'on tient compte des estimations de pénétrance les plus élevées, le risque cumulé de cancer du sein à 80 ans n'est pas de 100 % (pénétrance incomplète à 80 ans).

Les premières mutations des gènes *BRCA1* et *BRCA2* chez des familles marocaines ont été identifiées récemment. Il s'agit de familles recrutées dans le cadre d'un programme de recherche scientifique financé par la commission européenne et réalisé grâce à une collaboration entre le département de génétique médicale de l'Institut National d'Hygiène et l'Institut National d'Oncologie.

Une des premières anomalies moléculaire identifiée chez les familles marocaine avec une prédisposition héréditaire aux cancers du sein a été la mutation 185delAG du gène *BRCA1* (Figure 2). Cette mutation a été décrite initialement et de façon récurrente chez la population juive ashkénaze, avant son identification dans d'autres populations, en particulier chez des familles marocaines de confession juive. Sa découverte récente dans une famille marocaine non juive est une première au sud de la méditerranée. Ce résultat confirme l'ancienneté de cette mutation avec un effet fondateur (ancêtre commun).

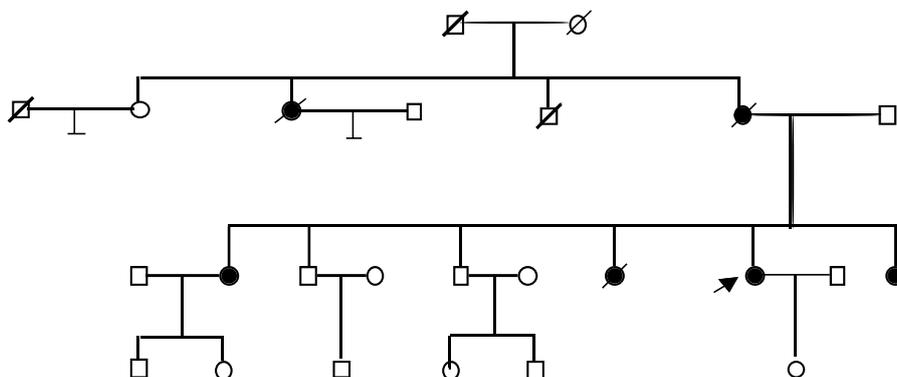


Figure 2. Arbre généalogique d'une famille marocaine avec des cancers du sein et des ovaires secondaires à la mutation 185 de IAG du gène *BRCA1*

La mise en évidence de mutations *BRCA1* et *BRCA2* chez des familles marocaines a permis de réaliser, chez des personnes à risque après leur consentement, un test génétique présymptomatique. La surveillance des femmes chez qui la mutation familiale a été retrouvée, a permis le diagnostic de certaines tumeurs à des stades infracliniques et une

prise en charge thérapeutique spécifique. Ce test génétique offre également l'avantage d'éviter aux sujets " non porteurs " une prise en charge excessive et des explorations inutiles.

6. LA POLYPOSE ASSOCIÉE AU GÈNE *MYH* (MAP)

L'étude chez les personnes à risque, des gènes impliqués dans la prédisposition héréditaire aux cancers colorectaux, permet d'adapter le dépistage, la surveillance et l'indication chirurgicale. La nature du ou des gènes à analyser par les tests génétiques dépend du type de cancer qui se transmet dans la famille. Le gène APC est ainsi étudié, en première intention, chez les familles avec une polypose adénomateuse familiale, alors que les mutations des gènes de réparation de l'ADN sont recherchées dans les cancers non polyposiques avec instabilité chromosomiques.

Un des derniers gènes dont les mutations ont été rapportées dans le cancer colorectal est *MUTYH* (pour MutY Homologue ou *MYH*). Les mutations du gène *MYH* est à l'origine d'une déficience du système de réparation par excision de bases (BER) responsable d'une sensibilité accrue aux lésions oxydatives, avec accumulation de mutations spécifiques. La prédisposition héréditaire aux cancers du colon et du rectum de type MAP, de découverte récente, se transmet selon le mode autosomique récessif, par opposition aux autres prédispositions génétiques dont la transmission est dominante. La MAP qui se distingue de la polypose classique par un nombre moins important de polypes, serait donc plus fréquentes dans des pays, comme le Maroc, où le taux de consanguinité est encore important. Les premières mutations du gène *MYH* chez des patients marocains ont été récemment identifiées. Un patient suivi en consultation du département de génétique médicale de l'Institut National d'Hygiène était porteur de la mutation p.Tyr165Cys connue pour être récurrente dans la population caucasienne. Une deuxième mutation du gène *MYH*, la c.1186_1187insGG, a été retrouvée chez deux patients marocains vivant en Europe. Nous avons montré, en collaboration avec l'Unité INSERM U614 (Frebourg T), que cette mutation retrouvée par ailleurs et avec le même haplotype chez des malades d'origine algérienne, n'était pas rare dans la population marocaine (une personne hétérozygote sur 100). Par conséquent, la recherche de la mutation c.1186_1187insGG, au même titre que les autres mutations du gène *MYH*, devrait être indiquée chez les patients jeunes atteints de cancers colorectaux, en particulier si le cancer se développe sur une polypose avec un nombre limité de polypes.

7. LA NÉOPLASIE ENDOCRINIENNE MULTIPLE DE TYPE 2

La Néoplasie Endocrinienne Multiple de type 2 (NEM2) est le troisième type de cancers avec prédisposition génétique dans lesquels des mutations ont été rapportées chez des familles marocaines. Cette forme héréditaire du cancer médullaire de la thyroïde (CMT), de transmission autosomique dominante, est due à des mutations du gène *RET*. Certaines de ces mutations peuvent être à l'origine également de phéochromocytomes et plus rarement d'hyperparathyroïdie (NEM2 type A). Les corrélations génotypes-phénotypes sont assez précises dans les NEM2A et permettent, en fonction de la mutation identifiée, d'orienter le suivi clinique chez les patients. La mutation C634Y est une mutation

récurrente qui a été retrouvée chez une famille suivie au département de génétique de l'Institut National d'Hygiène et également rapportée par deux autres équipes (Ainahi *et al.*, Benazzouz *et al.*).

Au total, il ressort de ces premiers travaux réalisés au Maroc sur les prédispositions génétiques aux cancers, qu'il est nécessaire de mettre en place des consultations d'oncogénétique dans les principaux centres d'oncologie du royaume. L'objectif de ces consultations serait de reconnaître parmi les patients, ceux qui développent des tumeurs avec une prédisposition héréditaire, d'établir des diagnostics moléculaires et de proposer aux personnes apparentées à haut risque une prise en charge adaptée. Cette démarche doit être soutenue par des travaux prospectifs d'épidémiologie moléculaire, à fin de caractériser le profil mutationnel des patients marocains, et de rechercher en particulier des mutations récurrentes qui peuvent être intégrées dans des stratégies, peu coûteuses, de dépistage moléculaire. Les techniques d'investigation du génome, en particulier celles permettant la détection des mutations, deviennent plus en plus aisées, il est vraisemblable que cette démarche sera dans les années à venir intégrée la politique de prévention des cancers dans notre population.



APPORT DE LA BIOLOGIE MOLECULAIRE EN MEDECINE

Taieb CHKILI

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

1. INTRODUCTION

La médecine a connu, ces dernières années, un fulgurant essor grâce au progrès considérable qu'a induit la biologie moléculaire dans la compréhension des mécanismes physiopathologiques de certaines maladies héréditaires. Initialement, il n'y avait qu'une simple classification syndromique et clinique sans aucune avancée génétique ou physiopathologique.

Avec l'avancée actuelle qu'a connue la médecine en général par l'apport de la biologie moléculaire vers la fin des années 80, on a pu identifier des centaines de gènes impliqués dans plusieurs affections héréditaires expliquant ainsi leur mode de transmission. Ainsi, d'un simple traitement symptomatique, on est arrivé dans certaines maladies à un traitement étiopathogénique si l'anomalie en cause est par exemple une carence en vitamines telle que la vitamine E.

Aujourd'hui, nous assistons à une révolution thérapeutique grâce au développement de la thérapie génique qui ouvre des perspectives prometteuses.

2. RAPPELS FONDAMENTAUX

• Bases biologiques, stratégie d'identification de gène

Un organisme est constitué de milliards de cellules avec des fonctions bien précises dans chaque organe, chaque structure. La cellule humaine est constituée d'un noyau qui est une structure qui contient une substance appelée chromatine formant ainsi l'ADN ou acide désoxy-ribonucléique.

Cet ADN, découvert initialement en 1953 par les chercheurs CRICK et WATSON, est structuré en double hélice, constituée chacune de séquences de bases azotées appelées : adénine, cytosine, guanidine et thymine (1966).

La séquence d'ADN qui porte toute l'information nécessaire pour la production de protéine est appelée gène.

Le génome humain est organisé sous forme de chromosomes avec 44 paires de chromosomes et deux chromosomes sexuels.

Les chercheurs se sont intéressés au séquençage détaillé du génome humain, et en 2003, ce séquençage a été terminé avec une analyse de 3 milliards de paires de bases.

On décrit deux types d'affections héréditaires en médecine : les affections héréditaires mono géniques de transmission mendélienne avec intervention d'un gène majeur et de quelques gènes modificateurs avec parfois une légère intervention de l'environnement.

En revanche les maladies à hérédité complexe sont dues à plusieurs gènes de susceptibilité avec un effet important de l'environnement. Ces affections sont difficiles à analyser.

Les maladies mendéliennes touchent 1% de la population allant de 1 pour 160 000 dans la maladie de Wilson à 1 pour 2 500 dans la mucoviscidose. Le système nerveux central est touché dans plus de 40% des cas.

Les modes de transmission de ces maladies sont soit autosomique dominant : l'un des parent est touché avec une transmission verticale de génération en génération, ou bien autosomique récessive, les parents étant indemnes mais porteurs du gène et les enfants ont une chance sur quatre d'être atteints. Ou bien la transmission est liée à l'X avec la mère qui est le plus souvent transmetteuse de la maladie.

Pour un même phénotype clinique, on peut avoir plusieurs anomalies de gènes situées sur des chromosomes différents. C'est ce qu'on appelle communément l'hétérogénéité génétique.

Pour un même phénotype clinique, on peut observer des centaines de mutations différentes du même gène, c'est ce qu'on appelle l'hétérogénéité allélique. L'exemple type en est la Mucoviscidose (maladie respiratoire).

Par ailleurs, un gène avec la même mutation peut entraîner des phénotypes totalement différents : exemple de la Dystrophie musculaire d'Emery-Dreyfuss, Progeria (maladie de Hutchinson-Gilford), la Maladie de Charcot-Marie-Tooth et la Lipodystrophie partielle.

D'autres mutations particulières sont appelées mutations dynamiques qui sont dues à l'expansion de triplet de base (Cytosine Adénine Guanine) entraînant un aspect en smir sur les photographies de gel d'électrophorèse les allèles.

3. LES MALADIES NEUROLOGIQUES HÉRÉDITAIRES

40% des maladies génétiques sont neurologiques. Les exemples les plus fréquents sont ceux des myopathies héréditaires, les ataxies cérébelleuses, les neuropathies héréditaires,

les paraplégies spastiques, l'amyotrophie spinale progressive, la maladie de Parkinson, la maladie de Huntington et la maladie de Steinert.

4. LES PRINCIPALES DÉCOUVERTES NATIONALES

- 2002 : localisation du gène responsable du syndrome Dyggve-Melchoi-rclausen sur le chromosome 18q21.2 dont l'article a été édité dans *Journal of Medical Genetics*.
- 2002 : localisation du gène lié au syndrome de l'Ichtyose sur le chromosome 3q27. *Journal of Medical Genetics*.
- 1995 : localisation du gène de l'ataxie dominante avec dystrophie maculaire pigmentaire sur le chromosome 3p12 (SCA7) dont l'article a été publié dans *Nature Genetics*.
- 1999 : localisation du gène de la neuropathie axonale récessive sur le chromosome 1q21 (LMNA). *American Journal of Humain Genetics*.
- 2004 : localisation de la paraplégie spastique pure récessive sur le chromosome 14(SPG28). *Annals of Neurology*.
- 2005 : localisation d'une neuropathie sensitive mutilante associée à une paraplégie spastique récessive sur le chromosome 5q. *European Journal of Human Genetics*.
- 2006 : Découverte du gène CCT5 responsable d'une neuropathie sensitive mutilante associée à une paraplégie spastique récessive. *Journal of Medical Genetics*.
- 2007 : localisation d'une ataxie récessive avec spasticité à transmission autosomique récessive sur le chromosome 17p (SAX2) publié dans "*Human Genetics*".

5. LA STRATÉGIE D'IDENTIFICATION DE GÈNE

Les techniques d'identification et de localisation des gènes liés aux maladies génétiques se sont considérablement améliorées, grâce à l'automatisation des techniques moléculaires et grâce au développement de marqueurs couvrant la totalité du génome. La stratégie d'identification de gène se fait selon les étapes suivantes : en premier lieu, on propose une hypothèse physiopathologique intéressant une maladie. L'étude de liaison se fait grâce aux marqueurs microsatellites pour localiser le gène sur un chromosome.

L'approche du gène en cause se fait de deux manières soit en testant tous les gènes candidats susceptibles d'être impliqués dans le mécanisme physiopathologique, soit de cloner et de séquencer le gène impliqué dans cette affection.

6. LES CONSÉQUENCES DE LA DÉCOUVERTE DE GÈNES

En premier lieu, la biologie moléculaire a enrichi les possibilités en matière de diagnostic puisqu'à partir d'un locus connu on pourra génotyper des individus malades par mise en

évidence du gène responsable de l'affection, ce qui permet et de manière définitive d'affirmer ou d'infirmer le diagnostic évoqué, surtout devant l'existence de manifestations frustes ou atypiques et de faire un diagnostic différentiel.

En second lieu, cette approche a permis la mise en place du conseil génétique qui a pour but d'évaluer le risque de survenue ou de récurrence d'une maladie ou d'une malformation dans la descendance d'un couple, de proposer à celui-ci les différentes solutions de prévention qui s'offrent à lui et de l'aider dans sa décision. La flambée de tout ce progrès a nécessité d'élaborer des règles d'éthique médicale afin de codifier l'exploitation des données de la biologie moléculaire dans les domaines aussi bien thérapeutiques que préventifs.

L'exemple en est donné par le diagnostic prénatal qui désigne l'ensemble des examens mis en oeuvre pour le dépistage précoce des maladies ou des malformations du fœtus et qui se déroule sous contrôle échographique pour pouvoir repérer le fœtus et de prélever le liquide amniotique sur lequel se fera l'analyse génétique (caryotype pour détection anomalie chromosomique (ex. la trisomie 21), ou la recherche de gène codant d'une maladie mono génique ou sa mutation).

7. LA THÉRAPIE GÉNIQUE

Les progrès de la branche ingénierie de la génétique " le génie génétique " a pu dépasser le stade de la simple étude en permettant de modifier le génome, d'implanter, supprimer ou modifier de nouveaux gènes dans des organismes vivants. Ainsi a été ouverte une nouvelle voie d'approche thérapeutique : la " thérapie génique ". Celle-ci consiste en l'introduction, grâce à un vecteur, dans une cellule, d'une séquence d'information génétique (ADN ou ARN) permettant au sein de cette cellule, soit la synthèse d'une protéine manquante, soit une modification spécifique de l'expression du programme génétique de cette cellule (ex : un signal qui conduira à la mort cellulaire, cellule infectée ou cancéreuse).

Ce concept thérapeutique repose sur 3 méthodes:

- *in vivo* : Injecter le vecteur portant le gène d'intérêt thérapeutique directement dans la circulation sanguine, celui-ci devant atteindre spécifiquement les cellules cibles
 - *ex vivo* :
 - prélever les cellules cibles (ex: cellules sanguines),
 - modifier génétiquement avec le vecteur viral porteur du gène d'intérêt thérapeutique,
 - réintroduire chez le patient.
 - *in situ* : Le vecteur de transfert est directement injecté au sein du tissu cible.
- Le vecteur dans le cadre de la thérapie génique est généralement un virus car celui ci est composé de matériel génétique (ADN ou ARN) entouré d'une couche protectrice formée de protéine, donc il n'est pas détruit par le système immunitaire humain, et s'introduit ainsi à l'intérieur de la cellule humaine pour insérer son propre matériel génétique. Pour

ce:

- on rend le virus non pathogène pour qu'il ne puisse plus nuire à la cellule qu'il infecte.
- on conserve la couche virale extérieure pour qu'il ne soit pas détruit par l'immunité humaine.
- et on modifie le matériel génétique interne : gènes délétères supprimés et remplacés par des gènes thérapeutiques afin de transmettre l'information génétique souhaitée.

7.1. Thérapie génique: Les gènes d'intérêt

7.1.1. Traitement de maladies héréditaires liées à un seul gène

- **Mucoviscidose** (administration du gène par aérosol, essai clinique)
- **Hémophilie** (facteurs de coagulation réintégré dans des cellules de la peau, essai clinique).

7.1.2. Lutte contre le cancer

- **Immunothérapie** (rendre les cellules cancéreuses des cibles des défenses immunitaires humaines).
- **Sensibiliser** les cellules cancéreuses à des médicaments (enzyme qui active un médicament).

7.1.3. Lutte contre les troubles du système nerveux

- **Epilepsie** (son mécanisme physiopathologique est la non réabsorption du glutamate par les cellules) et pour parvenir à interrompre ce mécanisme on propose :
 - Insertion d'un transporteur de glucose pour lutter contre l'excès de calcium.
 - Insertion d'une protéine qui empêche l'autodestruction de ces neurones.
- **Maladie de Parkinson** (son mécanisme physiopathologique est la destruction accélérée des neurones de la substance grise provoquant un déficit en dopamine) ce qui induit deux possibilités thérapeutiques :
 - soit l'augmentation de la production de l'enzyme fabriquant la dopamine.
 - soit la greffe de cellules souches fœtales ayant incorporé une protéine bloquant le suicide cellulaire.

• La myopathie de Duchenne

Différentes techniques ont été élaborées permettant d'introduire le gène de la dystrophine dans les muscles de la souris modèle mdx dépourvue de cette protéine. Après trois mois la dystrophine s'exprime.

8. CONCLUSION

La biologie moléculaire a bouleversé la médecine en général et la neurologie en particulier.

Nous sommes passés de simples classifications cliniques neurologiques basées seulement sur les syndromes et sur un simple examen clinique à des classifications génétiques et physiopathologiques et même dans certains cas à un traitement. Le progrès que connaissent maintenant les techniques de thérapie génique donne espoir pour de nouvelles pistes thérapeutiques à ces affections qui restent handicapantes pour les malades et pour leurs familles.

SESSIONS 2 et 3

DISCUSSION

Sergio CARA (Académie des Sciences d'Italie)

I will put your attention on the photovoltaic process. What is the area needed to generate the required power? The full energy consumed in the world can be produced in a tropical land with a square area with a side of 500km. The present energy employed in Italy can be produced in a land area with a side of 60km. I didn't make the calculation for Morocco, but I think that is less than 60km, so it is sufficient to cover about 0.17% of the territory. At the present, the situation of the photovoltaic energy is of limited capacity, but there are interesting perspectives that are arising.

There is one more example of the research in progress aimed to obtain a device that is using layers of organic material to catch the solar radiation of relatively low yield but low cost. The hybrid systems of monorods also are very effective. If you want to catch all the radiations, we need a technological advance that can use a quantum wall of solar cells to take different frequencies and improve efficiency.

And now I want to put your attention on the photosynthesis that deserves new research. It is possible to design a new photosynthetic system with artificial reaction centres. We need a cellular antenna to harvest solar energy. Here, there is an interface between biology, chemistry and engineering.

Albert SASSON (CSTV)

Par la tenue d'une session plénière annuelle, l'Académie est dans son rôle premier d'abord de soutenir la recherche et j'ai montré dans mon introduction en quoi les présentations de cette après-midi étaient liées très étroitement au soutien à la recherche par l'Académie. Deuxièmement, je pense que nous avons une mission, c'est de dire un avis et de le dire d'abord à notre tuteur, le Chef de l'Etat, de le dire au Premier Ministre et au Conseil des Ministres, de le dire à tout le monde. Or, il me semble que sur les deux thèmes de l'énergie et de la biotechnologie appliquée à la médecine et à la pharmacie, nous pouvons si nous voulons, et si notre Secrétaire Perpétuel nous le demande, poser un diagnostic et donner un conseil. Le diagnostic ressort bien sûr de la situation mondiale, ensuite nous avons voulu zoomer sur la situation marocaine qui est modeste, difficile et compliquée. Nous pouvons donc dire voilà la situation et voilà ce que l'Académie soutient et va soutenir. Nous ne sommes pas des donneurs de leçons, nous agissons, nous donnons un avis et c'est une mission première.

Francisco GARCIA-GARCIA (CSTV)

Le développement durable est basé sur 3 piliers : économique, social et environnemental. Le message important que l'académie se doit d'envoyer à la communauté scientifique du Maroc est la priorisation des axes de recherche dans le pays. Pour tirer une valeur ajoutée de la présence des membres étrangers de l'académie et pouvoir analyser l'efficience et la pertinence de leur visites, au moins à l'occasion des sessions plénières, il y'a lieu de prévoir, comme mécanisme d'ouverture et d'implication de l'Académie, des visites aux centres et instituts de recherche pour rencontrer des jeunes chercheurs marocains.

L'une des directives de Sa Majesté le Roi est que la recherche doit avoir une utilité, un caractère appliqué et une valeur ajoutée et qui répond aux attentes de la société. La recherche doit être focalisée sur la demande des secteurs productifs et du monde de l'entreprise.

Malik GHALLAB (CSMI)

J'ai deux remarques ponctuelles et une un peu plus générale sur cette journée effectivement très dense et très intéressante. Mes remarques ponctuelles portent sur le volet énergie où l'essentiel de notre attention s'est focalisée sur la production et accessoirement sur le stockage de l'énergie. Très peu de choses ont été dites ou développées sur le volet consommation de l'énergie. On dit que si on améliore le rendement dans l'une des bases que l'on maîtrise aujourd'hui des aspirateurs domestiques en Europe, on gagnerait une tranche nucléaire. Si on améliore le rendement des réfrigérateurs en Europe, on gagne une autre tranche nucléaire. Donc, si on passe à l'éclairage froid en Chine, on gagne 400 tranches nucléaires. Une façon de transposer le fait que nous ne cherchons pas à économiser mais nous cherchons à étendre par le développement c'est de dire que nous allons développer les capacités d'éclairage au Maroc à travers l'éclairage froid et ainsi de suite sur un certain nombre d'autres exemples. Donc, je pense que le volet consommation qui peut nous permettre, en partant de la base actuelle de 0,4 TEP/habitant, de doubler nos capacités d'assimilation de l'énergie.

Une deuxième remarque ponctuelle porte sur les énergies renouvelables. Là aussi beaucoup de choses extrêmement intéressantes ont été dites, je voudrais soulever l'importance de technologies légères, voire même de microtechnologies si je prends le risque d'une confusion dans le sens de production comme il a été question, dans la présentation de Philippe Tanguy, des centrales thermo-solaires. Le fait de penser à des technologies légères à la portée de la bourse d'un particulier pour installer un four de village, pour un bain de village, pour un atelier d'artisanat offre un champ de développement qui est considérable. Je pense que là, il y'a aussi un relais important à développer

Ma dernière, et troisième, remarque générale est de s'interroger sur qu'est ce que les deux volets de cette journée ont de commun, c'est le besoin d'interdisciplinarité. La présentation de Gerald Fuller était une belle illustration. L'interdisciplinarité est le besoin essentiel que je ressens aussi bien pour aborder les biotechnologies dans le domaine médical que le volet énergétique. Ce dénominateur commun, je le recommanderais comme un élément important et un levier dans le développement des projets que finance notre académie. Il faut réellement que nos projets les plus ambitieux retrouvent une composante interdisciplinaire forte.

Philippe TANGUY (CITIT)

Dans mon intervention ce que j'ai voulu brosser c'est un état des lieux de la production. J'ai bien mentionné la question de la maîtrise énergétique et je voudrais vous renvoyer tous à un ouvrage intitulé «Herito energitico» qui a été écrit par notre collègue Valeriano Ruiz et qui fait un point fort intéressant de la manière dont nous consommons notre

énergie et qui brosse finalement un tableau un peu sombre. Lorsqu'on veut utiliser localement dans notre maison de l'énergie électrique, on a juste un mouvement à faire c'est d'appuyer sur le bouton et on déclenche un phénomène épouvantable à des centaines de kilomètres dans une centrale nucléaire ou à charbon. L'utilisation de microtechnologies locales est tout à fait quelque chose de réaliste.

Noureddine EL AOUI (CESDE)

Madame Benkhadra a parlé d'une série de réformes institutionnelles dans le domaine de l'énergie en indiquant qu'il y'a une inflexion dans la politique énergétique depuis quelques années ; au niveau du cadre institutionnel, il y'a un processus de libéralisation qui est enclenché et le souci de sécurité dans le domaine énergétique. J'aurais aimé que Mme Benkhadra nous parle des dispositifs de régulation. Ma deuxième interrogation porte sur le panorama qu'elle a fait et là ça rejoint un peu une préoccupation personnelle constante qu'est la dimension institutionnelle et politique de la science et de la réflexion qu'on doit mener au niveau de l'Académie. Par rapport à la politique énergétique du Maroc, comme Mme Benkhadra a parlé des défis et des opportunités, il y'a l'hypothèse maghrébine qui a été omise dans son exposé.

Philippe TANGUY (CITIT)

Il y'a de par la composition du Maghreb des échanges évidents, mais cela dépasse de loin le cadre de cette assemblée. Je pense que, une fois réglée au plan international la question du Sahara marocain, on peut espérer probablement de très grands développements sur le plan énergétique dans cette région. Là encore, il y'a une hypothèque politique et ce n'est pas à nous de traiter la question.

Ali BOUKHARI (CITIT)

Je voudrais développer un seul point. En tant qu'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, nous devons participer à l'émergence d'une recherche de qualité dans les deux domaines de l'énergie et des biotechnologies. Ceci est très important pour nous, pour tout chercheur marocain que ce soit au Maroc ou à l'étranger, parce que le défi est énorme concernant ces deux thèmes. Alors, une recherche de qualité demande tout d'abord des ressources humaines de qualité et ceci implique un échange d'expériences et de procédés à l'échelle nationale et internationale. Nous avons besoin aussi d'un certain nombre de plateformes technologiques, et il me semble que c'est un des volets que notre pays développe. Je pense aussi que nous sommes encore en dessous des aspirations de nos chercheurs et je suis sûr et certain que notre académie participera de près et aidera à ce que ces plateformes se développeront de mieux en mieux surtout pour la partie biotechnologies où il y'a encore du matériel qui manque dans ce domaine.

Aymen Cheikh LAHLOU (Orateur invité, Cooper Maroc)

Je ne voudrais pas qu'on retienne de ma présentation qu'il y'a des difficultés qui nous empêcheraient de penser. Non, nous sommes déjà en tant qu'industriels pharmaceutiques

marocains, et pas les seuls, actifs et tout à fait à l'écoute de toute initiative de cette coordination / communication entre les différentes universités, entreprises et le financement. Ce que nous avons fait dans ma société déjà concrètement (1) sur la biotechnologie, il y'a déjà un projet de conditionnement, de fabrication secondaire après cette première phase de produits importés. Deuxièmement nous sommes sur ce projet avec des canadiens et des partenaires d'Amérique latine. Mais là où nous sommes plus avancés, je voulais partager ça avec vous, c'est au niveau du cancer. Au niveau de Cooper, nous sommes à la veille de la construction de la première unité des anti-mitotiques d'Afrique selon les normes de la USFDA et des agences européennes. On fait cela avec le numéro deux indien qui a le know how et qui exporte aux Etats Unis. C'est un projet capitalistique qui est prêt. La technologie est là, les cadres marocains sont formés, les terrains sont là, et les procédures sont disponibles. Et puis nous avons des accords avec le troisième groupe sud africain et le premier groupe sud américain pour essayer d'écouler ce genre de produit qui obéit à une logique industrielle et des minima à atteindre.

Le plus important, et qui me tenait à cœur, c'est d'intervenir dans le domaine de la santé pour notre région sachant que rien ne peut être réalisé s'il n'y a pas d'action en amont concernant notamment le diagnostic. J'ai beaucoup aimé ce qui a été dit sur l'interdisciplinarité, l'interdépendance, la communication. C'est quelque chose que j'ai touché du doigt lors de mes études universitaires.

SESSION 4

**CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET
PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT**



LE CHANGEMENT CLIMATIQUE IMPACT, PRÉVENTION, ADAPTATION QUELQUES RÉFLEXIONS POUR UN DÉBAT

Jean-François MINSTER

Directeur du Département de la Recherche (TOTAL S.A), France

Résumé

Les impacts du changement climatique concernent à la fois le système physique du climat (précipitations, élévation du niveau des mers, intensité des phénomènes extrêmes...), l'écosystème et nos économies et sociétés. On comprend mieux les impacts physiques et l'attribution des évolutions observées aux conséquences du changement climatique que les autres sujets. Par exemple, discerner les évolutions des écosystèmes dues à leurs dynamiques propres ou aux autres effets anthropiques reste un sujet de recherche.

Etant donné que le changement climatique semble aujourd'hui inéluctable, la question de l'équilibre entre prévention (par développement des économies d'énergie, des énergies renouvelables et par captage et stockage des gaz à effet de serre) et adaptation se pose. On peut noter que les deux démarches sont en cours de déploiement mais qu'elles sont par essence très différentes : la prévention est une politique de long terme, nécessitant de fortes politiques publiques et des démarches internationales sur les secteurs clés que sont l'énergie, le transport et l'habitat. A contrario, l'adaptation est un mécanisme d'effet immédiat, concerne tous les secteurs, et relève le plus souvent de politiques locales. Un des enjeux du futur consistera à construire des démarches où la synergie entre adaptation et prévention joue de façon positive.

Impacts

- ▶ **Système physique**
- ▶ **Écosystème**
- ▶ **Santé, économie, société**



2

Impacts sur le système physique du climat

Effets « secondaires »

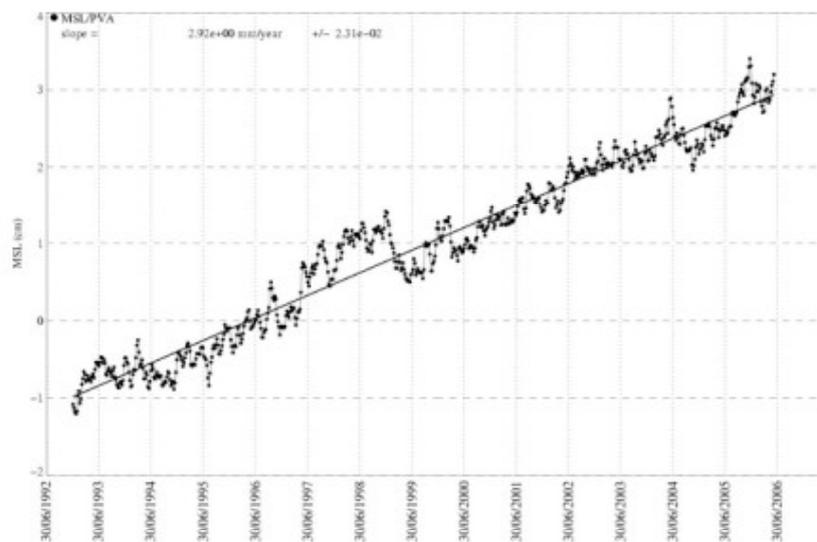
- ▶ **Météorologie**
 - Vent (trajectoire, intensité)
 - Enneigement
- ▶ **Phénomènes extrêmes**
 - Canicules, précipitations, cyclones
 - Marées-tempêtes
- ▶ **Glaces de mer, permafrost**
- ▶ **Niveau des mers, érosion côtière**

....

3



Évolution du niveau des mers

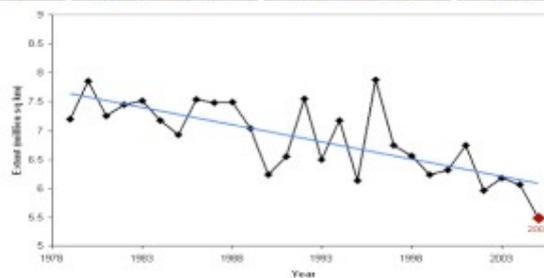
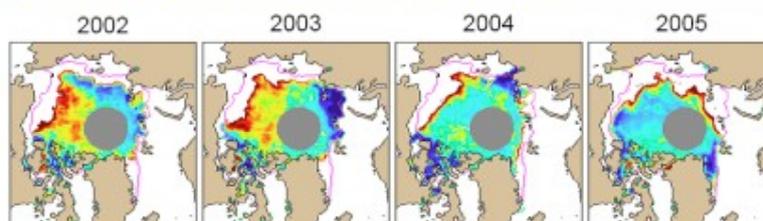


4



Étendue des glaces de mer

The perennial sea ice cover in the years 2002 and 2005 was the least extensive during the satellite era.

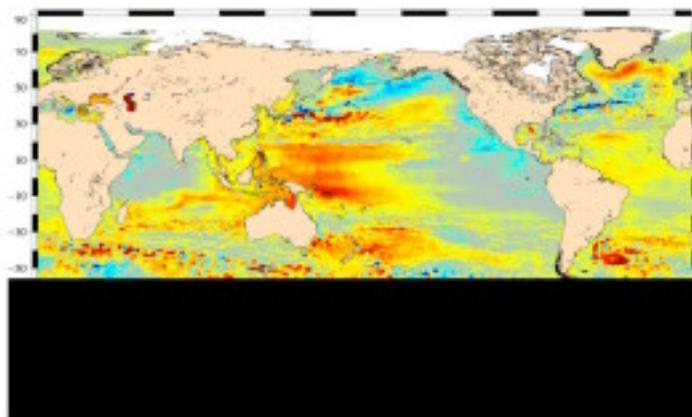


5



Carte d'évolution du niveau des mers

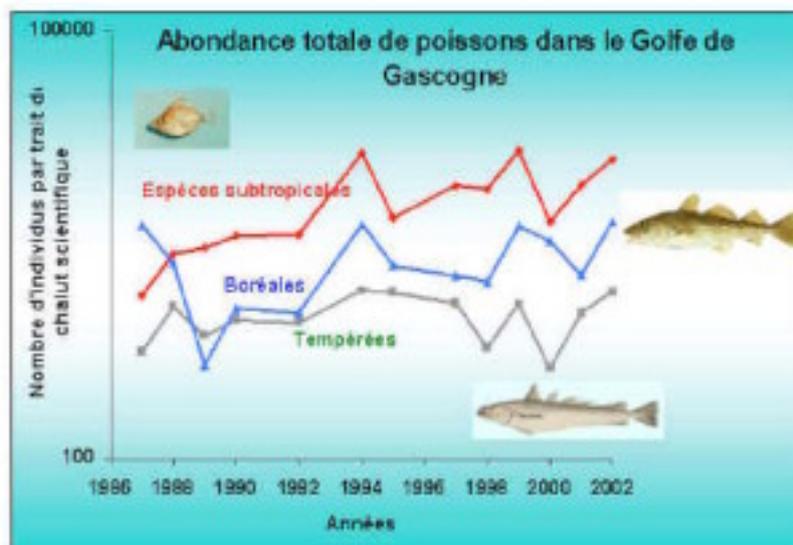
MSL/PVA trends (Period : 1992-10-14 to 2006-06-07)



Impacts sur les Écosystèmes

- ▶ **Nombreuses évolutions constatées**
 - Insectes, oiseaux migrateurs, ours blancs...
- ▶ **Quels mécanismes?**
- ▶ **Comment démontrer que la cause des évolutions est le changement climatique ?**





Les mécanismes des impacts écosystémiques

- ▶ Effets physiologiques sur les espèces
 - Croissance (végétaux)
 - Reproduction – Survie hivernale
- ▶ Effets sur les habitats
 - eg glaces de mer
- ▶ Effets de chaînes trophiques
 - Décalage temporel des cycles saisonniers
- ▶ Effets de migration

Nombreux effets environnementaux

(Température, hydrométrie, saisons, phénomènes extrêmes)

Des changements écosystémiques subtils

Un réchauffement rapide/mécanismes d'adaptation



Causes des évolutions écosystémiques (1)

- ▶ Dynamique naturelle des écosystèmes
- ▶ Multiplicité des effets anthropiques variables dans le temps et localement dominants
 - Agriculture, exploitation des forêts
 - Habitats, génie civil...
 - Transferts d'espèces
 - Pollutions

L'attribution des changements écosystémiques au changement climatique reste une question scientifique ouverte et difficile

10



Causes des évolutions écosystémiques (2)

L'exemple des espèces halieutiques

- ▶ Connaissance des variations environnementales et des activités de pêche
- ▶ Études d'espèces variées (tendances longues)
 - Espèces d'eaux chaudes et froides, pêchées ou non
- ▶ Études des mécanismes physiologiques
 - Efficacité énergétique
- ▶ Études des cycles trophiques et des populations
 - Flux de consommation; reproduction; migration

Le changement climatique est la cause la plus probable

11



Impacts sur la santé, l'économie et la société?

► S'ajoutent à des effets dominants et indépendants

- Système de santé
- Développement technologique et dynamique économique
- Choix politiques

*Adaptation du système énergétique
et des modes de consommation*

Migrations des populations

12



Prévention

Stabiliser la concentration des gaz à effet de serre

- Économie et efficacité énergétiques
- Énergies renouvelables et nucléaires
- Capture et stockage de carbone

« Facteur 4 »

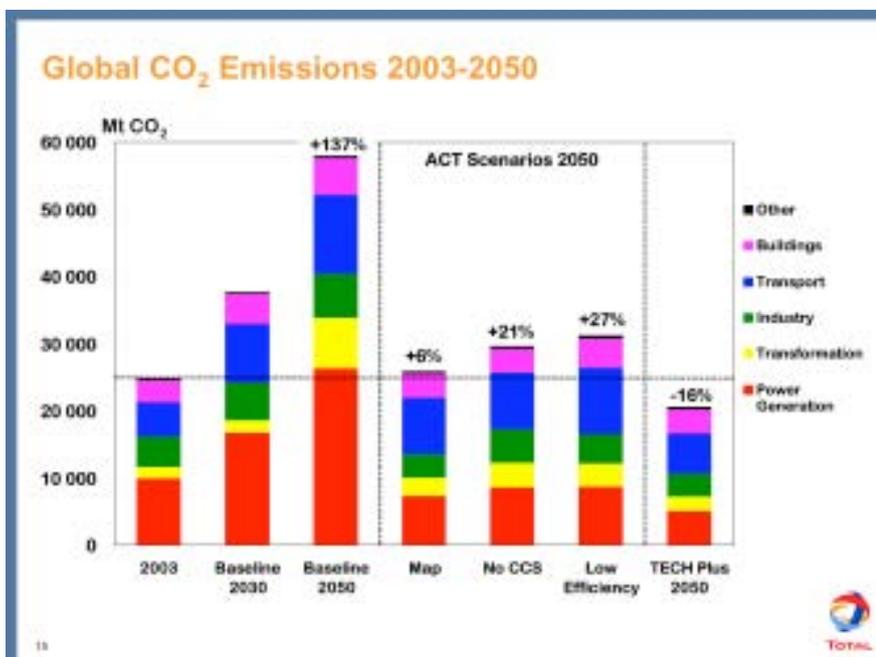
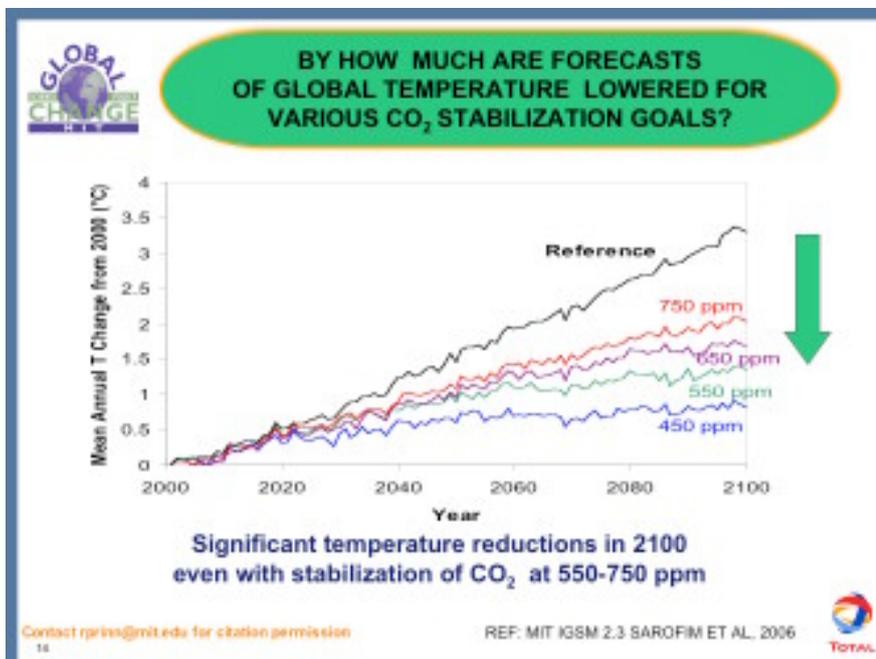
Nécessaire combinaison

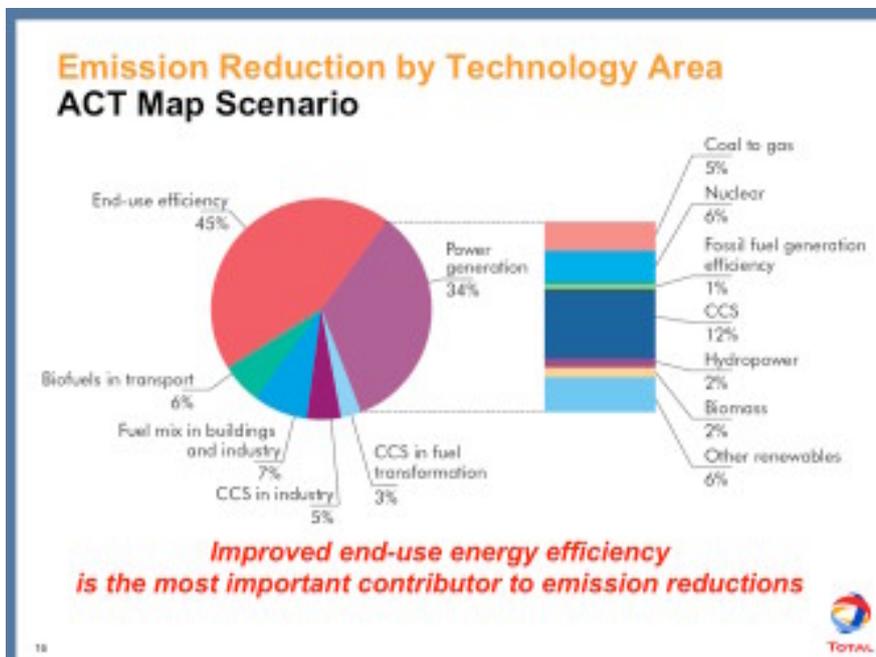
Transformation multi-décennale

Effets à très long terme

12







Adaptation

- ▶ Infrastructures, rivières, routes, habitat...
- ▶ Agriculture, forêts, écosystèmes
- ▶ Économie
 - Énergétiques et société

...

Réchauffement inévitable
Adaptation continue déjà engagée

17

Prévention

- ▶ Long terme
- ▶ Mondial
- ▶ Concentré sur quelques secteurs
- ▶ Politiques publiques nécessaires

Adaptation

- ▶ Immédiat
- ▶ Local
- ▶ Toutes activités
- ▶ Tous acteurs

Viser les synergies positives

Conclusions

- ▶ Si le changement climatique et ses causes probables font de moins en moins l'objet de débat, la question des impacts reste ouverte.
- ▶ Il faut dépasser le débat « prévention versus adaptation » et gérer leur combinaison de façon à en favoriser la synergie.
- ▶ Le mouvement est lancé mais est-il assez rapide et intense?



CHANGEMENT CLIMATIQUE LES LEÇONS DE LA MODÉLISATION

Hervé Le TREUT

Membre de l'Académie des Sciences (France)
Directeur du Laboratoire de Météorologie Dynamique
(CNRS/Ecole Normale Supérieure/Ecole Polytechnique/Université Paris 6)

Résumé

Depuis les années 80, la communauté scientifique a porté un message d'alerte concernant les risques climatiques associés à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Les émissions de GES ont fortement augmenté après la deuxième guerre mondiale, et l'effet de réchauffement climatique en réponse, retardé en particulier par l'inertie thermique des océans, ne s'était à cette époque pas encore clairement dégagé des fluctuations climatiques naturelles. Depuis cette date l'évolution de la recherche scientifique est venue confirmer ces résultats. Le dernier rapport du GIEC établit clairement que les évolutions climatiques récentes sont désormais, à 90% de probabilité, la conséquence des activités humaines. Il confirme aussi, sur la base d'une nouvelle génération de modèles, que les changements futurs seront beaucoup plus élevés que les modifications que nous avons connues jusqu'à présent. Les conséquences possibles sont de plusieurs ordres: (i) effet direct du réchauffement, très sensible en Arctique, mais susceptible aussi d'avoir un impact sur la biosphère dans tous les pays de la zone intertropicale; (ii) effet des variations de précipitations; (iii) fragilisation des zones côtières en réponse à l'augmentation du niveau de la mer (de 20 à 50 cm d'ici la fin de ce siècle, mais avec une amplification éventuelle par la fonte du Groënland et de la péninsule Antarctique, qui reste difficile à mesurer). L'Afrique du Nord constitue une région particulièrement vulnérable, et de nombreuses projections indiquent qu'elle pourrait être affectée par des sécheresses importantes. Une part des conséquences potentielles ne peut se formuler qu'en terme de risques – et ce d'autant plus que le problème du climat se croise désormais avec une longue série de problèmes assez différents, mettant tous en cause à l'accès aux ressources naturelles et leur protection: eau, pollution urbaine, épidémies et santé, Mais ces risques sont suffisamment établis, pour que le principe d'une action collective urgente s'impose, en terme de diminution des émissions de GES, mais aussi d'adaptation à la part inéluctable des changements.



Hervé Le Treut, membre de l'Académie des Sciences (France).



ENVIRONMENT OF NORTH AFRICAN DESERTS AS SEEN FROM SPACE

Farouk EL-BAZ

Center for Remote Sensing, Boston University, U.S.A.
Associate member of the Hassan II Academy of Science and Technology

During the past three decades, images of the Earth were obtained from space platforms with increasing clarity and detail. These images provide a valuable tool to study the desert environment and monitor its changes in space and time. They are ideal for understanding the processes of transportation and accumulation of both sand grains and surface water. Sand in the Sahara was produced by the erosion of solid rock and the transportation of the resulting particles by rivers and streams, during wet climates, to inland topographic depressions. Radar images from space reveal numerous sand-buried courses of former rivers and streams that led to these depressions in the geological past. During dry climate episodes, after the evaporation of the lake water, the wind began to sort the lake deposits and sand grains were shaped into various dune forms. Thus, areas with large accumulations of sand (dune seas) lie above much groundwater from seepage of the lake water into the substrate during past wet climates. In addition, fractures in solid rock constitute zones of weakness. These zones, which are easily mapped from space images, control most patterns of surface water drainage. Because they represent areas of increased porosity, they facilitate groundwater accumulation. Therefore, interpretation of satellite images provides a clear history of the desert and its evolution, and allows a better understanding of its environment.

1. GENERAL SETTING

Sahara is an Arabic word for desert. To distinguish it as the largest desert in the world, the Arabs called northern Africa *Al-Sahara Al-Kubra*; the Great Desert, which measures about 9,065,000 sq km. This vast desert is bounded on the north by the Atlas Mountains of Morocco and the Mediterranean Sea. From the Atlantic Ocean in the west, the Sahara extends 4,830 km to the Red Sea in the east. From the coast of the Mediterranean Sea it stretches southward about 1,930 km to the Sahel, a steppe region that is named after the Arabic word meaning border area or shoreline.

The northern tier of the Sahara includes, from west to east, the entire countries of Algeria, Tunisia, Libya and Egypt. Its southern tier includes parts of Morocco and the northern segments of Mauritania, Mali, Niger, Chad and Sudan. At the Sahara's southern border, the Sahel stretches from Senegal eastward to Chad, Sudan and Ethiopia.

The western part of the Sahara is usually referred to as the *Maghreb* (Arabic for sunset, or west). Its eastern part is commonly divided into three regions: the Libyan Desert, from the Nile River west through Libya; the Nubian Desert in southern Egypt and northern Sudan; and the Eastern Desert, from the Nile Valley east to the Red Sea (Gautier, 1935). Oases occur in depressions where the water table is high. These oases acted as resting and resupply posts for the ancient trade routes throughout North Africa (Gil, 2002).

Surfaces of the southern Sahara overlie a vast sandstone sequence several kilometers in thickness, called the Nubian Sandstone (from a sequence in the eastern part of North Africa). This layer of sandstone is overlain in numerous places by shale layers of Cretaceous age that are topped by plateau-forming limestone of Eocene and younger ages (Mainguet, 1999).

About 70% of the Sahara is covered by stone plateaus of denuded rock (*hamada*) or areas of coarse gravel (*reg*). High mountains rise in the central Sahara, including the Hoggar in southern Algeria (2,740 m); the Air Mountains in northern Niger (1,830 m); and the Tebesti Massif in northern Chad (3,350 m). These mountains together with oases and transition zones occupy about 15% of the surface. On average, the remaining 15% is occupied by sand dune fields (*ergs*). In some regions, the sand covers a much larger percentage of the terrain. For example, 27% of the total area of the Western Desert of Egypt (681,000 sq km) is covered by sand in the form of sand sheets and sand dunes (Gifford *et al.*, 1979).

The climate of North Africa is one of the harshest in the world. The Aridity Index of the eastern part of the Sahara is 200, meaning that the received solar radiation is capable of evaporating 200 times the amount of rainfall (Henning and Flohn, 1977). For example, it is common that the cloud cover over Siwa Oasis in northwestern Egypt is zero per year (El Baz, 1979). There, it might rain only once in 20 to 50 years. Thus the relative humidity can be as low as 5% and rarely exceeds 30 percent.

Daytime temperatures are exceedingly high throughout the Sahara. The highest official temperature in the shade of 58° C was measured in the Libyan Desert at Azizia. Daily variations can be uniquely high and reach a diurnal range of 30° C. During winter, from December through February, below freezing temperatures are common. The present hot and dry climate results in a vegetation free surface, where the rocks and soils are easily identified in space images.

2. SPACE IMAGES

The Earth has been the object of intensive exploration from space during the last 40 years. It was realized that photographs from space are particularly useful in the identification of surface features in remote areas. They are also ideal for monitoring the changes to the environment in space and time, by comparing images of a region to others obtained at a later time (El-Baz, 1998).

These factors were most important in the study of the origin and evaluation of arid landforms of the Earth. Images from space presented a unique tool to study the deserts because: (i) arid regions are usually free of clouds and are easy to photograph from above; (ii) a space photograph covers a large area and allows the recognition of regional patterns; and (iii) due to the lack of scarcity of vegetation cover, a space photograph can be considered a map of the chemical composition of the exposed rocks, soils and sands (El-Baz, 1988).

Imaging of the Earth from space began with the manned Gemini, Apollo, Skylab, Apollo-Soyuz, and Space Shuttle missions (El-Baz, 1988). Photographs on these missions were mostly obtained by cameras aimed by astronauts at important features or significant phenomena. In addition, the unmanned Landsat program introduced in 1972 digital, multi-spectral imaging from space. In this case, the image data are transmitted to ground receiving stations for processing and distribution.

For data acquisition from Earth orbit, unmanned and manned spacecraft are planned to fly in high, medium, or low orbits. The highest orbits are left to the unmanned weather satellites, such as Meteosat of the European Space Agency (ESA). These are propelled to a height of 36,000 km above the Earth. At this altitude, their motion is equivalent in speed to the rotation of the earth about its axis. Such satellites are termed geostationary, and they remain above the same point on the Earth to acquire and transmit repetitive images as frequently as hourly (El-Baz, 1998).

At the lowest orbits, most manned missions are placed below 350 kilometers, to a minimum of 150 km above Earth. For example, the Space Shuttle operational altitude is about 250 km. From this altitude, images show greater details such as those of the Large Format Camera, which produced images at 10-meter resolution (El-Baz, 1998).

Intermediate orbits, from 500 to 1000 kilometers above the Earth, are left to most unmanned imaging satellites. For example, the polar-orbiting satellites of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) fly at altitudes of 835 to 870 km; the near polar orbits of the Landsat reach a maximum altitude of 920 km above the Earth; and the French digital imaging satellites, *Système Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) operated from an altitude of 830 km or less. Images collected from these altitudes provide greater local detail than is possible from the high-altitude satellites (Lillisand and Keifer, 1994). In general, the lower the orbit, the higher the ground resolution of the photographs.

Satellite images that proved most useful in the study of desert landforms include the following: (i) Landsat multi-spectral images, particularly those of the Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+); (ii) radar images such as those of the Shuttle Imaging Radar (SIR), the Canadian Radarsat or the Japanese ALOS; and the topographic data that were recently acquired by the Space Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

The Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) provides global multi-spectral coverage at 15 m pixel resolution. Bands 7, 4 and 2 were found to be most useful as they have low

correlation; when combined they produce high-contrast images suitable for geological interpretation (El-Baz, 1988). These data clearly depict the various dune forms of the Sahara.

Radar images that cover the whole of the Sahara were obtained by Radarsat-1, an earth observation satellite developed by the Canadian Space Agency (CSA). Its imaging system uses a single frequency, 5.7 cm horizontally-polarized C-band of 12.25 m spatial resolutions. The images are processed by geo-referencing the data using ENVI 4.2 software in order to enable the cross-location of features. They are digitally enhanced using the Laplacian Edge Enhancement (LEE) filter to reduce the effect of speckle and improve the visual interpretation. In Radarsat data, bedrock surfaces and coarse deposits appear bright because of diffuse reflection. However, smooth fluvial deposits appear dark owing to specular reflection of the radar wave away from the receiving antenna (Robinson et al., 1999 and 2007).

The detailed topography of the Sahara was provided by the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). These data show the relative heights of the surface features and allow mapping of drainage patterns. The SRTM data include a C-band wavelength (5.7 cm), which enables penetration of the surface sand cover to reveal channels of former rivers and streams (Ghoneim & El-Baz, 2007).

3. DUNES OF THE SAHARA

Space views of the Great Sahara show that surface winds trend in an arcuate pattern that emanates from the direction of the Mediterranean Sea. This is based on the fact that dune lines indicate the direction of the prevailing wind. Satellite data show that this pattern changes from southward in the northern part of the desert to westward along the borders with the Sahel.

This pattern was first suggested for the region of the eastern Sahara based on field mapping by Bagnold (1941). It was also mapped in the rest of the Sahara based on meteorological satellite data (Mainguet, 1999). Wind-produced erosional scars throughout the desert suggest that this regime was effective during much of the last million years. Sand dune chains in the Western Desert of Egypt are consistent with the persistence of this regime, at least during the past 5,000 years (El-Baz, 2000).

In the eastern Sahara, sand-carrying wind moves toward the south during most of the year. However, the direction may be slightly affected by local topographic prominences. The rate of motion of dunes as measured in the Kharga depression of the Western Desert of Egypt varies from 20 m per year for the large barchan (crescent-shaped) dunes to 100 m per year for the smallest (1 m high) barchan dunes. Seasonal winds from the south do occur, particularly in mid-Spring, but these whirl dust in the atmosphere and are not significant transporters of sand (El-Baz, 1988).

As shown by SRTM topographic data, sand accumulations of the Sahara occur within topographic depressions. This must be explained in any theory regarding the origin of sand and the evolution of dune forms in space and time. Also, the dune sand is composed mostly of well-rounded quartz grains (El-Baz & Warner, 1979). The exposed rocks to the north of the sand seas are mostly limestones, which could not have been the source of the vast amounts of quartz sand.

These two facts cannot support the conventional view of the origin of the sand by wind erosion and its transportation from the north. The majority of the sand appears to have formed by fluvial erosion of sandstone rocks exposed in the southern part of the Sahara. Because areas presently covered by dune sand are topographically low, they must have formed inland basins that received sediments from northward flowing stream channels in the geological past. When the conditions of climate changed to dry, the wind from the north sculpted these sediments into various dune forms and sand sheets. This suggests that the Great Sahara is a region of sand export; an area of negative sediment balance. Some of the transported sand accumulates in the Sahel belt south of the Sahara; an area of positive sediment balance (Mainguet, 1992 and 1995).

Large sand dune accumulations form numerous sand seas in the Sahara. Some of these dune masses cover vast areas. For example, the Great Sand Sea alone covers 72,000 sq km, where densely packed dunes are confined in a relatively low area in the north and linear forms in the south with sand-free corridors in between (Gifford *et al.*, 1979).

In the Great Sand Sea, long sand bodies were called «whaleback» dunes by Bagnold (1941) who theorized that they grew so large that they no longer could move. However, dunes move because individual sand grains are dislodged by the wind, as Bagnold himself noted. Furthermore, cross-sections made into these dunes show that the sand is horizontally laminated rather than curved parallel to dune profiles as in the case of the *seif* dunes that overlie the whaleback forms and the nearby barchan dunes (El-Baz and Warner, 1979). This suggests that what Bagnold named whaleback dunes are residual sand ridges of horizontally laminated sand, left behind as the wind preferentially eroded the sand in what are seen today as sand-free, inter-ridge corridors (El-Baz, 2000).

Views from space allow the realization that the single most important characteristic of areas with high concentrations of sand dunes is their location within topographic depressions (El-Baz, 2000). This is true throughout the Great Sahara as well as in all other deserts. In some cases, sand emanates from these low areas as it is driven to higher ground by the wind.

This suggests that the dune sand originated by fluvial erosion of sandstone rocks such as those of the “Nubian Sandstone” to the south of, or close to, the dune fields of the Sahara (El-Baz, 2000). The rounding of the grains would have occurred in turbid water as the particulate matter was transported during humid phases in the past by rivers and streams. The sediment load must have been deposited in low areas at the mouths of these water channels.

As the climate became drier, the particulate matter was exposed to the action of wind, which locally mobilized the sand and sculpted it into various dune forms. The alternation of wet and dry climates, which occurred several times during the last 500,000 years, would have resulted in the high quartz content of the sand.

4. SAND-BURIED CHANNELS

As multi-spectral images help explain concentrations of sand fields and dune patterns, radar data unveil sand-buried topography. This is due to the capacity of radar waves to penetrate fine-grained and dry sand, as if it does not exist, and bounce back from the features of solid rock below.

Thus, Shuttle Imaging Radar (SIR-C) and Radarsat data revealed the location of numerous channels of former rivers and streams in the Sahara. The sand cover of these features inhibited their observation in other types of satellite images. Sand-buried channels that were studied in detail are those in southwest Egypt, northwest Sudan, and southeast Libya.

Some of the radar-revealed channels emanate from the Gilf Kebir plateau, a prominent topographic high in southwestern Egypt. The plateau is a nearly circular sandstone mass with a diameter of 320 kilometers. It is bordered by numerous dry valleys (wadis) indicating that its edges were shaped by surface water erosion. As Landsat images show, the wadis are truncated at the top, which suggests that an upper surface layer of softer sediments had been eroded by both water and wind processes.

Radar data enhance wadi definition, particularly in the plains. Three major drainage systems start at the edge of the plateau and trend due north toward the Great Sand Sea. Another wadi starts northeast of the plateau and also trends toward the Great Sand Sea region. These channels of former rivers support the interpretation that sand was produced by water erosion and transported to inland depressions by rivers and streams.

Similarly, in northwestern Sudan there is a vast flat plain over 600 km in diameter. It is known as the Great Selima Sand Sheet after the Selima Oasis, which lies along its southeastern border. Five major drainage lines in the vicinity of the Great Selima Sand Sheet were revealed by SIR-C images with four major lines leading directly to it from the west and southwest. Such broad channels usually develop under sheet flood conditions with plentiful surface water.

Of particular note is that several of these broad channels display small braided streams in their floors, as revealed by the radar data. Braiding usually develops by smaller amounts of surface water, indicating several episodes of water flow. Field observations of trenches indicate that moisture begins to appear at 25 centimeters depth in the sand cover of shallow channels in the Bir Safsaf region of southern Egypt (El-Baz, 2000). This suggests that moisture from occasional rainstorms is still carried through, and retained by, the sand cover of the former water channels.

Similarly, radar data on southeastern Libya reveal the reason of successful agriculture in circular irrigation farms northeast of the Kufra Oasis. These farms were developed starting in the 1960s by Oxidental Petroleum Company, as part of a concession to explore for oil. The farms are visible from space due to the contrast between the vegetation and the surrounding sandy plain (El-Baz, 2000).

Radar data reveal the courses of two sand-buried former watercourses to the south of the Kufra region. The narrower channel passes through the Kufra Oasis and appears to originate from the eastern side of the Tebesti Massif of northern Chad. The wider channel is oriented in a NW-SE direction. A Radarsat image of its extension indicates that it originated from the southeast corner of Libya. Both the location of the Kufra Oasis and the circular irrigation farms are due to the presence of these two former rivers; the low topography and fracture zones allow access to the groundwater resources.

These data confirm that the desert belt of the Sahara experienced earlier periods of greater effective moisture. In addition to the unveiling of dry courses of ancient rivers, this is evident from archaeological sites associated with remnants of lake deposits. Archaeological evidence of previous human occupation, coupled with remains of fauna and flora, confirm the presence of surface water in the past (Haynes, 1982, Wendorf *et al.*, 1987 and 2001).

As documented by radiocarbon dating and geo-archaeological investigations, the Sahara experienced a period of greater effective moisture about 10,000 to 5,000 years ago. Prior to that, alternating wet and dry cycles, up to tens of thousands of years in duration, persisted during the past 320,000 years (Haynes *et al.*, 1989 and 1993).

5. GROUNDWATER IMPLICATIONS

As stated above, dune accumulations in the Sahara, as in all other deserts, occur within or near topographic depressions. This must be explained in any theory regarding the origin of the sand and the evolution of dune forms in space and time.

In addition, two other important observations must also be taken into account. First, the wind in the Sahara moves toward the south during most of the year, except where it is locally affected by topographic prominences. The second observation is that sands in the dune fields are composed mostly of well-rounded quartz grains. The exposed rocks to the north of the sand seas are mostly limestones, which could not have been the source of the vast amounts of quartz sand (El-Baz, 2000).

These two observations discount the possibility of the origin of the majority of the sand by wind erosion and transportation from the north. Therefore, it is more likely that areas covered by dune sand were relatively low areas that received sediments from northward flowing river and stream channels in the geological past. When the conditions of climate changed, the wind acted on the lacustrine accumulations. Fine particles, less than 0.2 mm, were whirled in the atmosphere as dust. Gravel, which could not be moved by the wind, formed the lag deposits of *reg* and *hamada* surfaces. Intermediate-sized particles,

from 0.2 to 2 mm in diameter, accumulated by the wind into various dune forms, sand ridges, and sand sheets.

As explained above, the patterns of dunes in the Sahara support this theory, which has far-reaching implications (El-Baz, 2000). Because the sand was transported by ancient rivers, the depositional basins would have received vast amounts of freshwater. Most of that water would have seeped, through primary and fracture-induced porosity, into the substrate. Thus, areas that encompass large sand dune accumulations would host groundwater resources. This means that the vast dune fields of the Sahara may be underlain by much groundwater.

This theory has been tested in the eastern Sahara, for example, concentrations of groundwater abound in topographic basins in Libya. Because of the encroachment of seawater into the coastal aquifers, Libya had to transport sweet groundwater from the southern part of the country to where the population is concentrated along the Mediterranean seacoast. Hundreds of wells were drilled for groundwater in five basins: Kufra, Sarir, Sirt, Hamra, and Murzuq. The water is transported in a pipeline, which is capable of delivering up to 2,000,000 m³ per day (El-Baz, 2000).

Indications of a similar hydrogeologic setting exist in the Western Desert of Egypt. Groundwater exploration in the East Oweinat region of the northern part of the Great Selima Sand Sheet confirmed the presence of resources to support agriculture on 200,000 hectares for 200 years (El-Baz, 1998). When wells were drilled in this region to 350 m depths, the water rose to only 30 meters below the surface.

In addition, two wells near the northern and eastern edges of the Great Sand Sea proved the presence of vast amounts of water. These wells were drilled south of Siwa Oasis and southwest of Farafra Oasis, respectively. They were drilled to the depth of 1,200 m in the course of exploring for oil. The two wells penetrated thick sandstone sequences saturated with groundwater. The water in these two wells gushed under artesian pressure up to 20 m into the air, indicating vast resources at depth (El-Baz, 2000).

6. CONCLUSION

A better understanding of the origin and evolution of desert landforms is afforded by image acquisition from space. These images allow the identification of desert landscapes and a practical means to monitor environmental changes, e.g., the formation and movement of sand dunes.

The systems that produce images that are most applicable to desert study include: a) digital multi-spectral sensors; b) radar systems that are particularly useful in revealing buried courses of ancient rivers beneath desert sands; and c.) radar-produced topography data, which allow mapping of drainage patterns of wet climates in the geological past.

Data from space imaging systems are particularly applicable to the investigation of processes that act upon desert surfaces. Their analyses have shown that the Sahara hosted wetter climates in the past. Much of the water from the humid phases remains trapped beneath the desert surface, particularly under areas of large sand dune accumulations. This must be taken into account in the search for groundwater resources for future economic development in countries of the Sahara.

REFERENCES

- Bagnold R.A. (1941) *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen and Co. Ltd., London. 265 p.
- El-Baz F. (1979) Siwa resort of kings. *Aramco World Magazine*, 30 (4) : 30-35.
- El-Baz F. (1988) Origin and evolution of the desert. *Interdisciplinary Science Reviews*, 1 (13) : 331-347.
- El-Baz F. (1998) Sand accumulation and groundwater in the eastern Sahara. *Episodes*, Vol. 21, No. 3, p. 147-151.
- El-Baz F. (2000) Satellite observations of the interplay between wind and water processes in the Great Sahara. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 6, p. 777-782
- El-Baz F. & D.M. Warner (editors) (1979) *Apollo-Soyuz Test Project: Summary Science Report, Volume II: Earth Observations and Photography*, NASA SP-412, Washington DC, 692 p.
- Gautier E.F. (1935) *Sahara: The Great Desert*. Columbia University Press, New York, 264 p.
- Ghoneim E. & F. El-Baz (2007) The application of radar topographic data to mapping of a mega-paleodrainage in the Eastern Sahara. *Journal of Arid Environments*, 18 p., www.elsevier.com/locate/jaridenv
- Gifford A.W., Warner D.M. & El-Baz F. (1979) Orbital observations of sand distribution in the Western Desert of Egypt. *In Apollo-Soyuz Test Project Summary Science Report, Volume II: Earth Observations and Photography*, edited by F. El-Baz and D.M. Warner, NASA SP-412, p. 219-236.
- Gil P.R. (editor) (2002) *Wilderness: Earth's Last Wild Places*. CEMEX, Mexico City, 573 p. (The Sahara/Sahel, by F. El-Baz, p. 375-377.)
- Haynes Jr. C.V. (1982) Great Sand Sea and Selima Sand Sheet: Geochronology of desertification. *Science*, 217 : 629-633.
- Haynes Jr. C.V., Eyles C.H., Pavlish L.A., Rotchie J.C. & Rybak M. (1989) Holocene paleoecology of the Eastern Sahara: Selima Oasis. *Quaternary Science Review*, 8: 109-136.
- Haynes Jr. C.V., Maxwell T.A. & Johnson D.L. (1993) Stratigraphy, geochronology, and origin of the Selima Sand Sheet, eastern Sahara, Egypt and Sudan. *In Geoscientific Research in Northeast Africa*, edited by U. Thorweihe and H. Schandelmeier, Beka, Rotterdam, p. 621-626.

- Henning D. & Flohn H. (1977) Climate Aridity Index Map. U.N. Conference on Desertification, UNEP, Nairobi, Kenya.
- Lillesand T.M. & R.W. Kiefer (1994) Remote Sensing and Image Interpretation, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 750 p.
- Mainguet M.M. (1992,) A global open wind action system: The Sahara and the Sahel. *In* Geology of the Arab World, Vol. II, edited by A. Sadek, Cairo University Press, Cairo, Egypt, p. 33-42.
- Mainguet M.M. (1995) L'homme et la Secheresse. Coll. Geographie, Mason, Paris, 335 p.
- Mainguet M (1999) Aridity: Droughts and Human Development, Springer, Heidelberg, Germany, 302 p.
- Robinson C.A., F. El-Baz & V. Singhroy (1999) Subsurface imaging by Radarsat: comparison with Landsat TM data and implications to ground water in the Selima area, Northwestern Sudan. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25 (3) : 268-277
- Robinson C. A., A. Werwer, F. El-Baz, M. El-Shazly, T. Fritch & T Kusky (2007) The Nubian Aquifer in Southwest Egypt. *Hydrology Journal*, 15 : 33-45
- Wendorf F., Close A.E. & Schild R. (1987) Recent work on the Middle Paleolithic of the Eastern Sahara. *African Archaeology Review*, 5 : 49-63
- Wendorf F., R. Schild & Associates (2001) The Archaeology of the Nabta playa. *In* : Holocene



GLOBAL WARMING AND WATER AVAILABILITY

Chris. D. MILLY

United States Geological Survey (USA)

Abstract

Some of the basic physical processes that relate global warming to changes in water availability are accessible to the layperson: warm air can hold more water vapor than cool air, and ice melts when heated above a critical temperature. The higher water content of a warmer atmosphere implies changes in atmospheric transport of water to and from a given region, with direct consequences for surface runoff and groundwater recharge. The decreasing prevalence of ice and snow in a warmer world has fundamental implications for seasonal storage of water, for response of soil to precipitation, and for sea level. The foregoing considerations lead to the admittedly vague prediction that a warmer world is a world in which water availability differs from that of a cooler world. Approximate quantitative expressions of this prediction have been produced by a series of increasingly complex global climate models over a period of many years. However, the water-availability predictions differ from one model to the next, and they depend on uncertain projections of human activities. Furthermore, global climate models address mainly physical processes and tend to ignore various biological and chemical feedbacks of potential importance (e.g., changes in plant structure and functioning, changes in soil carbon balance). Accordingly, skepticism toward projections of changing water availability is not inappropriate. The projections of the most recent generation of climate models differ even in the direction of change of mean annual runoff (i.e., tendency toward wetter vs. drier conditions) in many regions. Nevertheless, the global pattern of projected change is broadly consistent across most models. Furthermore, the global pattern of multi-decadal trends in streamflow that was observed during the 20th Century bears a striking similarity to the average pattern simulated by the climate models forced by estimated historical drivers of climate (both anthropogenic and natural). This similarity appears too great to be explained readily by chance, but seems rather to indicate that the models have predictive skill for estimating future water-availability trends. The more robust projections of these same models driven only by possible anthropogenic forcings for the 21st Century imply decreasing water availability in southwestern North America, the Mediterranean region, and southern Africa, and increasing water availability in high-latitude North America and Eurasia, the La Plata basin of South America, eastern equatorial Africa, and Indonesia. In general, regions of projected decreasing water supply tend to be regions of contemporary water-supply stress, and regions of projected increasing supply tend to be regions where water shortage is not a major issue for water managers.

1. INTRODUCTION TO WARMING AND WATER

On 2nd February 2007 Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, www.ipcc.ch) released the following statement: "*Most of the observed increase*

in globally averaged temperatures since the mid-20th century is very likely due to the observed increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations.” The statement received wide coverage in the press.

Why did IPCC attribute this change in climate to human forcing? With only one planet Earth, it is impossible to run controlled experiments to determine the impact of various forcing mechanisms on climate. Therefore, of necessity, mathematical modeling is used. To a large extent, the basis for the IPCC statement was a series of numerical climate simulation experiments, in which it was found that the global warming of the latter half of the 20th century (1) could be explained by known physical processes as a result of estimated anthropogenic forcing of climate and (2) could not be explained by any known processes on the basis only of estimated natural forcing of climate.

A climate model is a numerical solver of the three-dimensional, time-dependent equations of mass, energy, and momentum transport in the global ocean and atmosphere, with coupling to radiative transfer in the atmosphere and exchanges of radiation, latent and sensible heat, and water with the continental land masses and the great ice sheets. Processes are resolved with computational time steps as small as a half of an hour and with horizontal resolution on the order of 100 km, with smaller scale processes being parameterized.

Inputs to a climate model include time series of major radiative forcing factors, which can be natural (e.g., solar luminosity, volcanogenic aerosols in the atmosphere, orbital geometry) or anthropogenic (e.g., “greenhouse gas” concentrations in the atmosphere, anthropogenic aerosols in the atmosphere, land cover). Climate can be simulated as a response to all forcings, or to natural forcings alone, or to anthropogenic forcings alone. The common finding from many modeling studies is that it is possible to reproduce the observed history of 20th-Century global-mean surface warming when all forcings are included, but that it is not possible to reproduce the observed warming when only natural forcings are considered. With current physical understanding, therefore, we cannot explain the warming of the recent decades unless we invoke observed increases in atmospheric concentrations of carbon dioxide and other radiatively active gases.

Now, taking the global warming as a given, we next ask what are the consequences of the warming for the circulation of water in the climate system? What are the consequences, by implication, for water resources? Some simple physical factors point the direction to answering this question. From the equation of state for water, we know that as the Earth warms, progressively less water is present in the frozen state. One manifestation of this fact is the reduction in snow pack in those regions with a strong seasonal cycle of temperature. This reduction results, in turn, in a change in seasonal timing of runoff, with the runoff season generally shifting earlier in the seasonal cycle.

We also know from the basic Clausius-Clapeyron relation that the ability of air to hold water increases by about 7% per degree Celsius of warming. Making a conservative assumption about constancy of relative humidity, a first-order prediction is that atmospheric water-vapor content increases in proportion to global warming. Keeping in mind that runoff is approximately equal to the convergence of atmospheric water-vapor flux, and

that the flux is proportional to the amount of water vapor in the atmosphere, we expect large changes in runoff regionally as a result of a warming. In addition to the two issues introduced above and developed below, it should be kept in mind that many other issues are relevant to a discussion of warming and water, and that these issues cannot be addressed herein. On the basis of the Clausius-Clapeyron argument, there is reason to expect that the ongoing climate change will affect the frequency of droughts. In particular, we expect an increase in drought frequency in many regions where drought has been a problem historically. Additionally, we have reason to watch for increased frequency of floods, particularly in humid regions, though not necessarily only in those regions.

Furthermore, this paper addresses only the supply side of water availability, but water availability is often defined in terms of the relative balance of both supply and demand. Water demand will change as a function of changing climate, as human societies and natural and managed ecosystems respond to the climate change. Additionally, water availability is a function not only of water quantity, but also of water quality. We are likely to see anticipated and unanticipated effects on water quality, hence water availability, as a result of various physical, biological, and chemical processes that will accompany the ongoing climate change.

2. WARMING AND THE SEASONAL CYCLE OF RUNOFF

The climatic, topographic, and, hence, hydrologic setting of Morocco bears some important similarities to that of western United States. The latter is an area for which much research has been conducted on the effect of an atmospheric warming on snow pack and seasonal cycle of runoff. Given the similarity between these two regions, methods and hypotheses developed in the western United States may have utility for investigations of the sensitivity of Moroccan water resources to warming. As warming has progressed during recent decades in the western United States, it has been observed that the fraction of winter precipitation falling in the form of snow has decreased at some sites and increased at others, but that the presence of a decreasing trend is predominant (Knowles *et al.*, 2006). As a consequence of increased fractionation of winter precipitation to the liquid phase, but also of earlier (thermal) springtime and earlier snowmelt, a tendency toward earlier timing of spring discharge has been observed (Stewart *et al.*, 2005). The order of magnitude of the time shift is on the order of weeks. Consistent with the hypothesized mechanisms, an exception to the rule of earlier timing has been observed in the lower-elevation coastal mountain range of California, where snow pack is not a major term in the water balance or in runoff timing.

Simple methods can be applied for the assessment of vulnerability of a given region of the world to the phenomenon of snow-pack loss and advanced timing of the seasonal cycle of runoff. For example, one can compute the fraction of the annual precipitation that historically occurred on days when the daily mean temperature was, for example, between the freezing point and 3 degrees below the freezing point of water (Michael Dettinger, U.S. Geological Survey, personal communication). Locations where this simple index is relatively large are locations where a warming of 3 degrees magnitude is most likely to produce an appreciable change in the role of snow pack in the seasonal cycle of runoff.

3. WARMING AND ANNUAL RUNOFF

Global simulations of climate now provide good first-order representation of regional climate in many regions of the world. For example, multi-model ensemble simulations of the climate of the 20th Century reproduce observational analyses of the annual mean and the interannual variability of surface temperature (Figure 1) and precipitation (Figure 2) with remarkable fidelity for the Mediterranean region.

An ability to reproduce the mean and variability of a climatic variable during a fixed period of time does not necessarily imply an ability to simulate trends. It has already been mentioned that the time series of global-mean surface temperature can be reproduced

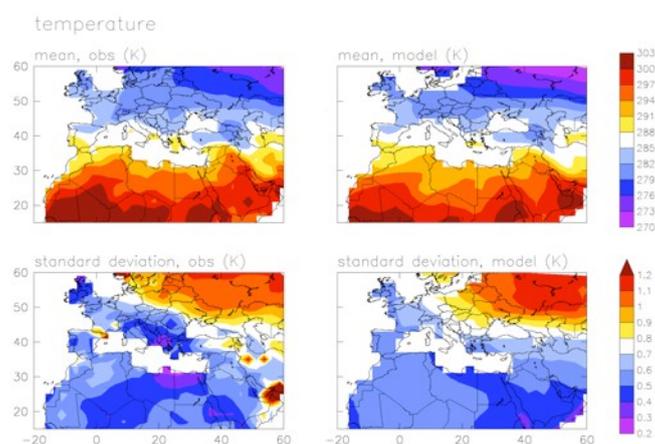


Figure 1. Observed (left) and ensemble average of model simulations (right) of atmospheric temperature annual mean (top, K) and standard deviation of annual mean (bottom, K), for the Mediterranean region

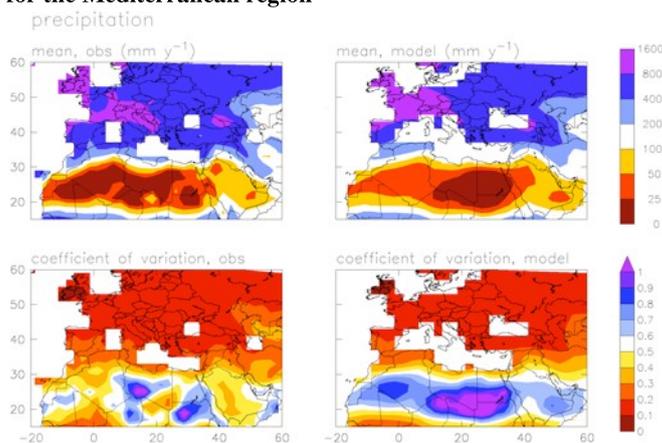


Figure 2. Observed (left) and ensemble average of model simulations (right) of precipitation annual total (top, mm) and coefficient of variation of annual total (bottom, dimensionless), for the Mediterranean region.

by models, but what about *regional* changes of *hydroclimatic fluxes*? Milly *et al.* (2005) assembled streamflow observations from around the world and analyzed the global pattern of normalized trends in streamflow (Figure 3, top). (The normalization was based on the concept of statistical significance, although no attempt was made to assess statistical significance of trends at individual sites.) Milly *et al.* (2005) also estimated the pattern of streamflow trends on the basis of an ensemble of simulations of 20th-Century climate by models participating in the Fourth Assessment of the IPCC (Figure 3, bottom). By use of additional control simulations, in which no climate forcing changes were applied, it was concluded that the correlation between observed (Figure 3) and simulated (Figure 4) streamflow trends was very unlikely to have been generated by chance, and that the correlation was instead a result of a successful simulation of hydroclimate in response to estimated historical climate forcing.

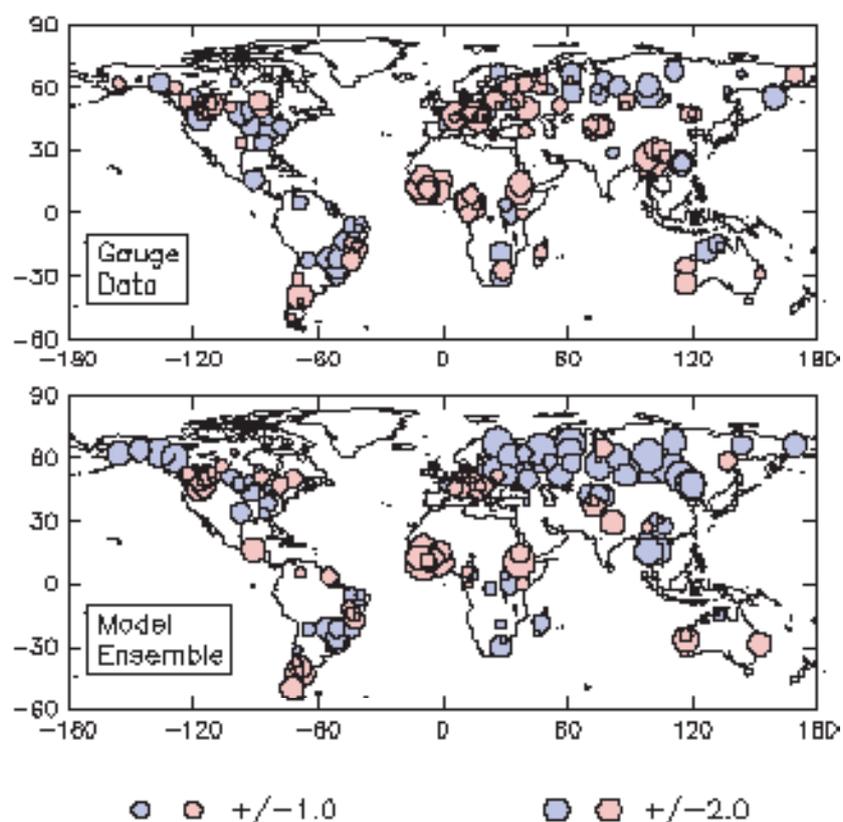


Figure 3. Global patterns of normalized trend in streamflow during the 20th Century from observations (top) and from an ensemble average of climate models (bottom). From Milly *et al.* (2005)

The surprising implication of this finding is that major patterns of 20th-Century hydroclimatic trends apparently were not the simple result of internal variability in the climate system, but rather were caused by changes in climate forcing, both natural and

anthropogenic. Given the apparent skill of climate models, one should seriously consider the projections made by the same models. Projected changes in runoff at the middle of the 21st century are displayed in Figure 4 for one scenario of changes in atmospheric composition. Climate projections depend, among other things, on the assumed scenario for the changes in atmospheric concentrations of “greenhouse gases.” However, the various scenarios for forcing do not diverge greatly before 2050; furthermore, a time lag of one or two decades in the response of global warming to forcing minimizes the importance of differences among forcing scenarios late in the examined time frame. Therefore, inaccuracies in Figure 4 might be more dependent upon model errors than upon errors in assumed forcing.

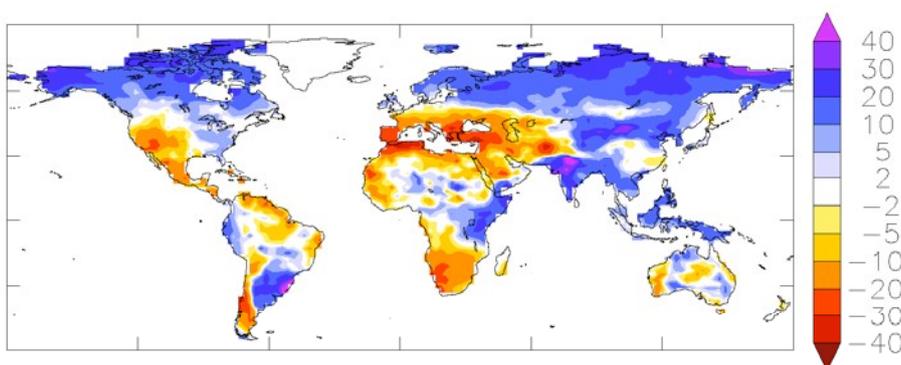
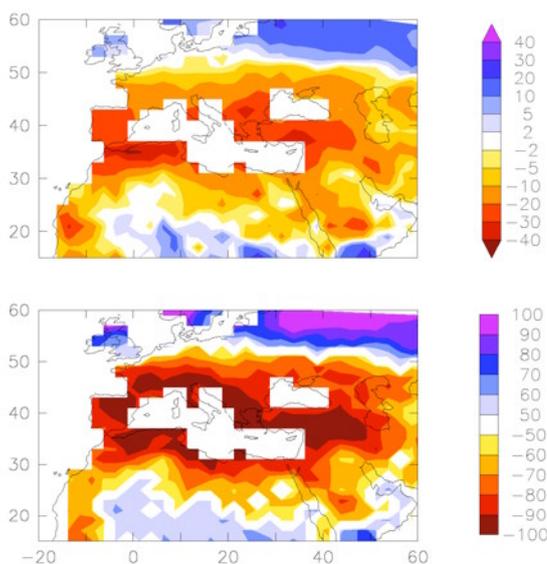


Figure 4. Projected changes in runoff (percent) for the period 2041-2060, relative to the period 1900-1970, estimated as the median of responses from numerical experiments with 12 climate models. Climate forcing was associated with the “SRES A1B” scenario. After Milly *et al.* (2005)

Figure 5. Top: Same as Figure 4, for the Mediterranean region. Bottom: Signed percent of model experiments yielding a change in runoff with the same sign as the median change in runoff. The sign indicates the direction of the median change. After Milly *et al.* (2005)



Projected decreases in runoff (Figure 4) correlate spatially with regions of historical water stress. Such regions include southwestern North America, southwestern South America, southern Africa, and the Mediterranean region, including southern Europe, the Middle East, and northern Africa. Areas of strongest multi-model hydroclimatic response tend to correlate with areas of strong agreement among models on the direction of change (Figure 5). In the heart of the Mediterranean region, 80-100 percent of model experiments project a decrease in expected runoff by 2050 (Figure 5).

4. CONCLUDING COMMENTS

Conclusions are summarized briefly below :

- The global pattern of trends in 20th century hydroclimate cannot be explained by internal variation alone, but appears to have been externally forced.
- Climate models project substantial regional changes in runoff and streamflow, hence in water availability, for the 21st century.
- Areas of historically high water stress correlate spatially with areas of model-projected streamflow decreases.
- Semi-arid regions now supplied partially by snowmelt can be expected to experience an unfavorable change in seasonal timing of stream flow.

REFERENCES

- Knowles N., M.D. Dettinger & D.R. Cayan (2006) Trends in snowfall versus rainfall in the western United States, *J. Climate*, **19**, 4545-4559
- Milly P.C.D., K.A. Dunne & A.V. Vecchia (2005) Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, *Nature*, **438**, 347-350
- Stewart I.T., D.R. Cayan & M.D. Dettinger (2005) Changes toward earlier streamflow timing across western North America, *J. Climate*, **18**, 1136-1155



LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES: VULNÉRABILITÉ ET ADAPTATION DU LITTORAL MAROCAIN

Omar ASSOBHEI

Université Chouaib Doukkali, Faculté des Sciences, El Jadida, Maroc
Membre Correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

1. INTRODUCTION

L'examen des carottes de glace prélevées en Antarctique a permis aux climatologues de retracer les variations du climat sur des centaines de milliers d'années. Ils ont observé l'alternance de périodes glaciaires (froides) et interglaciaires (chaudes) et ont établi le lien entre la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère et le réchauffement climatique.

Il n'y a actuellement, nul doute, que les changements climatiques et les phénomènes qui leurs sont liés soient inéluctables pour les 100 années à venir. Les données climatiques relevées pour le Maroc durant le 20^e siècle indiquent un réchauffement durant ce siècle estimé à 0,7 à 1°C avec une tendance accentuée ces 40 dernières années. Les modèles de circulation générale convergent pour estimer un réchauffement probable de la région de l'ordre de 2° à 4°C durant le 21^e siècle. Les données climatiques montrent également une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et des inondations.

Les changements climatiques préoccupent de plus en plus la communauté scientifique et les autorités gouvernementales, étant donné, leurs conséquences potentielles -mais dont l'ampleur est inconnue- sur les différents secteurs de l'économie (l'agriculture, l'industrie, le tourisme,...) et l'écologie (la biodiversité, les habitats...). Au vu de sa position géographique et de l'immensité de ses côtes (3500 km), les changements climatiques représentent pour le Maroc une véritable menace pour son développement socio-économique.

1.1. Littoral Marocain

Le littoral, lieu où les conséquences des changements climatiques risquent d'être très dévastatrices du fait que ce dernier est le siège d'une urbanisation galopante et d'une forte concentration des activités socio-économiques.

En effet, le Maroc présente une façade méditerranéenne de près de 550 km de long et une façade atlantique qui s'étire sur près de 3000 km (Photo 1). Le patrimoine côtier marocain est caractérisé par deux composantes principales à savoir:

- des richesses naturelles physiques et biologiques à conserver, d'autres à gérer, dans un but de durabilité (plages, lagunes, marais...);
- des secteurs d'activités humaines et économiques à localisation littorale, comme site préférentiel ou nécessaire conduisant à une littoralisation croissante. Ce phénomène, en l'espace de deux décennies, a été multiplié par 3,5 dans les pays de la méditerranée et les projections annoncent un taux d'urbanisation de plus de 77% à l'horizon 2025.

Par ailleurs, la littoralisation, en plus des nuisances développées en milieu continental lointain, concoure à dégrader la qualité des écosystèmes marins et côtiers. La dégradation a des répercussions néfastes sur la santé des populations, sur les ressources marines, sur la stabilité physique et sur la qualité paysagère du littoral. Ces nuisances sont également les conséquences des phénomènes purement naturels accélérés par les changements climatiques.

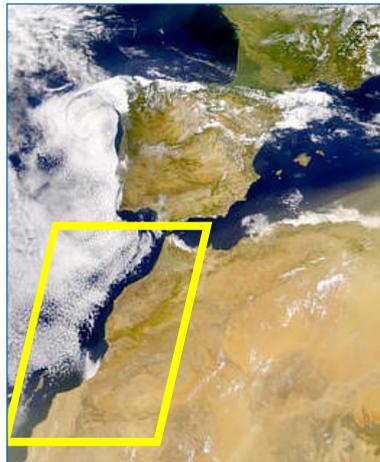


Photo1. Photo stellaire du Maroc

1.2. Les Changements Climatiques

Dans le résumé de son 4e rapport destiné aux décideurs présenté à Paris en février 2007, les scientifiques du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC) ont confirmés la hausse de la température moyenne pour le 20e siècle à 0,14°C/décennie à partir de 1977. Le GIEC avait prédit une hausse de la température moyenne planétaire d'ici 2100 de 1,8 à 4°C par rapport à 1990. Ces valeurs sont des moyennes, et la variation pourrait aller jusqu'à 6,4 degrés supplémentaires, selon les modèles de croissance plus ou moins polluants mis en oeuvre par l'Homme. Le GIEC a confirmé, par ailleurs, la hausse du niveau des mers au 20e siècle à 12-22 cm et son accélération récente de 3,1 mm/an pour la période : 1993-2003. Cette valeur a été mesurée grâce à des altimètres portés par satellite.

Le GIEC a également confirmé l'augmentation de la fréquence et l'intensité des événements extrêmes.

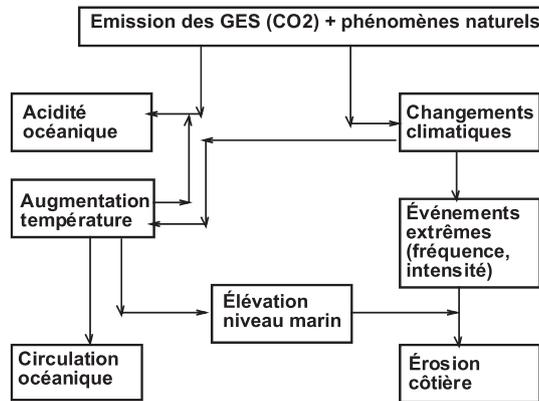


Figure 1. Conséquences directes ou indirectes des changements climatiques

Les conséquences directes ou indirectes des changements climatiques sur les littoraux et les écosystèmes marins et côtiers, résumés dans la figure 1, sont :

- Augmentation de l'acidité océanique
- Augmentation du niveau de la mer
- Accélération de l'érosion côtière
- Perte de biodiversité et migrations de la faune
- Impact sur les pêcheries.

Les principaux problèmes qui pourraient alors surgir sont :

- l'augmentation des inondations en raison des ondes de tempêtes,
- la submersion des terres côtières basses,
- l'érosion accélérée des plages, des falaises et des dunes côtières,
- la détérioration des zones humides,
- l'introduction d'eau salée dans les aquifères côtiers,
- la disparition des cordons littoraux qui isolent les lagunes,
- l'augmentation de l'influence marine (lagunes de plus en plus salées).

2. VULNÉRABILITÉ DES ZONES CÔTIÈRES AUX EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

D'après Downing (1992, 1996), la vulnérabilité est une mesure globale du bien-être humain qui inclut l'exposition environnementale, sociale, économique et politique à diverses perturbations ou menaces pouvant être dommageables. La vulnérabilité varie de façon spatio-temporelle pour différentes collectivités, même si elles peuvent être confrontées au même risque (Eele, 1996). Les stratégies applicables pour contrer les futurs changements climatiques doivent donc être fondées sur une compréhension totale de la nature et des causes complexes de la fragilité sociale actuelle, acquise par la connaissance de la vulnérabilité à la variabilité climatique d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre.

Les changements climatiques intensifieront les stress physique, écologique, biologique et socio-économique que subissent actuellement les zones côtières marocaines. La plupart

des études actuelles examinent surtout dans quelle mesure l'élévation du niveau de la mer pourrait causer des inondations et l'érosion des terres basses ou accroître les submersions de terrain dues aux ondes de tempête et aux violents orages.

2.1. Augmentation de l'acidité océanique

La dissolution du gaz carbonique par des eaux marines plus chaudes provoque l'acidification de ces eaux. L'acidification des eaux océaniques a été estimée par le GIEC à 0,1 point de pH au 20^e siècle et prévoit pour le 21^e siècle une diminution du pH de 0,4 point. La conséquence directe de l'augmentation d'acidité est la diminution de la disponibilité des carbonates nécessaires pour la formation du calcaire chez les organismes marins (mollusques, corail, phytoplancton...) Ces organismes devront investir beaucoup plus d'énergie pour fabriquer leur exosquelette et seront plus fragiles. Les eaux océaniques seront donc plus corrosives pour de nombreux organismes d'ici cinquante à cent ans, et de ce fait, la perte de la biodiversité sera accélérée.

2.2. Augmentation du niveau de la mer

La montée du niveau de la mer est la conséquence directe de la dilatation thermique des océans et de la fonte des glaciers induite par le réchauffement climatique. En effet, la variation du niveau marin est une évolution naturelle dont l'accélération ces dernières années est une manifestation des changements climatiques induits par les gaz à effet de serre.

Ainsi, au cours des temps géologiques, le processus des glaciations a provoqué une baisse du niveau marin de 100 à 140 mètres par rapport au niveau actuel. Cependant, après la déglaciation, le niveau marin n'a fait que remonter. Il s'est élevé, par rapport au niveau actuel, de 600m il y a 450 millions d'années et de 300 m il y a 95 millions d'années. Par contre, il a baissé de 100 m il y a 18 000 ans lors de la dernière glaciation. Depuis, le niveau de la mer est en continuelle remontée. Si l'on considère le cas hypothétique d'une fonte complète des calottes glaciaires, le niveau marin actuel remonterait de 70 à 80 m.

Au 20^e siècle, le niveau moyen des mers est monté de 0,17m. Les mesures par altimètres satellitaires pour la période 1993 et 2003 ont montré une élévation moyenne de 3,1 mm/an. Ces mesures non seulement confirment les prévisions émises par le GIEC en 2001, mais montrent plutôt une accélération de l'augmentation du niveau marin. Les prévisions pour le 21^{ème} siècle sont 8 à 88 cm entre 1990 et 2100. Cependant, cette élévation, quoique non homogène à travers le globe, influencera considérablement la géographie.

Actuellement, le niveau de la mer monte partout dans le monde et son impact est désormais visible dans les zones littorales de basse altitude. C'est le cas des îles Maldives dans l'océan Indien et des îles coralliennes de Tuvalu dans l'océan Pacifique. Ces îles sont vouées à disparaître incessamment.

L'inondation des terres humides côtières, les dégâts causés par les tempêtes, l'érosion du littoral, la contamination par l'eau salée des ressources en eau douce et les régions agricoles, l'impact sur les ressources halieutiques, ainsi qu'une hausse de la salinité des estuaires et

une migration du front de salinité vers l'amont des oueds, sont des conséquences réelles d'une élévation même faible du niveau de la mer.

Pour le Maroc, on estime le taux d'élévation moyen du niveau de la mer à 20 à 88 cm pour la période 1990 - 2100. Même cette prévision, relativement modeste, présente un danger énorme pour les villes côtières et, en particulier, aux investissements faits dans ces dernières.

En effet, plusieurs zones du littoral marocain sont vulnérables à l'élévation du niveau de la mer Tétouan, Tanger, Larache, Kénitra, Oualidia, Safi... Par ce phénomène d'élévation de la mer, les ressources stratégiques pour les populations côtières sont menacées. C'est le cas des plages, qui ont tendance à diminuer de 50 à 70% entre 2050 et 2100, de l'eau douce et des pêcheries côtières.

Au niveau des villes côtières, l'élévation du niveau de la mer, par rapport au niveau des collecteurs d'eaux usées engendrera des problèmes d'évacuation au niveau des réseaux d'assainissement. Cette élévation peut également provoquer des modifications des écoulements superficiels et des modifications des écoulements de la nappe phréatique.

En outre, les changements climatiques provoquent des pertes d'habitats de la faune et de la flore marines. En effet, la hausse de température des eaux marines influe sur toute la chaîne trophique, notamment les maillons les plus sensibles aux variations des paramètres environnementaux. C'est le cas du phytoplancton et du récif corallien dont plus des deux tiers, dans le monde, sont gravement dégradés ou risquent de le devenir suite à l'acidification des eaux océaniques profondes.

2.3. Augmentation de la fréquence et l'intensité des tempêtes

Le GIEC a également confirmé, dans son résumé destiné aux décideurs (Paris, février 2007), l'augmentation de la fréquence et l'intensité des événements extrêmes (Figure 2). Ainsi, des ondes de tempêtes, des marées de vive-eau, des effets de résonance liés à la configuration du littoral marin conjugués à l'élévation du niveau de la mer, entraînent des surcôtes bien plus fréquentes que par le passé. Ces surcôtes provoquent l'inondation des plaines côtières et une grande érosion du littoral.

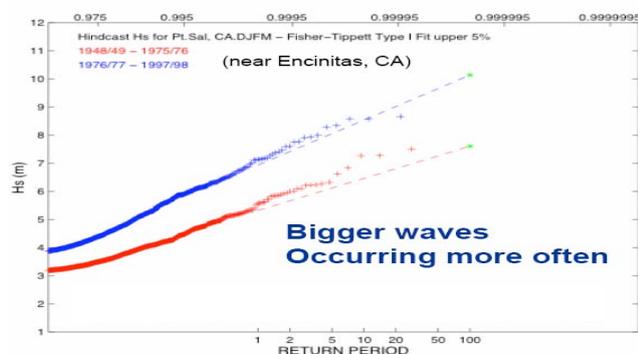


Figure 2. Augmentation de l'intensité des vagues (Source: Bromirski *et al.*, 2004)

Par ailleurs, l'augmentation de la fréquence et l'intensité des tempêtes et l'élévation du niveau marin concourent à la réduction du volume des eaux douces souterraines par le déplacement de l'interface entre eaux de mer - eaux douces, d'une part, et, d'autre par le morcellement des aquifères d'eau douce. L'arrivée de l'eau salée sous certains puits est une manifestation de l'augmentation du niveau marin. Ces phénomènes sont accélérés par des prélèvements d'eau inconsidérés.

Durant le siècle dernier, les ouvrages portuaires marocains ont résisté à l'assaut de l'océan. Cependant, en Novembre 2003, une tempête extratropicale a frappé les côtes atlantiques entre Kénitra et Mohammedia. Les vagues ont atteint un creux de 14 m à l'endroit du port de Mohammedia et ont permis le remaniement de 500 000m³ de sédiments par kilomètre de plage. Les dégâts ont été enregistrés au niveau de trois installations maritimes : la digue de calibrage de Mehdiya, la digue N de Bouregreg et la digue abri du port de Mohammedia.

2.4. Perte de biodiversité et migrations de la faune

L'augmentation de l'acidité océanique, combinée au réchauffement des eaux marines et aux phénomènes d'inondations des zones côtières, contribuent à une perte importante de la biodiversité. En effet, l'incapacité d'adaptation de plusieurs espèces au rythme des changements climatiques conduit, à moyen terme, à leur extinction.

Les changements climatiques sont également à l'origine de l'augmentation de la prévalence de maladies chez les animaux marins et à l'invasion des écosystèmes marins et côtiers par des espèces allochtones (poissons et algues provenant des eaux chaudes).

2.5. Impact sur les pêcheries

Le réchauffement global que connaît la planète, affecte directement la croissance des poissons, leur survie et leur reproduction, modifiant ainsi les relations prédateurs-proies et l'habitat. Par ailleurs, ce réchauffement provoque l'augmentation de la fréquence et l'intensité des efflorescences phytoplanctoniques toxiques qui à leur tour peuvent empoisonner les mollusques, les crustacés et les poissons. Les changements dans la dynamique des océans pourraient donner lieu à une modification du comportement migratoire des poissons et, probablement, à une diminution des prises, notamment dans les pêcheries artisanales côtières.

D'autre part, des menaces sur la chaîne trophique marine sont prévisibles pour les prochaines décennies. En effet, 30% de CO₂ produits au niveau de la planète sont absorbés par l'océan. Ce carbone est intégré dans la production primaire via le phytoplancton (pompe biologique). La pompe biologique est menacée par la migration de nombreuses espèces planctoniques adaptées aux eaux tempérées vers le nord, entraînant avec elles leurs prédateurs, perturbant de ce fait l'équilibre des écosystèmes. L'acidification des océans par la diminution des concentrations en ions carbonates met en péril de nombreuses espèces planctoniques ce qui influence la pompe biologique.

3. VULNÉRABILITÉS DU LITTORAL MAROCAIN

Plusieurs zones côtières marocaines, dont bon nombre subissent déjà un stress dû à la pression démographique et aux utilisations conflictuelles, seraient détériorées à cause des changements climatiques (Figure 3). Ainsi, les zones littorales marocaines risquent actuellement d'être érodées, inondées et touchées par de violentes tempêtes, l'élévation du niveau de la mer et par la variation du climat. En effet, plusieurs études effectuées au Maroc ont conclu qu'une bonne partie du littoral marocain disparaîtra sous l'effet conjugué des inondations et de l'érosion et qu'il s'ensuivra une perte de terres agricoles et de régions urbaines.

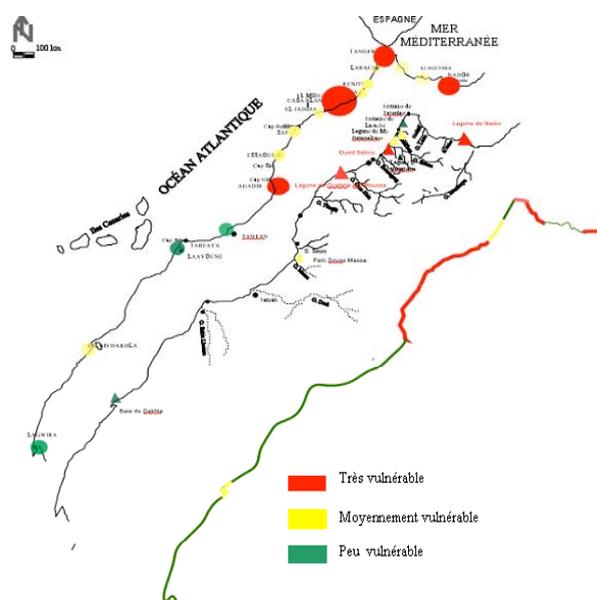


Figure 3. Degré de vulnérabilité des zones côtières marocaines (Projet-protection des zones côtières marocaines, 2004)

3.1. Études menées sur le littoral marocain

Le Maroc compte plusieurs zones particulièrement vulnérables aux changements climatiques, en particulier, sur sa façade atlantique : Tanger, Larache, Kénitra, Oualidia, Safi...

Considérant un taux d'élévation du niveau de la mer pour les côtes marocaines de 3 mm/an pour la période 1990 et 2100, soit augmentation moyenne de 20 à 88 cm, les risques encourus par notre littoral sont :

- Erosion de certaines franges côtières (retrait des falaises entre Jorf Lasfar et Oualidia).
- Recul net du trait de côte tout le long du littoral atlantique et pertes de terres au profit des eaux marines.
- Diminution des plages de 50% en 2050 et de 70% en 2100.

- Intrusion saline des nappes phréatiques côtières (régions de Kénitra – Moulay Bouselham et Azemmour).
- Une fragilisation socio-économique de ces zones côtières associée à la pollution d'origine terrestre.

3.2. Inondation du littoral de Tétouan

Des scénarios avec deux horizons temporels 2040 et 2100 et un niveau d'inondation minimum de 5m et un niveau maximum de 10m, ont été élaborés pour le littoral du Tétouan (Snoussi, 2003). Il en ressort que pour :

- la côte sud de Tétouan (caps Negro et Mazari), les pertes en terre atteindraient 30 % de la superficie totale de cette zone côtière pour le niveau maximum d'inondation et que la pénétration des eaux marines atteindrait 6,5 Km à l'intérieur du continent.
- la côte Nord (les plaines de Smir et de Restinga), l'intrusion marine pénétrerait jusqu'à 4 km des terres intérieures.

Le niveau d'inondation 10m ferait disparaître les plages de tout le littoral de Tétouan, le centre urbain de Martil et les infrastructures et aménagements touristiques situés à moins de 2 km à l'intérieur du continent ainsi que les écosystèmes sensibles.

3.3. Erosion de la Baie de Tanger

Les études réalisées par les équipes des professeurs B. El Moumni (de Faculté des Sciences et Techniques de Tanger) et B. Zourarah (Faculté des Sciences d'El Jadida) au niveau de la baie de Tanger ont montré un net recul du trait de côte (Figure 4) et une forte érosion du littoral (Photo 2) suite aux impacts conjugués des changements climatiques, des aménagements réalisés et des activités humaines (prélèvement de sable, pollutions...). Les mêmes dégradations ont été observées sur les côtes de Sebta - Tétouan (Photo 3).

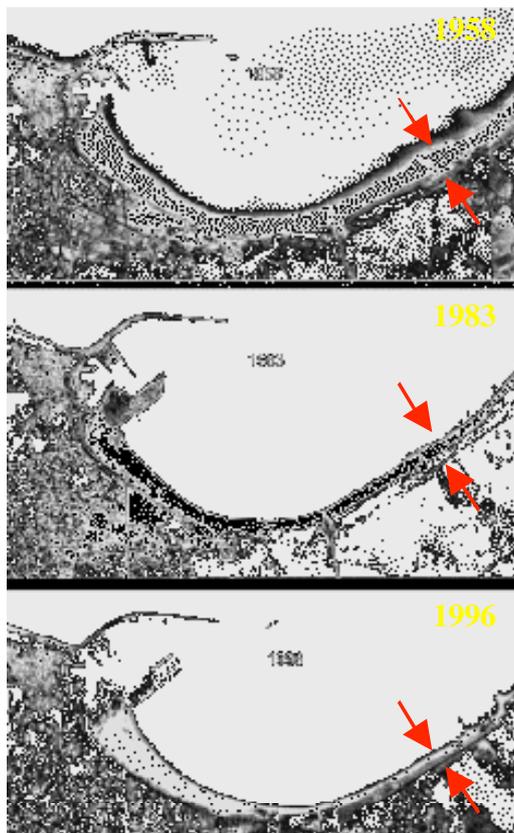


Figure 4. évolution du trait de côte au niveau de la baie de Tanger depuis 1958



Photo 2. Impact des changements climatiques au niveau de la baie de Tanger



Photo 3. Érosion côtière du littoral Sebta - Tétouan

3.4. Érosion du littoral atlantique entre Larache et Kénitra

Au niveau du littoral du Loukkos, il a été montré, à partir de l'étude du bilan sédimentaire, de l'évolution du trait de la dune de la plage Ras Rmel, une perte de surface de 3 hectares contre un gain de surface de 0,2 hectares et un recul de la ligne de côte au cours de la période 1961 - 1997 (Figure 5).

L'équipe du Pr. A. Ait Fora de la Faculté des Sciences de Kénitra a montré, quant à elle, que le littoral de Kénitra a connu au cours de ces dernières décennies un important déficit sédimentaire suite à une forte érosion accentuée par des activités anthropiques. Par ailleurs, elle a montré à partir de la photo-interprétation de la cinématique du trait de côte, une récession au sud de l'estuaire de Sebou (Photo 4).

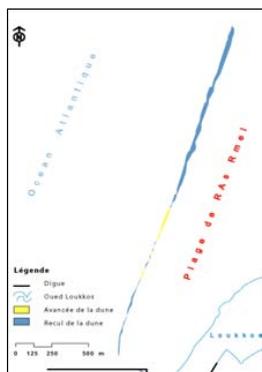


Figure 5. Évolution du trait de côte au niveau de la plage de Ras-Rmel

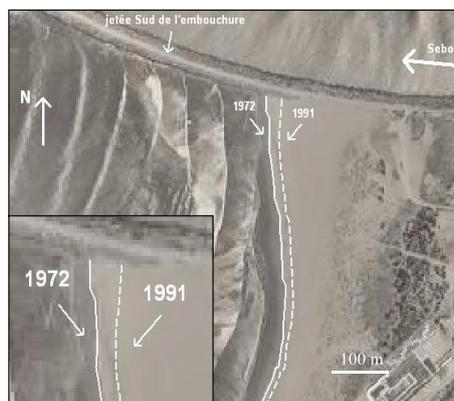
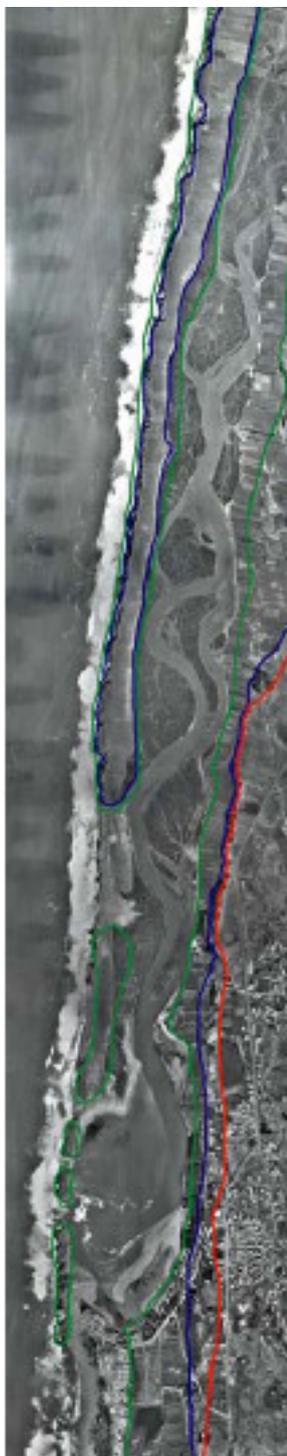


Photo 4. Photo aérienne de Mehdia à proximité de l'embouchure de Sebou montrant un recul du trait de côte



3.5. Inondation de la lagune Oualidia

La lagune Oualidia, l'une des plus importantes lagunes du littoral atlantique marocain a fait l'objet d'une étude visant l'élaboration d'un modèle prédictif de l'impact des changements climatiques sur cet écosystème côtier. L'étude, réalisée par des équipes de l'Université de Nantes et de la Faculté des Sciences d'El Jadida, prévoit trois niveaux d'inondation : un niveau minimum de 1m, un niveau de 5m et un niveau maximum de 10m. Les trois niveaux sont probables eu égard aux surcôtes déjà observées de part le monde. Lesquelles surcôtes résultent de l'élévation du niveau marin combinée à des ondes de tempêtes et à des marées de vive-eau.

Les résultats préliminaires de cette étude prévoient, pour des niveaux d'inondation de 1m et de 5m, des modifications profondes du régime hydraulique et du fonctionnement de la lagune, associés à un changement important de la géographie du site (ouverture de plusieurs passes, destruction de la digue, destruction du petit port de pêche, du camping et des infrastructures touristiques qui bordent la lagune) et à des pertes importantes des activités économiques et touristiques (disparition des fermes aquacoles, destruction des marais salants...). Dans le cas d'un niveau d'inondation maximal de 10m, la lagune disparaîtrait complètement laissant la place à une falaise et une importante inondation des terres agricoles limitrophes (Photo 5).

3.6. Érosion et recul du trait de côte au niveau de Safi

Une étude dédiée à l'impact des facteurs naturels et anthropiques sur la stabilité du littoral de Safi, a été réalisée par l'équipe du Pr. El Moumni (Faculté des Sciences et Techniques de Tanger) a montré un recul annuel moyen du trait de côte de 2,5m depuis 1981 (Figure 6) et une forte érosion de la falaise (Photo 6).

Photo 5. Photo aérienne de la lagune Oualidia avec délimitation des zones inondables selon les trois scénarios d'élévation du niveau de la mer prévus pour le 21e siècle

- Niveau d'inondation à 1m
- Niveau d'inondation à 5m
- Niveau d'inondation à 10m

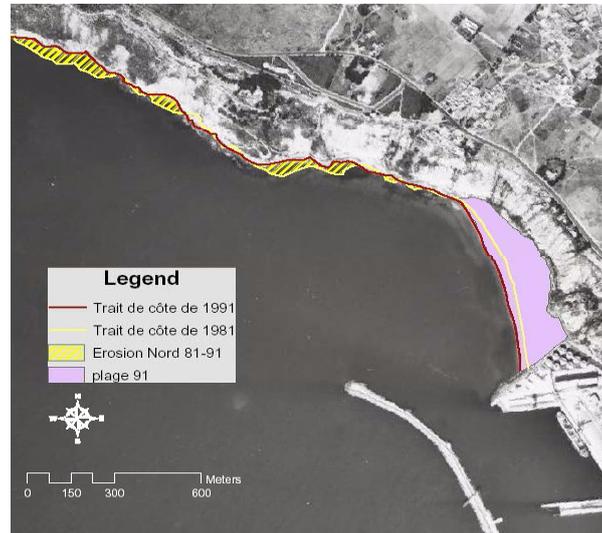


Figure 6. Recul du trait de côte au niveau du littoral de Safi



Photo 6. Érosion des côtes de Safi et menace sur les infrastructures littorales

Ces différents exemples d'érosion côtière et de recul du trait de côte que connaît le littoral marocain, aussi bien, sur la façade atlantique que méditerranéenne illustrent la vulnérabilité des côtes du Maroc aux changements climatiques inéluctables pour ce 21^e siècle.

4. ADAPTATIONS DU LITTORAL MAROCAIN AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Devant les effets dévastateurs des changements climatiques, il est primordial pour notre pays, de mettre en place des stratégies d'adaptation des secteurs clefs de l'économie nationale pour leur faire face. C'est là un enjeu capital du développement durable au

Maroc et un domaine stratégique pour la recherche scientifique nationale afin de mieux estimer les vulnérabilités aux changements climatiques et définir les actions d'adaptations les plus appropriées.

Parmi les adaptations préconisées : la protection des plages pour limiter leur érosion et éviter le recul du trait de côte et la mise en place de programmes de recherche sur l'océan pour de meilleures prévisions.

4.1. Protéger les plages et empêcher le recul du trait de côte

La formation des plages actuelles résulte de la remontée du niveau des eaux lors du réchauffement climatique intervenu il y a 6 000 ans. Cette action fut complétée par celle des fleuves qui fournissaient les sédiments. Leur protection consiste à leur permettre de se recharger naturellement en sédiments en préservant les dunes qui jouent le rôle de réserve de sable, pour compenser l'action de la mer. La recharge artificielle des plages nécessite des techniques perfectionnées et coûteuses. Il est moins important de préserver les plages de l'érosion des vagues par l'édification des constructions parallèles ou perpendiculaires à la plage (cordons d'énrochements) pour absorber l'énergie de celles-ci que de leur permettre de se recharger en sédiments. Dans toute action de protection il faut tenir compte du caractère vivant et évolutif de la plage.

Toutefois il existe plusieurs mesures d'adaptation du littoral dont le choix est motivé par la nature et l'intensité de l'activité socio-économique du tronçon du littoral à protéger et du coût de chaque mesure. Ainsi, dans le cas où les équipements et les habitats à proximité de la plage menacée méritent d'être maintenus, la construction de défenses rigides est envisagée quoique coûteuse (option de résistance à la mer). L'autre option consiste à accepter l'évolution du trait de côte (défense souple) et prévoir le déménagement de peuplements humains et d'autres installations socio-économiques vulnérables. Cette deuxième option d'adaptation doit être soutenue par des études visant surtout :

- l'anticipation de la montée des eaux et l'interdiction de construction en zones menacées,
- la prévision de zones non aménageables, de zones provisoirement aménageables et, enfin, de zones aménageables durablement,
- l'amélioration des méthodes d'estimation des populations exposées aux risques d'inondation.

4.2. Mise en place de programmes d'études de l'océan pour de meilleures prévisions

Afin de prévoir les effets dévastateurs des changements climatiques sur le littoral, des programmes d'études et de recherches doivent être mis en place assez rapidement. Ces programmes concerneraient :

- la connaissance du devenir des pollutions;
- l'aménagement du littoral à travers une bonne connaissance des écosystèmes côtiers et de leur fonctionnement permettant leur aménagement, leur exploitation et leur protection;
- l'évaluation des menaces sur les ressources stratégiques pour les populations côtières comme les plages et l'eau douce;
- la gestion des ressources halieutiques par l'observation et la modélisation des écosystèmes, ce qui devrait contribuer à une meilleure connaissance des déplacements

et des zones de prédilection des poissons et, ainsi, faciliter la gestion et le contrôle des ressources halieutiques;

- le renforcement des capacités scientifiques et techniques en matière de développement de modèles d'évaluation de la vulnérabilité/adaptation pour les zones côtières;
- l'analyse des vulnérabilités du littoral prévues par les différents scénarios de l'élévation du niveau moyen de la mer et les adaptations pour y faire face;
- l'intégration dans les choix socio-économiques et politiques du pays, la vulnérabilité du littoral face aux changements climatiques.
- la prévision météorologique : les mesures de hauteur des vagues et de vitesse du vent, intégrées dans les modèles de météorologie marine permettent la prévision de l'état de la mer;
- la prévision de l'impact des changements climatiques sur les upwellings au large des côtes marocaines;
- l'anticipation des changements climatiques par l'élaboration de modèles couplant les phénomènes océaniques et atmosphériques qui permettent de prévoir plusieurs mois à l'avance l'évolution du climat.

REMERCIEMENTS

Nos vifs remerciements sont adressés aux Professeurs B. Zourarah (Faculté des Sciences d'El Jadida), B. El Moumni (Faculté des Sciences et Techniques de Tanger), A. Ait Fora (Faculté des Sciences de Kénitra) et M. Robin (Université de Nantes, Géolittomer LETG) ainsi qu'à leurs collaborateurs pour les précieuses informations et photos qu'ils ont mis à notre disposition pour illustrer cette conférence.

RÉFÉRENCES

- Agoumi A. (2001) Études de vulnérabilité de trois pays du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie) face aux changements climatiques. *Projet PNUD-FEM RAB94G31* : 2000–2001
- Bromirski P.D., Cayan D.R. & Flick R.E. (2005) Wave spectral energy variability in the northeast Pacific: *Journal of Geophysical Research-Oceans*, v. 110.
- Downing T.E. (1992) Climate Change and Vulnerable Places: Global Food Security and Country Studies in Zimbabwe, Kenya, Senegal, and Chile. Research Paper No. 1, Environmental Change Unit, University of Oxford, Oxford, Royaume-Uni: 54 p.
- Downing T.E., M.J. Watts & H.G. Bohle (1996) Climate change and food insecurity : Toward a sociology and geography of vulnerability. *in*: Climate Change and World Food Security [Downing, T.E. (éd.)]. Springer-Verlag, Berlin, Allemagne, p. 183–206.
- Eele G. (1996) Policy lessons from communities under pressure. *in*: Climate Change and World Food Security [Downing, T.E. (éd.)]. Springer-Verlag, Heidelberg, Allemagne, p. 184–206.
- GIEC (2001) Third Assessment Report - Climate Change 2001: Synthesis Report
- Gitay H., Suárez A., Watson R.T. & Dokken D.J. (2002) Climate Change and Biodiversity. *Document technique V GIEC*. (Eds). IPCC, Geneva, Switzerland. pp 85.

- Mhamdi Alaoui A., Zourarah B., Carruesco C., Griboulard R., El Moumni B., Maanan M. & Benmohammadi A (2006) Évolution morpho dynamique de la zone des passes de Moulay Bouselham (Maroc). Les environnements côtiers, Vannes, Golfe du Morbihan, les 6-7 Septembre
- Niazi S. & Snoussi M. (2005) Évaluation des risques d'inondation dus a une élévation accelerando du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan, Méditerranée Occidentale Marocaine. 3^{èmes} Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement. El Jadida les 8 - 10 juin
- Projet PNUE "Evaluation de l'Impact et de l'Adaptation aux Changements Climatiques (AIACC) dans les zones côtières du Maroc "



LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC OBSERVATIONS ET PROJECTIONS

A. MOKSSIT & F. DRIOUECH

Direction de la Météorologie Nationale
Secrétariat d'Etat auprès du Ministre de l'Aménagement
du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau (Maroc)

Depuis le début de l'ère industrielle, les concentrations des gaz à effet de serre ont considérablement augmenté et ont par conséquent altéré le forçage radiatif du système climat. Plusieurs variations et changements ont alors concerné les différentes composantes de ce système (hausse des températures moyennes du globe, variations des cumuls pluviométriques, augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes telles que tempêtes, crues et inondations, sécheresses ...). En terme de projections futures et selon le 3^{ème} rapport du GIEC, le réchauffement de la terre pourrait d'ici 2100 atteindre 1 à 3 degrés centigrades, les vagues de chaleurs tendront vers la hausse et les vagues de froid seront moins fréquentes. L'évaporation et les précipitations devraient augmenter en moyenne et à l'échelle planétaire mais auraient des tendances à la baisse et à la hausse à l'échelle régionale. Le niveau des mers devrait s'élever de 15 à 90 centimètres selon les scénarios et des régions entières, comme les côtes et les grands deltas, seraient menacées.

Vu leur aspect global et leurs conséquences étendues, les changements climatiques suscitent l'intérêt du monde entier et de tous les spécialistes : scientifiques, géographes, économistes. Cependant, la complexité du domaine, sa sensibilité et les hautes compétences scientifiques et techniques qu'il requière, ont fait que son appréhension ne peut et ne doit se faire que par des spécialistes en la matière. C'est là d'ailleurs une des principales recommandations du GIEC et de l'Organisation Météorologique Mondiale.

Le Maroc, de par ses caractéristiques atmosphériques, océaniques et géographiques, n'est guère épargné par les changements climatiques et les phénomènes extrêmes qui en résultent. Les sécheresses sévères et fréquentes qu'a connu le pays ces deux dernières décennies (1982-1983, 1994-1995) en témoignent.

La Direction de la Météorologie Nationale a lancé, Pour répondre aux préoccupations nationales en matière de changements climatiques et de prévention contre les phénomènes extrêmes, plusieurs programmes et projets dont :

- Le Programme de Surveillance du Climat : qui consiste à mettre en place un réseau climatologique national dense et moderne et une banque de données climatiques

- performante pour l'observation et le suivi de la variabilité du climat,
- Le Programme d'études de détection-attribution des changements climatiques, et de simulations climatiques,
 - La Veille scientifique et technologique du Climat et des changements climatiques par la coopération régionale et internationale,

1. ÉVOLUTIONS ET TENDANCES CLIMATIQUES OBSERVÉES AU MAROC

En plus des études diagnostiques, statistiques et dynamiques sur : la variabilité des précipitations au Maroc, les sécheresses et leurs fréquences, la relation entre les précipitations au Maroc et le système climatique global, la DMN a établi une liste d'indices de changements climatiques relatifs à différents paramètres météorologiques. Les études, réalisées sur l'évolution des indices climatiques relatifs aux paramètres pluviométriques et thermiques durant les 45 dernières années ont fait apparaître des changements et tendances significatifs.

1.2. Cumuls de précipitations

Un changement du régime pluviométrique à l'échelle intra-annuelle a été constaté avec une légère augmentation des précipitations de début de saison en octobre-Novembre et un déclin de celles du cœur et de fin de saison. Ce déclin, statistiquement significatif, avoisine les -26% pour les précipitations cumulées de la saison pluvieuse sur toute la région nord-ouest du Royaume. Les précipitations printanières montrent des tendances à la baisse significatives de l'ordre de -47% à l'échelle nationale. Celles de l'hiver montrent un déclin surtout dans les régions de l'intérieur, mais il reste statistiquement non significatif.

1.3. Évènements extrêmes de précipitations

En terme d'évènements extrêmes, le début et le cœur de la saison pluvieuse montrent une augmentation des cumuls dus aux très fortes précipitations, mais elle est en moyenne faible et non significative.

La distribution géographique des fortes précipitations annuelles montre des tendances à la hausse élevées sur l'extrême nord-ouest et la zone d'Agadir mais, aussi statistiquement non significatives.

à l'inverse, en février-mars-avril, on constate une tendance à la baisse des cumuls dus aux fortes et très fortes précipitations. Cette baisse est significative et importante pour les fortes précipitations. Sur la région Nord-Ouest la baisse est de 38 mm en 45 ans. A l'échelle nationale, la baisse est de 23 mm en 45 ans; soit plus que le quart de la valeur maximale enregistrée sur la période 1962-2005.

1.4. Indices de sécheresse

L'étude des indices de changements climatiques relatifs aux sécheresses montre un allongement des périodes intra annuelles de sécheresses et donc une augmentation de

leur persistance temporelle. Cet allongement est significatif en février-mars-avril; période importante pour l'agriculture nationale, et atteint en 45 ans, une valeur de +15 jours à l'échelle nationale et +13 jours au Nord-Ouest.

Le début de la saison pluvieuse (septembre–octobre) fait apparaître des tendances au raccourcissement mais faibles et non significatives.

L'étude de la température moyenne annuelle sur tout le Royaume a montré une augmentation significative de celle-ci de l'ordre de 0.16 degrés centigrades par décennie.

1.5. Vagues de chaleur et de froid

L'analyse de l'évolution à l'échelle nationale des phénomènes extrêmes de vagues de froid, montre des tendances à la baisse significatives de -0.246 j/an pour le Maroc soit une diminution de 11 jours en 45 ans. La baisse dans l'occurrence des vagues de froid est aussi significative pour le Nord-Ouest mais plus faible.

L'occurrence des vagues de chaleur évolue vers la hausse avec des tendances de même ordre de grandeur que les vagues de froid. Cette évolution est, cependant, statistiquement non significative.

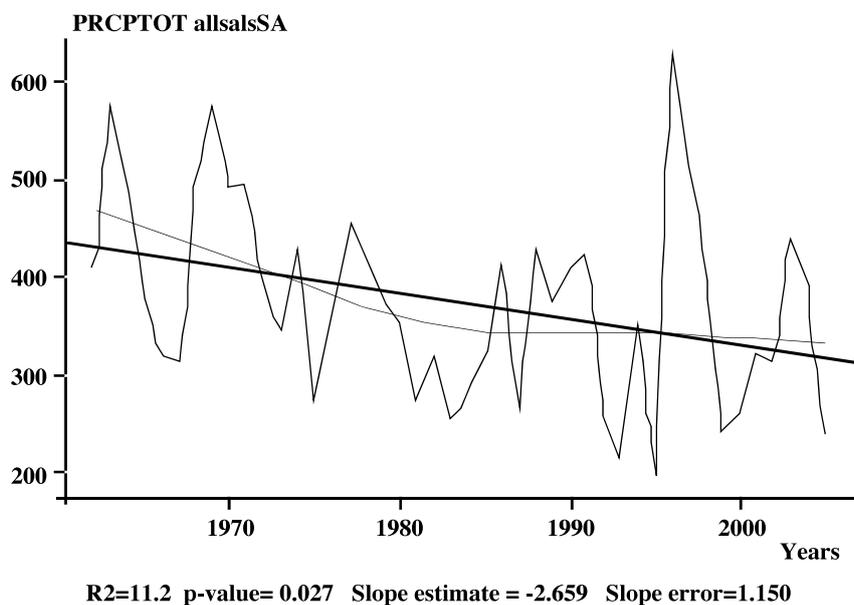


Figure 1. Précipitations moyennes nationales cumulées sur la saison pluvieuse

1.6. Totaux annuels de jours chauds et de jours frais

Les totaux annuels de jours frais avec des températures maximales ne dépassant pas les 15°C ont connu une nette diminution avec une tendance de -5 jours par décennie.

Ceux des jours chauds avec des températures maximales supérieures à 35°C montrent des évolutions vers la hausse mais faibles et statistiquement non significatives.

L'évolution des indices thermiques confirme donc le réchauffement observé. La tendance du climat marocain à l'assèchement en dépit de ce réchauffement est certainement accompagnée d'une réduction du contenu en eau du sol et donc d'un déficit dans les ressources hydriques.

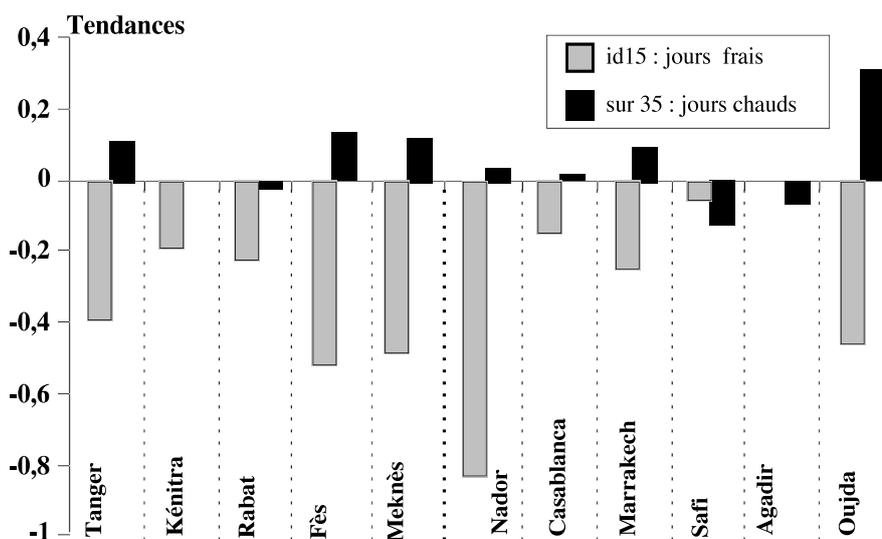


Figure 2. Tendances des indices relatifs aux jours chauds et frais (période 1962-2004)

2. PROJECTIONS FUTURES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE MAROC

La complexité des processus et interactions régissant les évolutions et mouvements atmosphériques fait du domaine des changements climatiques et de leur prédiction un des plus difficiles à appréhender. En effet, en plus des moyens de calcul robustes et des données climatiques multiples, les hautes compétences scientifiques et techniques en la matière sont plus que nécessaires.

L'outil fondamental utilisé dans l'étude des réponses climatiques aux forçages anthropogéniques et donc pour la prédiction des changements climatiques, c'est les modèles numériques couplés de circulation générale océan-atmosphère. Les projections futures du climat sont faites suivant des scénarios allant de l'optimiste au pessimiste. Le GIEC a développé une série de *Scénarios* des émissions futures des gaz à effet de serre, basés sur des suppositions sur la population, sur la croissance de l'économie, sur l'occupation des sols et sur la disponibilité de l'énergie et les combustibles à l'horizon 2100.

Tenant compte du coup considérable des simulations climatiques et pour balayer les incertitudes possibles, l'utilisation des sorties de différents modèles est nécessaire. Dans ce sens, les rapports du GIEC restent des plus consistants en matière de changements climatiques projetés dans le futur.

2.1. Projections issues du GIEC

En adoptant l'hypothèse réaliste qui considère le climat du Maroc semblable à celui du sud de l'Europe pendant l'hiver et à celui du Sahel pendant l'été, les principaux changements projetés, selon le dernier rapport du GIEC, pour notre pays sont les suivants :

- L'augmentation de la température moyenne sur le Maroc, variera entre 2°C et 5°C. Elle sera plus marquée l'été.
- L'augmentation des températures maximales et de la fréquence des vagues chaudes.
- La diminution de nombres de jours frais et de jour de gel.
- Selon le modèle utilisé, le changement des précipitations d'hiver sur le Maroc sera entre -0.1 mm/jour et +0.25 mm/jour, celui de l'été entre -0.1 mm/jour et +0.75 mm/jour.
- La Tendance vers la diminution de l'humidité du sol.

Certains modèles projettent l'augmentation de la probabilité des jours secs et des jours consécutifs sans pluie. Là où la moyenne des précipitations décroît, la probabilité de sécheresse croît de façon marquée. Les sécheresses dans ces régions deviendront plus longues et plus sévères

2.2. Simulations avec le modèle Arpège

Plus récent que le troisième rapport du GIEC, une simulation a été réalisée avec le modèle français ARPEGE-Climat (Météo-France), dont une version est installée sur le calculateur de la DMN, en mode étiré pour la période 2070-2099. Elle est faite pour étudier les scénarios futurs des changements climatiques sur le bassin méditerranéen. La forte résolution du modèle permet de mieux prendre en compte les propriétés de surface qui affectent les distributions géographiques des variables climatiques des pays du domaine dont le Maroc.

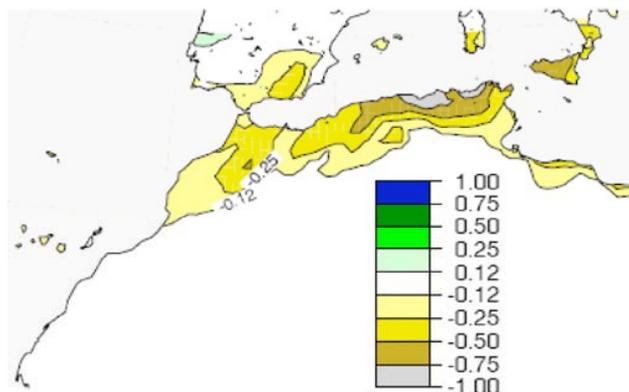


Photo 1. Anomalies moyennes de précipitations hivernales simulées par Arpège

Les prévisions de température de cette simulation concordent globalement avec ceux du GIEC à savoir un réchauffement de l'ordre de 2 à 5° C mais avec un gradient Est-ouest bien prononcé en été. Les augmentations seront de l'ordre de 2 à 3°C sur la côte atlantique et atteindront les 5°C en se déplaçant vers l'intérieur. Le réchauffement en hiver va de 2 et 4°C.

La tendance vers l'assèchement est associée à une baisse significative du contenu en eau du sol ce qui peut avoir des impacts considérables sur les ressources hydriques et la végétation.

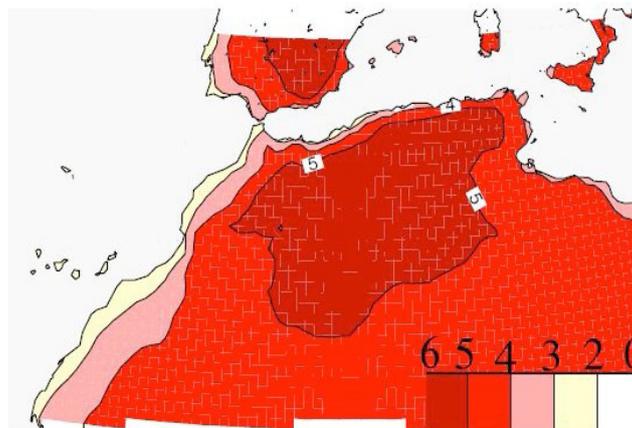


Photo 2. Anomalies moyennes de températures estivales simulées par Arpège

3. CONCLUSION

Les programmes de la DMN ciblés sur le suivi et l'étude des changements climatiques en général et le cas du Maroc en particulier seront suivis en matière:

- d'étude du passé afin d'approfondir nos connaissances sur tous les paramètres météorologiques ainsi que leur comportement,
- de suivi en temps réel et d'assistance en matière de changements climatiques,
- de prévision en introduisant de nouveaux prédicteurs et de nouvelles méthodes,
- de nouvelles simulations sur les futurs changements qui intéresseront notre région à l'aide de modèles régionaux en tenant compte des éventuelles évolutions des différents paramètres influant sur les variations climatiques (CO₂, végétation-déforestation).

Des travaux et études sont entamés dans l'objectif de disposer la DMN d'un modèle dynamique couplé océan-atmosphère vu l'importance de la dynamique océanique dans la prévision à long terme.

Des études d'évaluation des impacts prévisibles sur la santé en cas de changements climatiques notables seront aussi entreprises.



CHANGEMENT CLIMATIQUE, DÉFICIT HYDRIQUE ET DÉSERTIFICATION, INTERACTIONS ET IMPORTANCE DE LA DIMENSION HUMAINE

Abdellah LAOUINA

Université Mohammed V-Agdal, Rabat, Maroc
Coordinateur du Comité National Scientifique et Technique
- Changements Climatiques -

Résumé

Dans le contexte des environnements semi-arides fragiles, la vulnérabilité au changement, qu'il soit d'origine climatique ou lié aux transformations dans l'utilisation des terres, est très grande, souvent accompagnée d'une augmentation de la menace de crise hydraulique et de dégradation des ressources naturelles (Coelho *et al.*, 2000; Ragab & Prudhomme, 2000).

Dans les trois domaines du changement climatique, du déficit hydrique et de la désertification, la responsabilité anthropique est forte et s'exprime en termes d'émissions excessif de CO₂ ou de surpâturage. Les changements initiés par l'homme, notamment l'affectation des gaz à effet de serre, de surpompage, de gaspillage ou de pollution de l'eau, de prélèvement terres, les évolutions technologiques, mais aussi les changements juridiques ou institutionnels, sont aussi importants, sinon plus que les facteurs d'ordre naturel. Enfin, l'intervention de l'homme, notamment les décisions et les choix politiques, à la recherche d'alternatives, est fondamentale pour la correction ou l'atténuation des tendances négatives engagées.

Les impacts et rétroactions entre secteurs multiples sont la règle dans le suivi des phénomènes des changements. Le changement climatique induit des effets sur les ressources en eau et en terres et peut être considéré comme une pression supplémentaire pouvant conduire à la désertification et au stress hydrique. Par ailleurs, la dégradation des terres et du couvert végétal et la réduction du potentiel en eau, dans les sols notamment, conduisent à l'éclaircissement de la densité végétale et donc à la réduction du rôle que joue la végétation comme puits pour le carbone et mènent ainsi à une exagération de l'effet de serre. Les ressources en eau, superficielles et souterraines s'en ressentent, avec des effets complexes, parfois en contradiction avec les facteurs qui en sont à l'origine.

1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

1.1. A l'échelle de la planète

Les rapports du GIEC, notamment le dernier (GIEC, 2007) sont formels : un réchauffement sans équivoque avec un rythme actuel de $0,13^{\circ}/10$ ans, une élévation du niveau de la mer qui, aujourd'hui atteint le rythme de $3,1$ mm/an, due d'abord à l'expansion marine du fait du réchauffement mais aussi à la fonte et au recul des neiges et des glaces. Sur 150 ans, l'augmentation totale de température est de $0,76^{\circ}$ (GIEC, 2007).

A cause de la très forte augmentation d'émissions de GES, depuis la révolution industrielle, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère en Eq C est de 379 ppm en 2005 alors qu'elle tournait autour de 280 avant 1850. Cette concentration risque de continuer à augmenter, plus ou moins vite selon les efforts mis en place pour atténuer les émissions. De ce fait, les projections du réchauffement mondial, selon divers modèles annoncent des valeurs de $1,8^{\circ}$ à 4° d'ici 2100.

Cette situation s'explique autant par la multiplication des facteurs d'émissions de GES (industries et transports) que par la réduction des puits de carbone, due aux changements dans l'utilisation des terres (déforestation et dégradation végétale). L'accroissement le plus rapide de la concentration de GES s'est fait lors des 10 dernières années, avec un rythme de $1,9$ ppm /an (GIEC, 2007). La part des émissions de CO_2 issu des énergies fossiles atteint la valeur de $7,2$ Gt de carbone par an, alors que les changements dans le couvert végétal et l'utilisation des sols contribuent pour $1/5$ à $1/6$ des émissions totales. La concentration d'aérosols a un effet relatif de refroidissement et contrecarre donc relativement le forçage radiatif dû à la concentration de GES.

L'effet est important sur les températures, le niveau océanique et le manteau nivo-glaciaire. En plus du réchauffement et de l'élévation du contenu de l'air en vapeur d'eau, il faut signaler le réchauffement en profondeur de l'eau marine (jusqu'à 3000 m de profondeur) - ce qui aboutit à l'expansion de la masse océanique - et le déclin des glaciers de montagne, des calottes glaciaires, des chutes neigeuses et de l'enneigement. La remontée marine qui a enregistré une moyenne de $1,8$ mm sur les 40 dernières années s'est accélérée pour atteindre le rythme actuel de $3,1$ mm/an. Elle a donné pour le 20^e siècle un cumul de $0,17$ m.

Le changement affecte aussi les précipitations, mais de manière plus différenciée à l'échelle des régions. Globalement, on enregistre des épisodes de sécheresses plus longues et plus sévères, depuis 1970 (Mokssit & El Khatri, 1995). C'est le cas de la sécheresse du Sahel. On enregistre aussi une augmentation de fréquence des événements de fortes précipitations, car l'air plus chaud contient plus de vapeur d'eau et peut donc générer – si les autres conditions le permettent – des pluies prolongées et intenses. Les cyclones tropicaux sont plus violents et plus fréquents. Enfin les épisodes de vagues de chaleur sont plus marqués, alors que le nombre de périodes froides tend à se réduire. Les projections pour le futur sont pessimistes, même si de gros efforts sont fournis pour réduire la croissance rapide des émissions de GES.

1.2. A l'échelle du Maroc

A l'échelle du Maroc, des projections par modélisation ont été faites à l'horizon 2020 (MATUHE- UNDP, CNI, 2001). Ces projections annoncent une augmentation de la température moyenne d'environ 0,6 à 1,1° sur 20 ans (selon les modèles utilisés). Par contre, pour les précipitations, les modélisations donnent une plus grande dispersion des résultats (on aurait une réduction moyenne de 4% sur 20 ans). La fréquence et l'intensité des événements extrêmes seront en hausse (orages frontaux et convectifs, sécheresses très sévères, nombre de jours de pluie plus réduit).

Une simulation des changements thermiques et pluviométriques pour la période 1990-2050 a été faite dans le cadre du Projet inter - universitaire CLIMED (Portugal, Hollande, Maroc, Tunisie), financé par l'Union Européenne. Les impacts du changement climatique ont été modélisés par l'utilisation de la technique de «downscaling» à partir des résultats du modèle de circulation générale de l'Université de Melbourne (Simmonds *et al.*, 1988) vers le modèle local MM5 (Dudhia, 1993).

Plusieurs phases d'analyse ont été conduites (Van Dijck & al., 2006):

- l'application du GCM (modèle de circulation générale) à la région méditerranéenne, en se basant sur des mesures statistiques;
- la sélection de journées particulières, ayant un intérêt hydrologique dans la région de Rabat ;
- la conduite de simulations utilisant le modèle local MM5 et leur comparaison avec les données climatiques de ces périodes;
- l'application du modèle local à des événements pluviométriques particuliers;
- le traitement de données et leur analyse pour les préparer en vue de la modélisation hydrologique;
- la prospective climatique 2050 pour la région atlantique du Maroc.

Le modèle de circulation générale utilisé correspond à une résolution spatiale de 3,75° de longitude et 2,25° de latitude. Il inclut à la fois les variations saisonnières et diurnes. La simulation pour 1990 correspond au forçage de GES de la fin du 20e siècle (348 ppm). Celles de 2050 considèrent l'augmentation prévue par les recherches en terme de concentration de GES (environ 634 ppm).

L'événement pluviométrique a été défini comme correspondant à une chute de = 5 mm par jour, durant plus de 2 jours consécutifs, en comparaison avec les enregistrements de la station de Rabat. La durée des événements simulés (moyenne de 3 jours), la moyenne de pluie pour chacun (10 – 30 mm / jour) et l'occurrence plus fréquent en novembre, décembre et janvier correspondent bien aux enregistrements actuels de la station.

Les simulations de températures pour l'espace Maroc en 1990 ont été comparées aux données de la station pour la période 1960 – 90. Les températures ont été préférées à d'autres données pour réaliser cette comparaison en raison de leur meilleure représentativité. Comme les résultats ont été concluants, il a été décidé d'utiliser le modèle

local MM5 pour la simulation des températures et des précipitations dans la région des Shoul, pour 1990 et 2050.

Le modèle local MM5 a été appliqué pour zoomer les événements pluviométriques dans l'espace réduit que représente l'espace Shoul et plus particulièrement le bassin - versant de Matlaq.

Les moyennes de températures et de précipitations ont été calculées pour la région Maroc. Les données journalières ont été agrégées dans 4 séries saisonnières (hiver, printemps, été et automne) pour les deux dates de 1990 et 2050. Les températures du Maroc en 2050 auront ainsi augmenté de 2,4° en hiver et de 1,7° en automne. Les précipitations décroîtront en toute saison de 0,2 mm/j en hiver et de 0,3 mm/j en automne. La variabilité augmentera en automne et sera plus modérée au printemps. Les températures minimales augmenteront en hiver de 3,1°, ce qui réduira d'autant les périodes de gel et le nombre de nuits froides (Van Dijck, 2006).

Les événements pluviométriques simulés en 1990 et 2050 donnent des caractéristiques comparables en terme de durée, mais le volume simulé en 2050 sera plus important et donc de plus forte intensité.

1-3- Les enjeux du changement climatique

Les enjeux du changement climatique sont multiples car de nombreux systèmes naturels et humains sont sensibles au climat. Les modifications en cours ont des effets multiples, dont plusieurs sont négatifs. On peut les évaluer au niveau du bilan offre / demande, en produits alimentaires, en eau, ...; on peut aussi les appréhender à travers la possibilité ou non d'utiliser certaines ressources, notamment pour les loisirs; mais on peut aussi s'intéresser aux valeurs attachées à certaines ressources perçues comme purement économiques et donc à valeur simplement marchande ou au contraire à d'autres ressources beaucoup plus précieuses et faisant partie du patrimoine, parfois même de l'identité d'un territoire ou d'une communauté. Plus simplement dit, on peut affirmer que le changement climatique «impacte» fortement le développement durable dans toutes ses composantes.

Ces enjeux sont d'autant plus importants que les systèmes ont une sensibilité de plus en plus accrue. Le changement climatique a des effets importants directs et indirects, sur le régime hydrique, les systèmes vivants, les sols et sur l'économie à travers l'agriculture, notamment, mais aussi sur toute une série de manifestations à caractère plus en relation avec l'homme et la société, comme la santé, la qualité de la vie etc. Il intervient aussi en augmentant la vulnérabilité des systèmes naturels et en exposant l'homme et son environnement à des phénomènes de stress plus aigus, même là où localement on pourrait s'attendre à une amélioration de la qualité du milieu (exemple du réchauffement dans les zones froides).

Pour réduire ces impacts directs et indirects et pour limiter la vulnérabilité des systèmes, les sociétés sont amenées à prendre des mesures d'ordre politique, mais aussi des mesures spontanées adoptées par les populations. Les choix politiques pour parer à ces nouvelles situations sont de deux ordres.

- On peut agir pour l'atténuation des changements climatiques, en remontant aux sources du problème et en essayant soit de limiter les sources d'émissions de GES responsables du réchauffement, soit en augmentant les possibilités de séquestration du CO₂ dans ce qu'on appelle les puits de carbone (forêts, autres formes de végétation à fort pouvoir d'absorption de CO₂, conservation de la matière organique des sols).
- L'autre possibilité est d'agir pour s'adapter aux effets du changement et pour réduire au maximum la vulnérabilité des systèmes. Cet effort est d'autant plus réussi qu'il débute tôt, anticipant ainsi sur des effets non encore déclarés ou encore modérés.

Mais les risques sont difficiles à préciser, du fait de l'importance des incertitudes concernant les rétroactions dans les systèmes.

Le monde est par ailleurs hétérogène sur le plan du développement des capacités sociales à réagir et à s'adapter. Les sciences humaines n'ont d'ailleurs pas suffisamment développé d'outils d'analyse pour évaluer les coûts et les valeurs des ressources dégradées, totalement perdues et celles que l'on a pu conserver, grâce à un effort, lui-même difficile à évaluer. Les scénarios d'incidence se basent sur les évaluations, elles – mêmes basées sur des modèles d'impacts prévisibles. Cela dépend de la sensibilité des systèmes au changement, selon une ampleur et un rythme plus ou moins importants, de la fragilité intrinsèque des ressources qui peut exagérer cette sensibilité et de la capacité de la société à s'adapter.

Si on prend le secteur de l'eau pour exemple, les changements en terme de moyenne, de gamme et de degré de variabilité temporelle des températures et des précipitations auront sans aucun doute de larges effets en matière d'écoulement fluvial, avec notamment des modifications de volume, de durée et de fréquence des débits. Mais du fait de la variabilité des comportements hydrologiques selon le climat, d'une région à l'autre, et donc de l'importance de la réaction hydrologique aux facteurs autres que le climat (lithologie, relief, couvert végétal, ...) l'incertitude dans ce domaine est loin d'être négligeable. Selon le GIEC (2001), les éléments les plus sûrs sont l'effet du recul de l'enneigement et de la hausse de l'évaporation sur les débits. On parle là, d'un degré élevé de confiance. En ce qui concerne la part de l'écoulement fluvial et de la recharge des nappes (infiltration) l'effet du changement climatique varie d'une région à l'autre et selon les scénarios.

Si on analyse des cas d'effets des changements climatiques et leurs réponses possibles, on trouve des résultats très disparates. En Espagne, la baisse attendue des apports d'eau pourrait être d'au moins 17% pour 2030. Les réponses à cette baisse se basent d'abord sur la simulation des besoins des cultures, pour adapter les techniques et méthodes d'irrigation et sur la simulation des autres demandes – comme le tourisme – pour déterminer les remplacements possibles des cultures abandonnées et souffrir au minimum des impacts. On en tire donc la conclusion que, si le changement climatique est important, les autres changements, d'ordre maîtrisable par l'homme (exemple des pratiques d'usage des ressources ou des méthodes de gestion) sont au moins aussi importants.

Ce qui est plus sûr, c'est que les pays responsables des changements climatiques ne sont pas forcément les plus vulnérables. Les zones les plus vulnérables sont beaucoup plus fortement affectées, du fait du faible accès aux ressources, à l'information et à la

technologie appropriée pour y faire face et à cause du déficit en compétences humaines et de l'inefficacité des institutions. Or, la qualité de la réponse et sa rapidité dépendent de la capacité d'adaptation et d'anticipation. Par ailleurs, l'homme a plus prise sur l'usage et la gestion de la demande que sur les mécanismes d'offre; or l'action sur la demande doit être menée dans un contexte réellement participatif.

2. DÉGRADATION DES TERRES, VÉGÉTATION ET SOLS

Sur ce chapitre, la forte responsabilité de l'homme est évidente du fait de l'effet de pression sur les écosystèmes et les ressources (Coelho *et al.*, 2000 ; Laouina, 2001). La spirale de la dégradation des terres peut être illustrée par le schéma suivant : le recul de la végétation, dû au changement climatique ou à des causes anthropiques (surpâturage, surprélèvement de bois ou défrichement total), induit une élévation des températures et l'augmentation de vitesse des vents à la surface du sol et donc la diminution d'humidité de la basse atmosphère. L'évaporation augmente ainsi et pompe l'humidité des sols qui ont tendance à s'assécher et à perdre de leur stabilité structurale, du fait la dégradation de la matière organique ; ils deviennent ainsi plus pauvres, ce qui constitue une menace pour le couvert végétal et en augmente la vulnérabilité aux processus de dégradation.

La dégradation des terres peut être envisagée de deux manières. La description et la mesure permettent d'en cerner l'extension et la sévérité. L'analyse de certains indicateurs (épaisseur du sol, texture, structure...) permet aussi d'évaluer le degré de vulnérabilité du sol à la dégradation et donc d'adopter un comportement protecteur pour éviter de déclencher la spirale de dégradation des terres déjà décrite (Laouina, 2002; 2006).

Le Maroc, pays de transition bioclimatique et écologique entre la Méditerranée et le Sahara, possède des ressources fragiles, menacées de dégradation rapide, en cas de surprélèvement. Les milieux naturels sont fortement soumis à la pression anthropique (Laouina, 2002). La très forte occupation de l'espace et l'exploitation soutenue des ressources cantonne les milieux naturels réellement intacts sur des superficies excessivement réduites. Même l'espace naturel, très étendu en montagne, dans les steppes présahariennes et au Sahara, est toujours un espace plus ou moins utilisé par les populations rurales et de plus en plus par les touristes.

Les sols sont très vulnérables et largement soumis à l'érosion. La forêt est en recul rapide; les parcours steppiques sont menacés par la désertification; des biotopes précieux sont constamment et irrémédiablement perdus. Des catastrophes naturelles menacent le territoire, alors que la planification à long terme pour y remédier et les plans d'urgence de sauvegarde sont rarement conçus ou exécutés. Tous ces aspects confondus ont des impacts sur la disponibilité future des ressources.

Ceci s'explique par le fait que l'exploitation des ressources naturelles assure une large part de l'économie et conditionne le développement du monde agricole et rural. L'agriculture de montagne joue un rôle social important ; c'est en ces termes que l'érosion des sols coûte très cher à la collectivité et la lutte anti-érosive ne peut devenir réellement efficace que par le développement des montagnes et la gestion patrimoniale des forêts et

des autres ressources des bassins-versants. Les parcours d'altitude et les parcours steppiques représentent un bien inestimable dont la surexploitation peut conduire à une crise économique et sociale à brève échéance. Il est donc nécessaire de sauvegarder ces ressources par une politique d'aménagement spatial où l'espèce précieuse et le milieu protégé sont à intégrer en tant qu'éléments dynamiseurs de la conception globale. La mobilisation de moyens humains à l'occasion d'une action de conservation peut créer une dynamique locale qui influe alors sur l'ensemble des secteurs et mener ainsi, dans une perspective de développement territorial.

Les ressources naturelles et écologiques constituent une richesse, dont la dégradation peut représenter une contrainte au développement humain et économique et souvent une menace pour l'équilibre social. La prise de conscience est effective de la part des responsables, des opérateurs économiques et de la population en général, du caractère épuisable des ressources et de la dégradation, source d'appauvrissement. Mais la recherche ne s'est pas suffisamment orientée vers l'analyse des secteurs porteurs d'une nouvelle dynamique de développement, en étudiant la contribution possible de la valorisation de l'environnement et du patrimoine, dans l'effort de développement humain et territorial. Ainsi, la protection des ressources naturelles et de la biodiversité devrait aller de pair avec la valorisation des sites d'intérêt écologique par diverses activités comme l'écotourisme ou avec la production agricole biologique et labellisée dans des espaces circonscrits hautement productifs. La composante écologique doit donc être conçue comme base de développement, soutien du développement et non plus comme entrave au développement.

La disparition physique des écosystèmes constitue une perte souvent définitive; mais la destruction interne, parfois sournoise des écosystèmes n'est pas moins grave, car l'appauvrissement des cortèges floristique et faunistique, l'absence de régénération, le déséquilibre des peuplements conduisent à un dysfonctionnement majeur de la dynamique écologique. Cette évolution altère profondément la qualité des milieux et ne leur permet plus d'assumer pleinement leur rôle écologique, ce qui aboutit à la destruction à terme, du patrimoine naturel.

La responsabilité internationale et régionale de ce patrimoine impose d'assurer la pérennisation des richesses pour le bénéfice des générations futures, en en valorisant les composantes principales. C'est pourquoi la politique de protection doit s'appuyer sur la structuration de l'espace, en fonction d'une "zonation par objectifs" distribuant rationnellement les vocations dégagées, en fonction des contraintes locales et du contexte écologique, humain et économique. La prise en compte des avis locaux est nécessaire; il s'agit de "*créer un espace de dialogue et de négociation*" et non pas d'imposer une vision technocratique (Eaux et Forêts, 1995). Les espaces protégés contribueront ainsi à la constitution de banques de matériel génétique et à la sauvegarde des "*derniers réservoirs génétiques, dynamiseurs des flux géniques, indispensables à l'épanouissement des formes de vie sur terre*".

La protection du patrimoine naturel est à envisager d'un point de vue intégré; en ciblant les espèces menacées et les habitats précieux, on prend aussi en considération les grands

bassins, les systèmes hydrologiques, les budgets sédimentaires, les milieux côtiers, les forêts, le sol, les nappes phréatiques et le sous-sol, autant de maillons d'une chaîne indispensable au maintien des grands équilibres écologiques planétaires et bases vitales pour le développement de la communauté humaine.

La programmation des aménagements de protection et de réhabilitation des habitats, de repeuplement faunistique s'articule nécessairement avec une politique de valorisation écotouristique. Même si la protection de la nature n'est pas affaire de «rentabilité» car son impact économique n'est perceptible que sur le long terme. L'approche purement sentimentale a par contre prouvé son inefficacité. Il s'agit en fait de préconiser une voie médiane avec à la fois une ferme volonté de protéger le patrimoine, quel qu'en soit le coût et d'en valoriser rationnellement certaines composantes, apportant ainsi une certaine intégration au sein du tissu social et économique.

Mais il existe aussi une interaction forte entre les processus de dégradation des terres (désertification) et ceux du changement climatique. Celui-ci, par l'exagération de l'irrégularité des pluies (événements extrêmes), par le réchauffement, responsable de l'augmentation de l'ETP, et par la diminution des pluies (envisagée de manière unanime pour la région méditerranéenne), initie des processus de dégradation des terres et, cela, au même titre que du fait d'une utilisation excessive, ou irrationnelle des ressources. La dégradation de la végétation et de la matière organique du sol oriente à la fois vers un processus de désertification et un processus de moindre séquestration du CO₂. Ce dernier processus expliquera ainsi une exagération de l'effet de serre, lui-même source d'une désertification plus poussée.

3. COMPORTEMENT DE L'EAU ET DES TERRES, EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RELATIONS AVEC LE COUVERT VÉGÉTAL

3.1. Résultats globaux des modélisations

Les résultats de la Communication Nationale Initiale (MATUHE, 2001) prédisent une baisse des débits et de la recharge de la nappe phréatique, du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration et de la baisse des précipitations, générées par l'effet de serre. Or, les ressources en eau disponibles sont déjà déficitaires dans plusieurs bassins hydrauliques (Margat, 1995; Aït Kadi, 1998). La seule alternative est donc d'adopter des comportements d'économie de l'eau, pour faire face à la nouvelle situation, pouvant générer dans certaines régions, des pénuries prononcées.

Les modélisations réalisées prédisent aussi une concentration plus grande des précipitations dans le temps et donc des effets adverses en terme de crues dévastatrices et de déficits accusés, ce qui oblige à programmer des équipements hydrauliques ayant de plus grandes capacités de réserve et donc plus coûteux. La baisse des débits et la plus forte concentration auront aussi des effets sur la qualité de l'eau (moins d'auto-épuration, envasement des retenues...).

Les méthodes d'appréhension de ces tendances posent néanmoins des problèmes en terme d'incertitudes relativement à certaines des conclusions et posent donc le problème de la fiabilité à l'échelle de chaque région, de résultats globaux, difficiles à transposer à certains espaces, du fait de la grande variabilité des conditions. Cela s'explique par la multiplicité des déterminants du débit et la complexité des réactions selon le poids que joue localement chacun de ces déterminants.

3.2. Changement climatique, couvert végétal et hydrologie

Les effets de la variabilité et du changement climatique sur l'hydrologie sont ambigus et parfois contradictoires. On peut rapporter le cas de l'Afrique tropicale qui a enregistré une diminution générale des pluies ; pourtant la réponse hydrologique est très variable d'une zone à l'autre. Dans la zone tropicale humide, il s'en est suivi une baisse généralisée des débits. Par contre, au Sahel, on a souvent enregistré une certaine augmentation des débits, du fait de l'accroissement de la part du ruissellement direct sur des terres stérilisées par la dégradation.

Le comportement hydrique des terres est variable sous forêt, dans les parcours et dans les terres cultivées ; c'est pourquoi il doit être suivi sur le terrain en utilisant plusieurs techniques (mesures du ruissellement et de la perte en terre sur parcelles (Laouina *et al.*, 2000 ; 2003 ; Nafaa, 2002), estimations du ruissellement et de la turbidité, par simulation de pluie, mesure des débits liquide et solide, suivi de paramètres multiples et de leur évolution spatio-temporelle (Laouina *et al.*, 2004, Van Dijck, 2006).

Ce comportement diffère en fonction des caractéristiques physiques du sol, de la topographie et de l'exposition (Conacher & Sala eds., 1998), mais aussi selon leur utilisation agro-pastorale, les modes et techniques de gestion de l'eau et des terres (Roose *et al.*, 1993).

Les modes de gestion des terres sont souvent inadéquats, avec des pratiques qui accentuent la vulnérabilité des terrains. Les transformations agraires en cours peuvent exagérer les dynamiques hydriques, notamment le ruissellement et l'érosion. Ces dynamiques renforcent la situation de pénurie de l'eau in situ (réduction de l'infiltration) comme en aval (envasement de la retenue).

L'incertitude provient de la variabilité de comportement d'un même type de paysage naturel. De nombreux auteurs se sont intéressés au comportement hydrologique des milieux forestiers et sont unanimes sur le rôle régulateur des débits, joué par la forêt ainsi que sur le rôle de réduction des transports solides. Mais les résultats des recherches divergent en ce qui concerne les volumes d'écoulement issus des massifs forestiers. Le comportement hydrologique varie selon la nature des peuplements (feuillus, conifères), la composition floristique, le taux de recouvrement des sols et le degré de dégradation. Le changement climatique qui aurait, après une période d'inertie, un effet en terme de recouvrement végétal, aura donc forcément par ce biais aussi un autre impact hydrologique. Mais cet impact reste très difficile à simuler.

Pour mieux estimer l'impact de la dégradation du couvert végétal sur le ruissellement, deux types de dispositifs expérimentaux ont été appliqués, dans quatre régions marocaines, la forêt de Ksar el Kébir, la Mamora, la forêt de Benslimane, et la forêt de Bou Khouali dans le Maroc oriental (Laouina *et al.*, 2000; 2003):

- des mesures du ruissellement et de la perte en terre sur "parcelles Wischmeier",
- une estimation du ruissellement et de la turbidité, par simulation de pluie, sur micro-parcelles.

Globalement, le ruissellement intervient de manière systématique sous couvert d'eucalyptus plantés, comme sur les sols dénudés ; il enregistre une forte fréquence sous forêt dégradée ; par contre, il devient exceptionnel sous chênaie mise en défens. Le tassement du sol, la diminution du taux de recouvrement par les herbacées et de l'apport organique sont les causes majeures de la diminution de l'infiltration. Mais pour le cas des couverts d'eucalyptus, l'hydrophobicité du sol est sans doute l'explication du refus systématique d'infiltration.

Par ailleurs, les eaux de ruissellement issues des massifs forestiers sont faiblement chargées en particules détritiques, alors que des taux assez élevés de turbidité sont enregistrés sous forêt fortement dégradée.

3.3. Méthodes d'études de détail, à la recherche des déterminants de l'écoulement

Pour modéliser le comportement hydrologique d'un bassin-versant, en fonction de la variabilité du climat et de l'utilisation des sols, le suivi est plus complexe, car il faut, en plus de l'observation du terrain, et de la mesure répétitive de paramètres divers, disposer des moyens hydrologiques pour effectuer un bilan en eau (mesure en continu des précipitations et de l'écoulement). Il sera alors possible d'effectuer une modélisation spatialisée afin de situer les sites fragiles et les causes de fragilité. On pourra aussi simuler les effets du changement d'un ou plusieurs paramètres, le climat en l'occurrence, sur l'écoulement.

Le micro-bassin expérimental de Matlaq (Laouina *et al.*, 2004 ; Van Dijck *et al.*, 2006) a été sélectionné dans la commune des Sehoul, au S de la Mamora (bassin du Bouregreg, immédiatement en amont de la retenue de barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah). La méthode retenue se base sur l'instrumentation de ce petit bassin-versant comportant un type dominant d'occupation des sols (des cultures annuelles, à dominance céréalière) afin de faciliter l'analyse du comportement hydrologique. Les deux stations hydrologique et climatologique indiquent, à l'échelle d'un pas de temps très court, les relations chutes de pluie/écoulement.

Le travail utilise les données de ces mesures, mais se base aussi sur des investigations plus globales sur le milieu : sols, dynamique de l'eau, évolution des versants, simulation de pluie et calcul de l'infiltration et du ruissellement selon la variété des terroirs et des conditions locales. La cartographie de l'utilisation du sol est confortée par des enquêtes socio-économiques sur les modes de gestion de l'eau et les pratiques de culture et d'utilisation des sols.

La pluie et les débits du micro-bassin ont été enregistrées continuellement depuis Juillet 2001 par, respectivement, un pluviographe digital " data logger ", un pluviographe mécanique et deux stations hydrologiques emboîtées, au sein du bassin-versant de Matlag, le long du même cours d'eau avec, chacune, un déversoir en V, équipé d'un limnigraphe enregistreur. L'instrumentation du micro-bassin permet de maîtriser la dimension hydrologique globale, à deux échelles, amont et aval. Avec les moyens d'enregistrement automatique des pluies et des ruissellements et grâce au modèle LISEM, il est possible de spatialiser afin de comprendre la contribution des différents champs et formes d'occupation des terres.

Le couvert végétal et les états de surface des sols sont considérés comme paramètres importants pour la compréhension du comportement des versants face au ruissellement. Leur variation spatiale et leur développement au cours de l'année culturale ont été suivis par un échantillonnage sur 10 parcelles représentant la variation topographique, les types de sols et les occupations de sols existant dans le micro-bassin. Chacune de ces dix parcelles a été à son tour échantillonnée aléatoirement en 10 micro-parcelles de 1 m², à l'intérieur desquelles on a procédé à des mesures régulières des paramètres de surface comme la végétation, la croûte de battance et la pierrosité. Les dix grandes parcelles ont fait aussi l'objet de mesures de la texture des sols, de stabilité des agrégats, de rugosité de surface, de cohésion et d'humidité. La variation spatiale et dans le temps de l'humidité des sols a été suivie par des mesures au TDR sur 3 transects à 20 m de distance et sur des intervalles de 0-6 et de 10-16 cm de profondeur. Cinq campagnes de mesures ont été réalisées comprenant une phase sèche, deux phases moyennement humides au début de l'automne et à la fin de l'hiver, et une phase très humide.

Certaines propriétés hydriques des terrains ont été étudiées comme l'évolution de l'imbibition des sols, la capacité d'infiltration, les coefficients de ruissellement et le transport solide, à l'aide de simulations de pluie. Deux campagnes de simulations ont été effectuées à deux stades différents d'humidité, en utilisant un simulateur de pluie, doté d'un gicleur, à 2m de hauteur, d'une intensité de l'ordre de 50 mm/h sur une micro parcelle de 0.25 m². Les eaux de ruissellement avec la matière en suspension sont recueillies toutes les 5 minutes ; l'humidité est enregistrée toutes les minutes sur l'intervalle de 0 à 6 cm avec TDR.

Le comportement hydrologique du micro-bassin a été modélisé avec LISEM (Limbourg Soil Erosion Model), un modèle dynamique et spatialisé (Jetten, 2001) afin de reconstruire la répartition spatiale du ruissellement et de l'érosion, et l'évolution du ruissellement pendant un événement pluvieux. Les variables de sortie sont le volume ruisselé total du bassin, le débit de pointe à l'exutoire, le temps d'arrivée à l'exutoire du débit de pointe et le coefficient de ruissellement. L'étalonnage du modèle pour des événements donnés a permis de comprendre le comportement hydrique et hydrologique du bassin-versant face aux différentes situations d'humidité et d'occupation du sol.

Les indicateurs retenus par le modèle sont (Laouina *et al.*, 2006):

- la topographie de détail, par la construction d'un MNT à grande échelle, montrant les voies de cheminement possibles de l'eau sur les versants et dans les talwegs ;

- la nature des sols et leurs caractéristiques de surface, notamment leur structure, la pierrosité, la rugosité,
- les caractéristiques hydriques du sol : humidité, infiltration, conductivité saturée;
- le degré de recouvrement des sols et une appréciation de la végétation et de l'interception, par la mesure de l'index foliaire et de la densité de recouvrement au niveau de la canopée notamment;
- l'utilisation agraire du sol, la diversité des pratiques de culture et des techniques de gestion des eaux et des sols et leur effet sur le comportement de l'eau en surface.

Les transformations agraires ont des impacts sur l'écosystème, in situ sur la parcelle de terre et en aval à la suite des transferts hydriques et de matériaux (Laouina *et al.*, 1992, 2000). Une différenciation importante apparaît, en fonction de l'utilisation des terres et de l'état de surface des sols. C'est pourquoi il a fallu adopter une approche pour suivre ces phénomènes :

- l'identification des formes d'utilisation des terres et des changements agraires en cours, notamment en terme de recouvrement des sols lors des phases les plus critiques et de pratiques de travail du sol pour la mise en place et pour la conduite des cultures;
- l'appréciation des comportements des terres, en fonction de la typologie dressée et des impacts des changements d'affectation ou de techniques, sur la stabilité des champs et celle des versants, sur la dynamique des processus de ruissellement et de dégradation des sols (Le Bissonnais *et al.*, 1995, 1998), ainsi que sur la nature même de ces processus. Au format du champ, sont menés des travaux relatifs aux techniques de labour (araire, labour mécanisé) et les pratiques agricoles ou d'ingénierie pour augmenter l'efficacité de l'eau par infiltration.

Ces transformations des activités agricoles et pastorales ont été étudiées par des observations, des enquêtes et des entretiens, pour l'identification et la connaissance des pratiques d'utilisation des sols et de gestion des eaux, l'analyse des impacts de chacune de ces pratiques, par observation, et l'estimation de la perception par les populations de ces phénomènes, et de leur disponibilité à s'organiser, à participer, à changer de pratiques et dans quelle mesure les paysans tentent d'adapter leurs pratiques aux nouveaux contextes, en vue d'un développement durable.

3.4. Les résultats

Le suivi du comportement hydrologique du bassin de Matlaq durant la période d'étude (2001 à 2003) a permis de recenser plus d'une dizaine de crues qui s'étalent en majorité sur les mois de novembre et décembre. Les crues se caractérisent par des temps de montée très brefs (temps de réponse <5mn) et une courbe de décrue assez courte, témoignant d'un fonctionnement hydrologique relativement simple sans intervention de la nappe phréatique ni de l'écoulement de sub-surface et probablement selon un schéma hortonien classique. Le débit de pointe, le 24/12/01 a atteint 590 l/s, pour un volume écoulé de 1000 m³ qui représente environ 8% de coefficient de ruissellement. Ces crues à caractère brutal sont responsables de la mobilisation d'importantes quantités de sédiments de tailles variables issues du décapage des horizons de surface du sol et des arrachements directs au niveau des chenaux.

Les volumes pluviométriques supérieurs à 20 mm/jour, sont une condition de déclenchement des ruissellements généralisés. Le cumul sur plusieurs jours est important, mais c'est l'intensité d'un événement qui est décisive. Les classes d'intensités supérieures à 20 mm/h, mais encore plus celles dépassant les 40 mm/h ne sont enregistrées avec une fréquence significative qu'en automne.

On a enregistré des cas d'épisodes succédant à des journées de pluie antérieure avec imprégnation importante des sols, comme cela a été le cas en novembre 2002 (crues du 19, puis du 23/11, liées à une recrudescence de l'intensité de chute). Mais on a aussi des cas de ruissellement brutal, dès le premier jour de pluie du fait de très fortes intensités sur sol encore sec et dénudé.

Un autre facteur négatif réside dans l'intervention de pluies antérieures qui ferment la porosité du sol en développant une croûte de battance. Les tests de cohésion et de compaction menés, sur sol asséché, après de premières pluies, donnent des valeurs élevées. La rugosité s'abaisse par contre à des valeurs minimales après ces épisodes de première pluie, ce qui initie en cas de précipitation intense, le fonctionnement du ruissellement direct.

Dans toutes les crues enregistrées, le taux de recouvrement végétal moyen du bassin - versant était inférieur à une moyenne de 25 %. En cette période automnale, les champs sont soit encore en jachère pâturée, débarrassée de tout résidu de culture par le parcours excessif d'été, soit déjà labourés et donc entièrement dénudés, face à l'impact des pluies.

La succession des phénomènes peut se décomposer ainsi : le parcours estival excessif, du fait de la consommation des résidus végétaux et du fait du piétinement donne un sol à la fois dénudé, tassé, mais dont les particules de surface sont effritées. Les premières pluies d'automne reprennent ces particules faciles à mobiliser, les étalent et les tassent en surface sous forme de croûtes sédimentaires épaisses et compactées.

Le chenal principal montre une tendance à l'incision en trait de scie, du fait de l'abandon de la charge sur le plan de la terrasse alluviale bordant le lit du ruisseau et donc l'arrivée d'eaux peu chargées dans le chenal. Cette incision a des effets de déstabilisation sur les berges. Ces dernières montrent des affaissements suite au sapement des rives.

Le fonctionnement des griffes correspond au dépassement d'un seuil important dans la dynamique des versants. Les rigoles naissent surtout dans les champs fraîchement labourés, mais on les observe aussi sur de vieilles jachères abandonnées. Les premières sont effacées dans la saison même ou lors de l'année suivante, alors que les secondes deviennent matures et sont persistantes. Mais elles n'évoluent pas en ravines ; ces dernières sont spécifiques de sites particuliers, favorables à un creusement profond.

L'utilisation du modèle LISEM, couplé au SIG PCRaster, pour la spatialisation des phénomènes hydrologiques a permis de constater, lors des simulations, la présence des zones de ruissellement communes à tous les essais. Il s'agit de la partie centrale du bassin avec des pentes assez fortes (jusqu'à 65%), des parcelles en jachère prolongée, fortement piétinées par le bétail et des sols, peu épais et très dégradés. Ces zones compactées jouent

un rôle important dans la genèse du ruissellement par leur action sur la réduction de l'infiltration. Les autres éléments qui contrôlent la production du ruissellement de surface sont la faible capacité d'infiltration des sols limoneux, aggravée par leur sensibilité à la battance et la faible épaisseur du sol (Van Dijck *et al.*, 2006). De ces travaux, on tire les conclusions suivantes sur les types de réponses hydrologiques possibles au changement climatique :

- le réchauffement et la réduction du volume des précipitations auront un impact négatif sur le bilan d'eau, notamment dans les terrains aux sols minces ou dégradés, à faible capacité de rétention ou de restitution d'eau ;
- la recrudescence des événements pluviométriques extrêmes (pluies très concentrées) sera à l'origine du fonctionnement de rigoles, de l'entraînement de grosses capacités de terres et de crues à forte charge et donc à fort effet d'envasement potentiel des retenues ;
- la raréfaction du couvert végétal du fait du changement climatique, comme de la dégradation des sols exagérera d'autant les processus d'érosion et réduira les possibilités de recharge des nappes phréatiques.

3.5. Les ressources en eau et en terres et leur gestion

Dans le contexte sud-méditerranéen de rareté des ressources en eau et de multiplicité des zones déficitaires, le changement climatique menace donc d'exagérer les déficits et les phénomènes de dégradation, même si de nombreuses incertitudes demeurent et même si les conclusions globales peuvent être entachées d'erreurs. Mais, vu l'incertitude, il est surtout important d'agir sur les autres changements maîtrisables par l'homme (recouvrement des terres, fragilité des sols, formes d'utilisation, gestion et institutions de l'eau).

Dans le bassin de Matlaq, par exemple, des réponses agricoles et de gestion des terres constituent des possibilités d'adaptation à effet non négligeable. La gestion du fumier actuellement est par exemple antinomique de l'objectif de conservation. Seules les parcelles de jardinage continuent à recevoir le fumier organique. Une meilleure distribution pourrait améliorer la stabilité structurale des sols et donc réduire le ruissellement direct. Les résidus de culture, autrefois entièrement broutés, peuvent de plus en plus rester intacts dans certaines parcelles clôturées et non pâturées ce qui pourrait améliorer les conditions hydriques et créer des cellules capables d'absorber les excès d'eau ayant entamé un processus de ruissellement. Les travaux des sols jouent aussi un rôle important. Des travaux moins déstabilisateurs pour les profils pourraient améliorer la cohésion des sols. Mais on peut aussi envisager des formes de conservation des eaux et des sols, avec terrassement et construction de ruptures (Chaker *et al.*, 1996).

Mais il faut surtout insister sur la nécessité d'une prise en compte globale et de la conciliation entre objectifs multiples, parfois contradictoires. Dans le cas du Matlaq, en bordure de la retenue du barrage SMBA, il faut pouvoir concilier entre l'objectif agropastoral et de protection des sols, celui de la recharge de la nappe phréatique, celui de la réduction de l'envasement de la retenue pour la durabilité des volumes d'eau prévus pour l'alimentation du corridor urbain atlantique. Or, chacun de ces objectifs suppose des méthodes particulières. Des compétitions sont possibles. C'est pourquoi l'aménageur se doit d'adopter une vision globale et intégrée (Aït Kadi, 1998).

CONCLUSION

Selon les scénarios les plus fiables, du fait de la baisse des débits et de la recharge de la nappe phréatique, due à l'augmentation de l'évapo-transpiration et à la baisse des précipitations, générées par l'effet de serre, le Maroc devra adopter des comportements d'économie de l'eau, pour faire face à la nouvelle situation, pouvant générer dans certaines régions des pénuries prononcées. Une concentration plus grande des précipitations dans le temps et des effets adverses en terme de crues dévastatrices et de déficits accusés, obligent à programmer des équipements hydrauliques ayant de plus grandes capacités de réserve et donc plus coûteux. La baisse des débits et la plus forte concentration auront aussi des effets sur la qualité de l'eau (moins d'auto-épuration, envasement des retenues...).

La variabilité des comportements hydrologiques et des réponses aux changements climatiques signifie les difficultés qu'il y a à utiliser des modèles simples et plus encore des corrélations spatiales, même si les ressemblances de conditions semblent évidentes. Il est important de tenir compte de paramètres régionaux bien mesurés et suivis, dans le travail de mise en relation du changement climatique projeté avec les ressources en eau, le fonctionnement hydrologique et la stabilité des terres et des écosystèmes.

L'incidence forte des changements non climatiques - comme le changement du couvert végétal (dû beaucoup plus à l'action de l'homme qu'à l'effet climatique), celui des techniques d'occupation des terres, d'utilisation des ressources et des méthodes de gestion de ces ressources - indique qu'il faut s'intéresser aux paramètres sur lesquels l'homme peut avoir directement prise. En particulier l'effort d'adaptation doit s'impliquer dans les domaines de la gestion des ressources et de la gouvernance, dans le but de maîtriser les tendances négatives et les impacts responsables de dégradation. Et donc, en raison des incertitudes sur les effets hydrologiques des changements climatiques, il est urgent d'agir pour corriger les effets que l'on peut maîtriser.

C'est par la multiplication des travaux sur les corrélations possibles - changements climatiques / modes de gestion des ressources / efficacité des institutions en charge de ces ressources - que l'on pourra mieux répondre aux questions posées et proposer des moyens d'adaptation capables de minimiser les effets négatifs des tendances pressenties.

Vu les grosses incertitudes en terme de compréhension des déterminants du bilan d'eau, il est recommandé de renforcer les unités et pôles de recherche travaillant sur ces problématiques et d'améliorer la coordination entre intervenants dans ce domaine. C'est par la multiplication des travaux sur les corrélations possibles eau / changements climatiques / désertification que l'on pourra mieux répondre aux questions posées et proposer des moyens d'adaptation capables de minimiser les effets négatifs des tendances pressenties.

Sur le plan politique, en raison des interactions fortes des trois domaines climatique, hydrique et environnemental, il est avantageux d'opter pour des actions intégrées et gagnantes sur plusieurs plans :

- l'atténuation du changement climatique signifie la réduction des émissions de GES, ce qui pourrait concourir à stabiliser relativement l'effet de serre. Cette réduction des émissions et donc de la consommation d'énergie est par ailleurs, très positive dans les pays non producteurs d'énergie du fait du coût que représentent les importations de matières énergétiques fossiles. Mais l'atténuation des émissions (exemple de la rationalisation des transports) a aussi des retombées importantes en terme de réduction de la pollution de proximité.
- L'adaptation au changement climatique, pour réduire les impacts et la vulnérabilité est en même temps la voie majeure pour la conservation des ressources, le développement de l'agriculture, la garantie d'une eau suffisante, régulière et de qualité.
- La lutte contre la désertification, grâce à des changements positifs dans l'affectation des terres et des changements de pratiques, aura des effets indirects sur le changement climatique et sur les régimes hydriques.

En plus d'une approche politique intégrée, ces trois domaines fondamentaux pour le développement durable du pays, imposent une communication adéquate et active. Il faut se baser sur des certitudes convaincantes sur l'origine, les mécanismes et les impacts. Il faut proposer des mesures à effet tangible, réformer le lieu de prise de décision et le placer au dessus des structures sectorielles. Il faut bien sûr, faire le choix pour le social, mais ne pas oublier l'écologique, notamment la biodiversité, le maintien des habitats et la conservation des espèces précieuses. Dans ces divers domaines, on ne peut trop insister sur l'importance de l'anticipation, c'est à dire, avoir en main une connaissance élaborée, fruit d'une recherche avancée, sur la base de mesures et études suffisantes. Une planification sérieuse doit être préparée, sur la base d'une prospective basée sur des indicateurs sûrs. Il faut enfin, des choix politiques et d'aménagements courageux, en remettant en cause, des vérités qui semblaient établies, mais que les études actuelles paraissent démentir.

BIBLIOGRAPHIE

- Ait Kadi M. (1998) Water sector development through effective policies, institutions and investments: a country perspective. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement/Ministère des Affaires Etrangères. Conférence Internationale "Eau et développement durable". Paris, 19-21 Mars 1998.
- Chaker M., El Abbassi H. & Laouina A. (1996) Montagne, piémont, plaine: Investir dans les techniques de CES au Maroc oriental; *in* Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique. Sous la direction de Reij C., Scoones I., et Toulmin P., CTA- CDCE-Kartahala , pp. 75-86.
- Coelho C., Sala M. Gonzales del Tanago M., Laouina A., Hamza A., Regaya K., Ferreira A., Carvalho T., Chaker M., Nafaa R., Naciri R., Boulet A., Reina L. & Bernia S. (2000): Effects of land use and land management practices changes on land degradation under forest and grazing ecosystems. Final synthesis report, Project ERB-IC18-CT97-0147 (MEDCHANGE),

- Conacher A. & Sala M. (1998) Land degradation in Mediterranean environments of the world, Wiley, 491p.
- Dudhia J. (1993) A nonhydrostatic version of the Penn State –NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.* **121**, p. 1493-1513.
- Eaux et Forêts (1995)
- GIEC (2007) Résumé à l'intention des décideurs, Quatrième rapport d'évaluation du GIEC (Groupe de travail I)
- Jetten V. (2002) LISEM user manual, version 2.x. Draft version January. Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics, Utrecht University, The Netherlands, 48 pp.
- Laouina A., Nafaa R., Chaker M., Naciri R., Coelho C., Ferreira A., Carvalho T. & Boulet A. (2000) La problématique de la gestion de l'eau et du développement des communautés locales rurales au Maroc. *Mosella*, Tome XXV (3-4): 431-446
- Laouina A., M. Chaker & R. Nafaa (2003) : Suivi et mesure de l'érosion hydrique des terres au Maroc, 15 ans de recherche et d'expérimentation, *Rev. Géogr. Maroc*, 21: 79-98
- Laouina A., Coelho C., Ritsema C., Chaker M., Nafaa R., Fenjiro I., Antari M., Ferreira A. & Van Dijk S (2004) Dynamique de l'eau et Gestion des terres dans le contexte du changement global, analyse agro-hydrologique dans le bassin du Bouregreg (Maroc), *Sécheresse*, 15 (1) : 66-77
- Laouina & al., 2006
- Laouina A. (2001) Problématique du développement durable et perspectives environnementales. In Berriane & Kagermeier (Eds.). Le Maroc à la veille du troisième millénaire, Défis, chances et risques d'un développement durable. Actes du 6ième col. maroco-allemand, Paderborn. Rabat, 2001., p. 97-105.
- Laouina A. (2002) Le développement agricole durable et la conservation des ressources naturelles au Maroc. Dans Techniques Traditionnelles de GCES en Milieu Méditerranéen. *Bulletin Réseau Erosion* 21: 11-20.
- Laouina A. (2006) L'approche régionalisée en vue de l'action de lutte contre la désertification. in Développement rural, pertinence des territoires et gouvernance, *Publ. Inst. Nat. d'Aménagt et d'Urb. et RELOR* : 105-119
- Margat J. (1995) Perspective des pénuries d'eau au Maghreb. In: Eau, Gestion de la rareté, colloque international de l'Am. des Ing. Mar., Ponts et chaussées, 1.: 147-170.
- Matuhe (2001) Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement. *First National Communication, United Nations Framework Convention on Climate change, COP7*, 99 p.
- Mokssit A. & El Khatri S. (1995) La sécheresse dans le climat marocain. In: Eau, Gestion de la rareté, colloque international de l'Am. des Ing. Mar., Ponts et chaussées, 1. p. 147-170.

- Nafaa R. (2002) Dynamique du milieu naturel de la Mamora. Paléoenvironnements et évolution actuelle de la surface. Thèse de Doctorat, Université Hassan II, Mohammedia. *Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Mohammedia. Série Thèses*, 3.
- Ragab R. & Prudhomme C. (2003). Climate change and water resources management In: the southern Mediterranean and Middle East countries. Contribution to the 2nd World Water Forum, 17-22 March, The Hague, Netherlands, 42 p.
- Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M & Morsli B. (1993) Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne d'Algérie, Synthèse de 50 parcelles. Cahiers ORSTOM, Pédologie, 28, 2.
- Simmonds I., Trigg G. & Law R. (1988) The Climatology of the Melbourne University General Circulation Model. Publi. N° 31, Dept. of Meteor., University of Melbourne, 67 p.
- UNDP/GEF (2002) Vulnerability of the Maghreb Region to Climate Change, and Needs for Adaptation (Algeria, Morocco, Tunisia). Regional Coordination of the UNDP/GEF, RAB/94/G31 Project, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement, 11 p.
- Van Dijck S.J.E., Laouina A., Carvalho A.V., Loos S., Schipper A., Van der Kwast J., Nafaa R., Antari M., Rocha A., Borrego C. & Ritsema C.J. (2006) Desertification in northern Morocco due to the effects of climate change on groundwater recharge (Rabat region, Morocco), *Proceedings of the Conference on "Desertification in the Mediterranean region, a security issue"*, Kepner, Rubio, Mouat & Pedrazzini eds, 549-577, Springer, Netherlands.

SESSION 4
DISCUSSION



Chris Milly (Guest speaker, USGS, USA)

- Chemical reactions are not included in most of the present generation of climate models. Currently, they are being incorporated in many models, and different groups are at different stages in the process of incorporation. Rather, for the present generation of simulations, there is a step after the economic analyses (which lead to emissions projections) wherein the emissions projections are run through simple box models of the ocean-atmosphere system, which attempt to project future atmospheric concentrations of radiatively active gases, which are then input to climate models. To say more than that would be to go beyond my level of expertise on the subject.

- There was a previous comment concerning the decreases of runoff observed already in Morocco. I must emphasize that the projected changes presented in my talk are changes in the expected value. Superimposed upon this projected downward trend, of course, are internal variations, which, at the scale of the Kingdom of Morocco, are quite large. Therefore, we cannot assume that the observed ~50% decrease in runoff is necessarily any kind of forced change; we should expect a return to normal conditions. However, superimposed upon these fluctuations, we expect an order of tens of percent decrease.

- Concerning the question of vegetation, you noticed, perhaps, that there were no circles for Morocco or for many dry regions on my map [Figure 3]. For simplicity of analysis, we excluded those regions where land changes and water use may have interfered with the climatic signal. However, of course, these are very, very important issues in arid lands.

Concerning the seasonal cycle in California, yes, I removed a slide in order to shorten my presentation, but Governor Schwarzenegger, in his budget address to the State of California just weeks ago, has proposed the construction of two new dams. This is a major change in the political/environmental situation. Traditionally, the more conservative interests have been proposing dams and environmentalists have been fighting them, and now there is a sort of a new dynamic arising. It is somewhat similar, I think, in our country maybe (although not in France), to the question of nuclear energy and the environment.

Ali Boukhari (CITIT)

- Si on essaie de faire un calcul de toutes les masses de glace qui se trouvent aux deux pôles, quel est le niveau d'eau prévisible, quelle est l'augmentation par rapport à un niveau théorique ?

- S'il y'a fonte des glaces, l'acidité de l'eau de mer va changer. Quelle est l'influence sur le monde vivant des océans ?

Omar Assobhei (CTETM)

S'il y a fonte des glaciers, il y aura une élévation du niveau marin de 70 à 80m par rapport au niveau actuel. La fonte va avoir effectivement un impact sur la salinité de l'eau et surtout un impact sur la circulation océanique. Jusqu'à présent,

Rajaa Cherkaoui El Moursli (CSPC)

L'exposé de M. Assobhei est intéressant mais affolant. J'aimerais savoir s'il y a en même temps des discussions avec les agences urbaines ou les décideurs d'une région pour mettre des actions en place?

Omar Assobhei (CSTETM)

Concernant le littoral de Tétouan, l'étude a été faite par des collègues de Rabat. On a parlé d'une intrusion marine de 4km et non de 40km à l'horizon 2040. Ce sont là des prévisions extrêmes. Si les changements climatiques s'accélèrent, on peut s'attendre à pire que ça. Imaginez une augmentation du niveau de la mer de 70m qu'est ce que ça donnerait.

Noureddine El Aoufi (CESDE)

Ce qui a été présenté dans l'exposé de M. Moksit s'est confirmé, ce qui montre la relation entre modélisation et observation. Il y'a peut être un phénomène d'irréversibilité qui mène vers un scénario catastrophe. Mais, les deux exposés de M. Assobhei et de M. Moksit mettent l'accent sur la possibilité de s'adapter : faire adapter l'Homme à la planète; il y a donc des marges de manœuvre laissés à l'action politique, l'action civile, l'action humaine.

Je pense qu'il faudrait faire une distinction entre deux éléments : le risque et l'incertitude. Le risque est probabilisable. J'aimerais qu'on mette l'accent sur la part de l'incertitude dans ces modélisations.

Au Maroc, on parle beaucoup de l'aléa climatique. Est-ce que cette notion d'aléa a encore un sens pour les décideurs de politique économique?

Abdallah Mokssit (Orateur invité, Direction de la Météorologie, Maroc)

Par rapport à la première question, la notion de scénario indique que les choses peuvent se passer autrement. Il ne s'agit pas de projections déterministes mais plutôt de simulations comme l'a mentionné Hervé le Treut. Ceci dit, la marge d'incertitude est étudiée. Actuellement, on a recours à des modélisations ensemblistes utilisant plusieurs modèles, justement pour greffer cet aspect probabilistique pour la qualité de la prévision.

La deuxième question évoque l'aléa climatique. Si on caractérise cet aléa sur l'échelle spatio-temporelle, c'est ce que nous ressentons; par contre ce que nous sommes entrain de traiter à l'échelle du réchauffement global, c'est un aspect cumulatif, ce sont des moyennes. A la rigueur, les aléas se perdent par rapport à des tendances globales.

Mohammed Jellali (CSTETM)

Je n'ai pas vu la dimension interannuelle qui est déterminante dans la gestion de la question de l'eau.

Abdallah Mokssit (Orateur invité, Direction de la Météorologie, Maroc)

La liste des indices comporte 27 indices dont certains sont relatifs à l'interannualité. On avait choisi 6 indices qui montrent un symptôme.

Driss Aboutajeddine (CSMI)

Sur la question du choix des indicateurs, il y a d'autres manières de le faire de façon automatique, c'est toutes les méthodes de résolution ou de réduction de dimension, des méthodes qui permettent de voir quelles sont les corrélations entre ces indicateurs et ne pas les choisir de manière intuitive.

Abdallah Mokssit (Orateur invité, Direction de la Météorologie, Maroc)

Effectivement, dans le domaine des méthodes d'analyse des données, on a parfois tendance à vouloir un peu comprimer l'information en utilisant des méthodes statistiques pour essayer de trouver toutes les corrélations possibles pour synthétiser l'information.

Rajae El Aouad (CSTV)

J'ai été réellement interpellé par un propos de M. Laouina, relatif aux décisions des hommes politiques et de l'urgence qu'ils ont de prendre les mesures qui sont viables dans les cinq années de leur mandat. Je pense qu'on ne peut pas laisser dire un tel propos dans une enceinte comme la notre, pour tout simplement un homme politique il est là et dans les domaines aussi critiques que l'environnement dont on sait que les mesures à prendre ont des impacts sur les 5, 10, 15 années à venir; ils ont l'obligation, combien même ils sont préoccupés de leur réélection, de voir un peu plus loin.

Abdallah Laouina (Orateur invité, Faculté des Lettres, Rabat)

Madame El Aouad a tout à fait raison. L'action politique, de toute façon, s'installe dans un cadre de programmation de longue haleine. Je disais tout simplement qu'il fallait réussir sur des choses précises qui permettent de voir des premiers résultats sur le court terme. Pour le secteur des eaux, pour le secteur de l'agriculture, toute l'analyse prospective et puis toute l'action, c'est une programmation sur le long terme bien sûr

Valeriano Ruiz Hernandez (CITIT)

Il me paraît que les causes du changement climatique ne sont pas suffisamment clarifiées et si leurs impacts sont vraiment très importantes. Il n'y a point de doute que les êtres humains, par le biais du système énergétique, ont une grande responsabilité de ce changement climatique et de ses effets. La session de ce matin a permis de clarifier la situation tant au niveau du Maroc qu'au niveau général.

Claude Griscelli (CSTV)

Je trouve très bien que les climatologues s'intéressent aux changements climatiques et leurs conséquences. Mais, je suis un peu étonné bien que je ne suive pas de façon très

attentive cette littérature, je vois bien dans le métier que j'exerce on ne s'intéresse peut être pas assez aux conséquences lointaines des modifications climatiques. Or, beaucoup d'éléments sont liés au climat, par exemple pour les maladies infectieuses qui comprennent des parasitoses, des maladies microbiennes, des maladies virales et même des mycoses à champignons, il y a de grandes variations saisonnières. On sait aussi qu'il y a des maladies transmissibles par des vecteurs comme les insectes qui sont eux aussi variables dans le temps en fonction des climats.

Enfin, il y a aussi des transmissions de l'animal à l'homme. Mon vœu serait que tous ces scientifiques se lient aussi à quelques médecins qui pourraient participer aux prévisions avec l'esprit de prévention. Bien que les changements climatiques puissent être quelquefois indésirés en terme de santé mais parfois bénéfiques, c'est cet équilibre qu'il va falloir aussi suivre d'un point de vue médical.

Abdallah Laouina (Orateur invité, Faculté des Lettres, Rabat)

Je pense que les changements thermiques ont un impact fondamental sur les problèmes de santé et le groupe du VIAC qui travaille sur la vulnérabilité et sur l'adaptation travaille particulièrement sur ce domaine de manière continue. Le 4^{ème} rapport qui va sortir prochainement permettra de juger cette interface vulnérabilité/adaptation. Il est clair que toute une série d'impacts positifs pourront être enregistrés dans un certain nombre de pays. Psychologiquement, il a été démontré par d'autres recherches scientifiques que le réchauffement même dans les régions les plus froides pourrait être globalement positif sur le plan de la santé, pourrait aussi générer sur le plan psychologique toute une situation d'inconfort non négligeable.

Jean-François Minster (R&D, TOTAL S.A)

Je voulais réagir parce qu'apparemment j'ai suscité des doutes et j'en suis chagriné. D'une part, j'ai travaillé personnellement sur le climat. D'autre part, sur le niveau moyen des mers, j'étais parmi les premiers à publier sur les variations du niveau des mers par satellite. Il n'y a aucun doute que je connais ce sujet et de plus je n'ai pas de doute que la cause la plus probable des variations climatiques est la réalité de l'observation. En matière de science, en matière de changement à l'aval de la physique du climat, il faut non seulement regarder le changement climatique, il faut prendre en compte l'ensemble de ces phénomènes et regarder l'intégration du tout parce que c'est comme ça que ça se passe et c'était le sens de mon discours, ce n'était pas une remise en cause des résultats scientifiques.

Francisco Garcia-Garcia (CSTV)

Je voudrais faire ressortir deux points : la transversalité et l'intersectorialité du thème de cette session. Nous, au Mexique, souffrons également de la désertification et le Maroc ne fait pas exception. Aujourd'hui nous perdons dix fois plus de couverture du sol que nous faisons pour sa restauration. D'où l'importance de développer des programmes publics de conservation des sols pour valoriser le couvert végétal.

Rajae El Aouad (CSTV)

En parlant de l'impact des changements climatiques sur la santé, comme il a été rappelé par Claude Griscelli, je voudrais juste rajouter une donnée, c'est qu'à côté d'un impact direct d'un changement climatique comme ce qu'a vécu la France au moment de la canicule, il y a l'impact qui passe par un certain nombre de vecteurs. Ceci est d'autant plus grave que quand ces changements climatiques surviennent sur des populations qui sont devenues presque vierges. Par exemple lorsque le paludisme a sévi en Europe à une certaine période et a disparu mais avec une adaptation entre le parasite et l'homme. Si jamais, aujourd'hui, le paludisme réapparaît, c'est donc sur des populations fragilisées et vulnérables, et donc les réémergences des maladies sont très graves. Deuxièmement, l'autre volet, c'est que en même temps le parasite ou le micro-organisme en général devient résistant lorsqu'il a été maîtrisé dans une région du monde, lorsqu'on a lutté contre, il devient résistant. Généralement, l'impact des changements climatiques sur les réémergences des maladies infectieuses est très grave et n'est pas du tout comparable à ce qu'on vit lorsqu'on combat une maladie à évolution normale.

J'ai une question qui s'adresse à M. Assobhei sur les trois propositions qu'il nous a faites concernant les adaptations par rapport aux mouvements du littoral et aux prévisions qu'il a avancées, les coûts sont vraiment inacceptables. Est-ce qu'il n'y a vraiment rien d'autre à proposer ?

Omar Assobhei (CSTETM)

Ce que j'ai présenté, ce sont effectivement des options d'adaptation. Je crois que les constructions en dur coûtent très cher et la France s'est bien engagée dans ce sens par la construction de quelques 40km d'enceintes de protection, parallèles à la côte. Actuellement, il y a un débat au niveau de l'Assemblée Nationale Française sur l'opportunité de continuer à lutter contre les phénomènes naturels ou passer à d'autres options en termes d'adaptation, accepter le fait que ces changements sont là et que plutôt il faut que les investissements tiennent compte de cette avancée là.

Noureddine El Aoufi (CESDE)

Comme il a préconisé une solution de revoir la configuration des barrages, j'aimerais interpellier M. Laouina sur le lien qu'il établit entre le modèle de développement agricole, qui est essentiellement un modèle fondé sur les spécialisations en matière d'exportation et ces problèmes de gestion de l'eau ?

Abdallah Laouina (Orateur invité, Faculté des Lettres, Rabat)

Je pense que, de toute façon, ce qui est important entre les deux phénomènes c'est la disponibilité de l'eau et la disponibilité pendant les phases de sécheresse essentiellement, c'est-à-dire pendant des phases qui sont dues à la variabilité beaucoup plus qu'à la tendance globale sur le plan climatique. La variabilité interannuelle, la variabilité inter-saisonnière est quelque chose que nous vivons, que nous avons toujours vécue, mais qui va s'accroître avec le changement climatique puisqu'il est démontré dans les derniers rapports que

c'est cette variabilité qui va être de plus en plus grande, de plus en plus large en région méditerranéenne, qui va faire qu'en plus de l'effet de la tendance globale sur le long terme, nous allons avoir des effets de crise qui donneront des inondations et puis d'autres années qui donneront des sécheresses très graves. Donc, la disponibilité de l'eau est un phénomène dont il faut tenir compte dans la planification pour pouvoir faire n'importe quelle politique agricole.

Taïeb Chkili (CSTV)

J'ai été particulièrement sensible à une des propositions faites par M. Laouina, à savoir celle qui consiste à changer de structures de décision concernant la solution ou le traitement des problématiques. Par cela, il pose en fait la question de la gouvernance. Or, l'expérience montre que chaque fois qu'il s'agit d'élaborer une gouvernance rationnelle de problématiques complexes, il y'a problème. Nous avons plusieurs expériences concernant l'eau, l'aménagement du territoire, le développement rural, et diverses structures de décisions ont été mises en place et ont montré leurs limites. Des agences ont montré leurs limites dans la mesure où elles n'ont pas toutes la latitude de prendre des décisions politiques et, plus souvent, elles sont localisées, territorialisées. Les structures telles que les conseils sont plus des lieux de débat que des lieux de décision. Les comités interministériels ont rarement été un lieu de décision. Concernant les questions complexes, je voudrais savoir si M. Laouina a une idée sur la façon de concevoir cette nouvelle structure capable de gérer cette complexité.

Malik Ghallab (CSMI)

Ce matin, il a été question de réchauffement, de réduction des niveaux des pluies, de dégradation des sols, de désertification, d'impact au niveau de la santé, nous sommes tous très touchés. Nous sommes profondément affectés par ces questions, et à chaque fois qu'elles sont soulevées, nous sommes affectés et nous avons tous perçu l'inquiétude à travers un certain nombre de questions. Comme je suis un optimiste irréductible, je voudrais mettre en avant les éléments d'optimisme que je relève à travers un mot clé, qui a été présenté dans l'exposé d'Hervé Le Treut, qui est celui de planète numérique. Ce mot résume mes éléments d'optimisme. Il s'agit de modèles numériques qui sont multi-échelles et ça a été largement illustré. C'est des modèles intégrateurs qui permettent de prendre en compte divers phénomènes non pas pour se réfugier dans la planète numérique si la planète physique cesse d'être vivable, mais parce que ces modèles numériques, qui sont aujourd'hui devenus fiables et crédibles et sur lesquels nous avons aujourd'hui plus d'éléments de confiance, sont des modèles prédictifs. Ils nous permettent de dire voici des scénarios possibles, et quel résultat tel scénario aura pour la prochaine génération. Ils nous permettent de dire quelle action, avec une marge d'incertitude de plus en plus faible, pourrait avoir de tels effets.

Cette planète numérique n'est pas simplement un outil pour les scientifiques pour pouvoir faire des prévisions, mais elle possède un autre attribut, que je voudrais souligner avec vous, c'est la capacité de visualiser ces prédictions. Je recommanderais que nos actions dans le futur nous permettent d'enrichir davantage les modèles qui nous ont été exposés aujourd'hui.

Jean Dercourt (CSMI)

Je crois qu'aujourd'hui nous avons, pour notre assemblée générale, pris un sujet que nous entendrons traiter d'année en année. C'est une immense découverte qui nous est présentée aujourd'hui et qui pourrait se traduire ainsi : « nous savons que l'homme a pu influencer sur le climat ». Mais, il ne faudrait pas, et je pense qu'être intellectuels nous l'interdit, dire « maintenant circulez il n'y a plus rien à savoir », et commencer à faire comme si tout était acquis. Nous savons beaucoup de choses, nous ne savons pas tout. Il ne faudrait pas comme cela se fait, à chaque fois qu'il y a un gros orage ou une forte tempête, dire ça ne s'est jamais produit parce que ça s'est déjà produit. Nous avons à rester et je crois que c'est notre devoir absolu, d'être toujours plus attentifs à enrichir les modèles qui nous sont apportés, et ce qui me choquerait c'est que l'on soit amené à décliner vis-à-vis du public un modèle que nous savons être important, très couvrant, mais que nous savons aussi que nous n'en connaissons pas tout. Il ne faudrait pas que cela devienne tabou que d'essayer d'enrichir le modèle, de réfléchir le modèle et les principes. J'ai très peur que le mode de fonctionnement du financement de la recherche nous éloigne de tout ce qui consisterait à mieux comprendre que nous avons là une manière de nous exprimer qui est certainement très proche de la vérité, mais que la vérité nous ne l'aurons sans doute jamais dans sa totalité. C'est un bouleversement majeur de notre façon de penser. Il y aura avant et après l'intervention de l'homme sur la planète mais cela reste un objet d'étude, d'inquiétude, que cela reste aussi un objet de questionnement pour mieux comprendre. Je crois qu'il n'est plus permis d'émettre des manières de comprendre comment les sardines se déplacent et de dire que c'est facile, nous avons un modèle, il y aurait un dessèchement de la pensée. Je crois que cette académie, comme toutes les académies, doit maintenir cette question aussi passionnante aussi fondamentale à son ordre du jour pendant quelques décennies encore.

Khalid Sekkat (CESDE)

Je voudrais savoir est-ce qu'on est juste dans une période de transition, à l'échelle du temps, ou si vraiment c'est la catastrophe dont on parle ?

Abdallah Laouina (Orateur invité, Faculté des Lettres, Rabat)

Ce qui est apparu dans le dernier rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), c'est que le changement qui est apparu actuellement est tout à fait différent des changements qui ont eu lieu dans les périodes glaciaires et inter-glaciaires que le pléistocène a connu. Il est apparu que la dernière phase interglaciaire (il y a 125.000 ans) a vu une remontée marine qui n'a pas dépassé 5 à 6 mètres par rapport au zéro actuel. Or, si on continue sur les projections de concentration des gaz à effet de serre et de réchauffement, on pourrait peut-être arriver à plus, mais jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle et avec le rythme actuel de remontée du niveau de la mer qui est de 1,3mm/an, on n'aboutira pas à cette remontée catastrophique qui serait tout à fait dommageable pour les îles, pour toutes les régions côtières, etc. Donc, c'est quelque chose de différent dont les causes sont différentes par rapport aux changements climatiques qui ont eu cours au pléistocène, et donc c'est quelque chose qui est réellement sous l'emprise de l'action humaine.

Silvio Crestana (CSTV)

Je voudrais réagir à la question du collègue économiste relative à la survenue de la catastrophe. J'ai peur que cela n'attende pas l'an 2050 ou 2080 mais que cela est en cours. Nous avons déjà perdu plus de 40% de l'habitat de la planète qui sont irrécupérables. Actuellement les ressources marines sont surexploitées et peut être que dans 40 ans il n'y aura pas de pêcheries du fait du réchauffement des océans. Je crois qu'il ne faut pas parler seulement du changement climatique global mais des changements globaux y compris anthropogéniques.

Hervé Le Treut (Orateur invité, Académie des Sciences, France)

Je voulais intervenir au sujet de la notion de doute et des modèles. En fait, j'étais très marqué par mon expérience au sein du GIEC où une grosse partie des débats porte sur la notion de consensus, sur la manière d'organiser le consensus, donc sur la manière de probabiliser l'information. Si on enferme le débat sur les changements climatiques dans un cadre de croyants et de non croyants, il n'y aurait pas moyen d'avancer. Souvent les questions de doute ou d'incertitude renvoient à deux problèmes, soit un problème de recherche insuffisante, soit au fait que les systèmes naturels ne sont pas complètement prévisibles. Dans cette planète numérique dont on a parlé effectivement, on est passé d'une planète basée sur des principes plutôt physiques jusqu'à un modèle du grand tout qui lui n'est pas un modèle complètement prévisible et on serait bien obligé d'arriver à laisser une part de débat sur ce qui pourrait se produire.

En ce qui concerne le problème du changement climatique, ce n'est qu'un des paramètres de l'évolution future et il est bien clair que c'est le paramètre qui induit les conséquences à plus long terme. Et je crois que c'est une spécificité de ce changement climatique, il y a une part d'inéluctable dans ce qu'on peut mettre en route dès maintenant qui tient compte des inerties considérables du système. Quand on met du CO₂ dans l'atmosphère pour 100 ans, on est obligé de s'en préoccuper dès maintenant, et c'est quelque chose de très spécifique par rapport à beaucoup de problèmes écologiques qui nous ont été posés dans le passé.

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des Séances)

Je voudrais poser deux questions. Dernièrement, j'ai lu dans un journal scientifique que quand on mesure la quantité de CO₂ qui est émise chaque jour dans l'atmosphère et qu'on retire ce qui est absorbé par le couvert végétal et par l'océan, on découvre que la quantité absorbée réellement est supérieure à la somme des quantités absorbées par le couvert végétal et par l'océan. La question qui se posait : où allait la différence? Et jusqu'à quand ces puits qui se retrouvent au niveau du sol vont-ils fonctionner ou est-ce qu'il y a une cause qui ferait qu'ils rejettent tout ce qu'ils avaient emmagasiné?

Ma deuxième question est relative au méthane qui est stocké au fond des océans en raison des températures très basses. Alors que se passe-t-il avec le réchauffement de l'océan?

Albert Sasson (CSTV)

Nous savons par exemple qu'une grande partie des sols des forêts équatoriales (cas de l'Indonésie), qui sont des sols tourbe, emmagasinent des quantités considérables de CO₂ parce qu'au moment où ils étaient formés, c'était du CO₂ assimilé. Ce qui se passe aujourd'hui, c'est que le drainage de ces sols laisse échapper le CO₂ emprisonné. La Hollande est le plus gros importateur européen de l'huile de palme indonésienne pour la production des biocarburants. Les environnementalistes hollandais reprochent de ce fait aux indonésiens que leur bilan n'est pas bon parce qu'il faut tenir compte de cette libération de CO₂ dans le bilan écologique du prix de l'huile de palme.

Jean-François Minster (R&D, TOTAL S.A)

Je voulais compléter par un commentaire sur la partie du cycle du carbone. Evidemment dans les simulations sur les changements climatiques, il faut inclure le cycle du carbone, et Hervé le Treut a montré que sur ce cycle on a une petite perturbation par rapport à des gros flux. En conséquence, la moindre incertitude sur perturbations devient un élément important parce qu'on regarde une petite perturbation. Les bilans actuels sur le cycle du carbone progressent au sens où ils bouclent de mieux en mieux le puits manquant qui était jugé très important dans les années 80'. Cela vient de plusieurs choses, et en particulier les estimations des absorptions par l'océan sont beaucoup plus grandes aujourd'hui qu'elles ne l'étaient il y a 20 ans. Donc, il y a des modifications dans le système, mais il reste de grosses incertitudes sur ces perturbations. C'est un problème qui a beau avoir été étudié depuis 40 ans par des milliers de scientifiques dans le monde, doit continuer d'être étudié pour mieux le maîtriser. D'autant plus que le changement climatique lui-même, la physique du système, comme le changement du gaz carbonique modifient les échanges. Celui qui est le plus souvent cité c'est celui des océans. Il y a effectivement dans le système des perturbations du cycle naturel qui nous servent de références et qui devront s'accroître dans le futur.

Abdallah Laouina (Orateur invité, Faculté des Lettres, Rabat)

Vous avez abordé le problème des sols qui sont un puits important. Ça revient finalement à deux processus qui sont l'humification de la matière organique qui piège le CO₂, et puis le processus de minéralisation qui fait que cette matière organique se transforme à nouveau en minéraux et en particulier en gaz et le CO₂ est l'un de ces produits. Donc, toute minéralisation de la matière organique, que ça soit dans les tourbes des forêts équatoriales ou dans les sols marocains, qui sont assez peu riches en matière organique, est une contribution supplémentaire au forçage du CO₂, c'est-à-dire c'est une contribution supplémentaire à l'alimentation de l'atmosphère en CO₂. Le rôle du CO₂ comme possible augmentateur de la productivité végétale à travers cette photosynthèse serait donc plus intense; et dans ce cas le forçage du CO₂ aurait une retombée positive.

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des Séances)

Cette séance nous a permis de voir toute la complexité du sujet et de voir aussi qu'il y a un risque de banaliser le problème du réchauffement. Il faut rester très attentif et pousser les recherches, améliorer les modèles et les scénarios, ne pas sombrer dans le pessimisme,

mais peut être aussi rappeler que les problèmes sont déjà là. Je pense personnellement à deux aspects chez nous au Maroc : la couverture forestière qui est en train de disparaître à très grande vitesse et si le Maroc ne fait rien il risque de perdre à l'horizon 2020 le 1/3 ou plus de ses forêts. Le deuxième aspect concerne le littoral marocain avec le vol du sable et toutes les conséquences que cela entraîne.

Selon un prospectiviste français : «le problème ce n'est pas d'y croire, le problème c'est de ne pas ignorer». C'est cela qui doit interpellier les hommes politiques pour qu'ils puissent se projeter dans l'avenir; et ça nous ramène au rôle de notre Compagnie qui est de communiquer et de faire savoir à la fois au niveau de l'homme politique et au niveau du citoyen. La grande question c'est de discuter ensemble comment cela doit se faire intelligemment pour conduire à une bonne prise de conscience et de décision.

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Je voudrais attirer l'attention des membres des Collèges, au sein de leurs réunions prévues tout à l'heure, sur la nécessité de fixer un certain nombre de dates qui pourraient convenir à la majorité des membres pour pouvoir préparer les futures réunions et prévoir en particulier une réunion le 18 mai à l'occasion du premier anniversaire d'installation de notre Académie par Sa Majesté le Roi. Par ailleurs, un certain nombre d'instances ont été élues ou nommées lors de la session inaugurale; et en particulier certains de nos collègues, membres de ces instances comme le Conseil ou la Commission des Travaux, posent la question de la durée du mandat. Il est évident que cette durée est au minimum d'un an; nous n'avons pas encore travaillé pendant un an depuis l'installation de l'Académie. Ce que je suggère c'est de considérer le départ à partir de cette session. Je propose que toutes les instances continueront de travailler jusqu'à la prochaine session, et à ce moment là nous procéderons au renouvellement de ces instances, comme prévu par la loi.

Débat général à l'issue des réunions des collèges scientifiques

Vendredi 23 février 2007 après-midi

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des séances)

Pour rappel, il n'y a pas d'ordre du jour ou d'agenda. C'est une discussion libre. Vous pouvez aborder toute question que vous jugerez intéressante ou importante, qu'il s'agisse de questions relatives à l'organisation ou de questions relatives au futur, ou qu'il s'agisse de ce qui s'est passé durant ces trois derniers jours.

Ahmed El Hassani (CSTETM)

Je vais parler de ce que nous venons tout juste de discuter au sein de notre Collège. Notre collègue Jean Dercourt nous a fait le rappel que **l'année 2008 serait l'année mondiale de la terre**, qui a été proposée par les géo-scientifiques et à laquelle toutes les associations ayant trait aux sciences de la terre ont souscrit et que les thématiques de cette année mondiale de la terre concernent **l'eau, le climat, les sols, l'énergie, les matériaux, la santé, la biodiversité, les risques naturels, la mer et les terres profondes**. Tout ceci nous amène à dire qu'il faudrait que, nous au Maroc, et puis aussi voir à quel titre l'Académie Hassan II pourrait contribuer à la préparation et au soutien de tout ce qui touche à cette année mondiale de la terre. Et puisque les thématiques intéressent plusieurs Collèges, il a été évoqué la question de la transversalité entre Collèges qui traitent de la même thématique et donc de voir si au cours de l'année que nous commençons nous puissions tenir des réunions en commun avec des Collèges qui partagent avec nous la même thématique voire la même ambition.

L'autre point abordé est celui des experts, s'il fallait harmoniser et avoir des références communes au niveau de tous les Collèges pour ces experts.

Etant donné que notre Collège avait proposé, via la Commission des Travaux, le thème sur «les changements climatiques», nous pensons utile d'établir une sorte de note de synthèse sur les interventions et les discussions de session que nous avons eu ce matin.

Hernandez Valeriano Ruiz (CITIT)

Je pense qu'il vaudrait mieux, à l'avenir, faire intervenir moins d'orateurs durant les sessions et réserver plus de temps au débat pour chaque thème.

D'autre part, concernant le sujet que je connais le plus, celui de l'énergie et du changement climatique, je suis membre du Conseil National du Climat en Espagne qui vient d'élaborer une stratégie espagnole pour le changement climatique et les énergies propres. **Je crois**

qu'il serait intéressant de mettre en place, au sein de l'Académie, un groupe chargé de traiter les thèmes du changement climatique et le système énergétique. De même, je voudrais suggérer la création d'un groupe de prospective énergétique à l'horizon 2030 pour le Royaume du Maroc.

Mahfoud Ziyad (CITIT)

Je vais revenir sur deux points qui me semblent essentiels pour notre organisation. Notre préoccupation, évidemment, c'est le développement de la recherche, son efficacité et la lutte contre ses faiblesses. Nous allons être appelés à contacter des chercheurs, à discuter avec eux et à les aider à se débarrasser des angoisses qu'ils vivent dans certains cas. Notre Collège a défini des priorités; le problème que nous avons est comment mettre en œuvre toutes ces priorités ? Comment allons-nous aider tous ces chercheurs qui ont besoin qu'on leur vienne en aide ? Il ressort de l'ensemble des discussions qu'un projet déposé est finalement le meilleur moyen pour aider ces recherches qui se développent. Il faut réfléchir au financement de ces projets, leur suivi et leur évaluation. Le deuxième point concerne les Collèges. Il faut peut être standardiser leur méthode de travail, qui est à la base de toute la réflexion engagée ici.

Albert Sasson (CSTV)

Il y a la session annuelle qui se termine, il y a l'Académie. Il faut qu'il s'instaure encore plus de dialogue entre collègues qui s'apprécient et qui font partie de la même Compagnie. Il y a unanimité sur ce point et c'est quelque chose à organiser. En particulier, il faudrait penser à nos collègues qui viennent de l'étranger et qui font de très longs voyages pour assister et qui voudraient profiter de cette session pour connaître les groupes et les centres de recherche. Ce serait les collègues marocains des différents Collèges qui leur organiseraient à l'avance ce type de visites parce que ça va enrichir plus tard les propositions de projets de recherche.

Dans chacun des domaines que nous avons abordés, il est possible de dégager, à la lumière des présentations et des débats, un avis à l'intention de Notre tuteur.

Pour ce qui est des publications, je suis pour un bulletin d'information de qualité plutôt que pour un bulletin et une lettre.

Sur la question de transdisciplinarité, lorsque vous regardez les projets, il y a beaucoup de partenaires qui sont impliqués. Il faut qu'il y ait de l'harmonisation des actions des Collèges pour que le résultat, au niveau de l'Académie, soit utilisable et plus palpable. Les Collèges ont été, eux mêmes, des fusions de champs et de disciplines. Déjà, de par leurs dénominations, les Collèges sont inter- et pluridisciplinaires.

Mostafa Bousmina (CSPC)

La chose qui m'a fait extrêmement plaisir en étant ici, moi qui suis installé à l'étranger, c'est de voir que la recherche démarre au Maroc, qu'il y a beaucoup de choses qui se font. **Je voudrais saisir cette occasion pour demander à la fois à nos collègues membres associés et à nos collègues marocains installés à l'étranger d'associer beaucoup plus les chercheurs marocains dans leurs laboratoires et leurs projets de recherche et ainsi ils rendront un grand service à ce pays.**

Abdelali Haoudi (CSTV)

I think that the first role of funding, that our Academy has, is going well. But I would like to emphasize one role that is perhaps one of the most important roles, a role that I will call "Think tank". It is really important to establish some sort of mechanism or process by which our colleges can transmit their advice not just in general terms but be a targeted advice to Moroccan stakeholders and decision makers.

Malik Ghallab (CSMI)

En effet, il est important d'ancrer notre Académie dans le monde académique; Où en sommes-nous dix mois après l'installation de notre Académie ? Je pense que beaucoup de chemin a été parcouru, je m'en réjouis avec vous. Les activités qui ont eu lieu pendant la semaine «les jeunes et la science» ont laissé d'excellents échos. Maintenant, tout n'est pas encore sur les rails. Notre Académie a plusieurs missions:

- Contribution à l'élaboration de la politique nationale de la recherche scientifique et technique, et je rejoins tout à fait la recommandation de notre collègue Albert Sasson sur ce point;
- Evaluation des activités de recherche;
- Promotion et diffusion de la culture scientifique;
- Il y a un autre point qui est promotion et soutien à la recherche scientifique et technique; et notre Académie est également une agence de moyens. Nous avons défini un certain nombre de modalités d'actions qui sont :
- un principe de concentration des moyens,
- un principe de pérennité et de dynamisme,
- un principe de complémentarité aux autres formes de soutien,
- prise en compte de priorités, axes stratégiques et atouts, opportunités du Maroc et bien entendu d'autres aspects en termes de pertinence scientifique, etc....

Il nous reste encore du travail à faire pour que ces principes se déclinent selon les types de soutien que nous avons évoqués qui étaient en termes de : actions stratégiques, création d'unités de recherche sur la base de programmes scientifiques pertinents, équipes communes et plateformes. Un point important c'est d'avoir des éléments d'affichage assez clairs et comment nous allons déployer notre action sur ce deuxième front qui est : l'Académie agence de moyens. Il faut que nos projets se déroulent de façon très lisible comme des projets propres de l'Académie. Il est aussi important que nous communiquions sur ce volet à l'intention de la communauté scientifique dans des délais assez proches.

Taieb Chkili (CSTV)

Nous avons besoin de faire encore plus car la mission principale de l'Académie c'est la promotion de la recherche. Derrière elle, il y a bien entendu la définition des orientations et des priorités, le financement de projets, l'encouragement de laboratoires et la sensibilisation à la science.

A travers les débats que nous avons eus lors des séances de cette session, il y a méconnaissance des uns et des autres, et je crois que les Collèges peuvent jouer un rôle important. **Si les Collèges peuvent organiser une séance mensuelle de 3 heures, pas plus, autour d'une thématique bien déterminée et que cette réunion soit un espace pour les chercheurs pour présenter les résultats de leurs recherches et en débattre avec leurs collègues; cela leur permettra de faire connaissance et de savoir ce qu'ils font, de créer l'émulation et la mutualisation et peut être l'embryon de réseaux. Cela donnerait également une plus grande visibilité sociale et nationale à notre Académie.**

Noureddine El Aoufi (CESDE)

Moi je suis tout à fait d'accord avec ceux qui pensent qu'il y a un travail à faire sur les thèmes des sessions plénières. J'ai eu l'impression personnelle que les thèmes de cette année recouvrent à peu près les champs disciplinaires des Collèges. Est-ce qu'on peut le faire chaque année ? Il va y avoir redondance. **Ma proposition c'est d'aller de plus en plus vers des thèmes problématiques, ce qui nécessite d'améliorer les procédures d'organisation de ces sessions et de sélection des communications.**

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Je voudrais donner quelques éclaircissements :

- Question experts : la loi prévoit explicitement dans l'article 4, en dehors des membres résidents, associés et correspondants, de faire appel à des experts parmi des personnalités de la communauté scientifique nationale et internationale. Il y a ainsi possibilité d'élargir les collèges, particulièrement ceux où le nombre est restreint, avant d'arriver à des nominations nouvelles. Les experts peuvent être associés au travail du Collège et c'est au Collège de faire des propositions.
- Je retiens également la proposition de commencer à réfléchir à la création d'un certain nombre de groupes de travail sur un certain nombre de thèmes lorsqu'un thème est bien défini, bien identifié, et où il s'agit de dégager des positions ou définir un plan d'actions sur ce thème. Donc un groupe de travail sur la question de l'énergie est tout indiqué. C'est un sujet qui permettra justement de réaliser cette action transversale entre les différents Collèges.
- Sur le plan organisation matérielle, il est vrai que nous demandons un effort énorme à nos collègues de l'étranger (déplacement souvent long). Il est vrai comme l'ont suggéré certains collègues qu'il est souhaitable de mieux organiser leur séjour ici en leur permettant des occasions de contacts avec des scientifiques marocains et de visites de centres scientifiques marocains et ainsi créer de nouveaux liens entre ces collègues et les membres de la communauté scientifique marocaine.
- Les remarques du collègue Malik Ghallab sont pertinentes. Elles ont été traitées lors de la session ordinaire, et lors du débat qui a suivi la présentation du rapport d'activité, en tenant compte des principes qu'il a rappelés. Chaque Collège a présenté les thèmes prioritaires, les actions à mener et des projets de recherche à financer. Il nous a été présenté 25 projets qui demandent un financement sur une période de 3 à 4 ans de 70 millions de dirhams environ. Evidemment, les Collèges sont invités à finaliser ces projets assez rapidement. L'Académie est attendue d'abord sur sa mission d'agence de moyens

pour apporter aux équipes de recherche un appui supplémentaire à celui des autres structures de financement.

- L'article 34 qui parle de la session plénière est très clair : les sessions plénières doivent être, non seulement l'occasion de présenter des travaux de recherche faits par les académiciens ou pilotés par les membres de l'Académie dans le cadre de projets, mais aussi la session plénière a pour but de servir de tribune scientifique aux chercheurs pour présenter des communications validées par la commission des travaux.

Jean Dercourt (CSTETM)

Cette Académie existe, et au meilleur niveau, pour les deux raisons suivantes:

- Les Collèges, en concevant chacun sa session, ont montré ce qu'ils pouvaient faire en coordination ce qui couronne le travail qu'on connaît par ailleurs.
- **Les questions qui ont été posées, ce n'était pas devant des personnes tout à fait éteintes qui écoutaient là gentiment et respectueusement, c'étaient des débats parfois vifs et ça c'est la définition d'une académie. Je trouve que le théorème d'existence de l'Académie Hassan II est parfaitement établi. Il me semble de ce fait que l'internationalisation qui a été évoquée par plusieurs intervenants peut se faire et doit se faire. Normalement, chaque nation est représentée, là où il existe une académie des sciences, par l'académie des sciences; et c'est l'académie qui traite au nom de la nation.**

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des séances)

Je me joins à tous pour nous féliciter pour l'excellent travail accompli dans les meilleures conditions possibles durant cette session. Je voudrais, tout simplement, vous remercier tous de m'avoir facilité la tâche et je déclare notre session terminée.

SÉANCE DE CLOTURE

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des séances)

Je voudrais donner la parole à notre Secrétaire perpétuel avant de dire le petit mot de la fin.

Omar Fassi-Fehri (Secrétaire Perpétuel)

Chers collègues, je voudrais tout d'abord adresser mes plus sincères félicitations à l'ensemble des participants et remercier très sincèrement les différents intervenants et tous les collègues qui ont répondu à notre invitation. Je voudrais aussi souligner l'intérêt, soulevé par les différentes conférences et communications, et la qualité des travaux, ainsi que la qualité du débat qui a suivi. On peut regretter, faute de temps, qu'on n'a pas pu parfois prolonger davantage le temps consacré à cette discussion. A juste titre, certains collègues se sont posés la question de savoir quel est le lien qui existe entre les différents thèmes. Notre ami Malik Ghallab a déjà relevé un lien entre ces différents thèmes à savoir que les communications présentées dans les différentes sessions ont montré une interdisciplinarité. Je pense aussi qu'un autre lien existe et unit ces thèmes, ce sont tous des problèmes vécus par la société. Bien entendu, et sans entrer dans un débat «byzantin» entre recherche fondamentale et recherche appliquée, la question étant tranchée il y a bien longtemps pour la communauté scientifique du moins, on peut dire que la première session «modélisation et mathématiques appliquées» a clairement montré que si l'on voulait avancer dans la solution des problèmes pratiques de développement économique et social on avait besoin de développer la recherche fondamentale et la recherche théorique. Les autres sessions ont confirmé cette évidence. Rappelons-nous la recommandation faite par Sa Majesté dans le discours prononcé à Agadir devant notre jeune Compagnie : "**mener des actions avec pour objectifs de servir à la fois notre pays et contribuer au développement de la science mondiale**".

Nous retenons de ces journées la leçon rappelée par notre collègue Pr. Jean Dercourt : la caractéristique essentielle de la science consiste à procéder par approches successives pour mieux comprendre la réalité et l'approcher davantage chaque jour un peu plus. Cela nous pousse et nous oblige à encourager le développement de la recherche scientifique, en particulier dans tous les domaines traités lors de cette session et particulièrement en ce qui nous concerne ceux ayant trait à la réalité marocaine. A ce sujet, je voudrais me féliciter de la participation à notre session d'un certain nombre de représentants d'opérateurs marocains ou étrangers, leur présence nous a permis d'écouter des interventions traitant de la réalité sur le terrain. Nous nous attacherons à réunir, comme

suggéré lors de la discussion il y a quelques instants, l'ensemble des travaux de la session aussi bien les communications, les conférences que les débats qui ont eu lieu autour des travaux présentés pour les éditer et nous aurons particulièrement à cœur de les porter à la Haute Attention de Sa Majesté le Roi. Rien n'empêche bien entendu, comme l'a suggéré notre ami Albert Sasson, de préparer, en plus du fait de présenter l'ensemble des travaux, des notes plus particulières sur des questions spécifiques.

Je voudrais en particulier rappeler que les échanges que nous avons eus lors de la première session le mercredi matin, ainsi que cette après-midi, sont particulièrement utiles et fructueux. à la lumière des remarques, des observations, des uns et des autres, nous essaierons d'améliorer le travail de notre Académie. Je souhaite, pour ma part, que les Collèges sur lesquels repose en fait tout le travail de l'Académie, en particulier le côté scientifique, se préoccupent non seulement d'affiner, comme nous en avons convenu, et finaliser les programmes d'action et projets de recherche que nous avons présentés lors de la session ordinaire, mais aussi de nous faire part de leurs observations quant à l'organisation de cette session, et de leurs propositions, pour améliorer l'organisation des futures sessions tant sur le plan matériel que scientifique.

Chers amis, en renouvelant mes remerciements et mes félicitations à tous les participants, je voudrais dire un merci tout particulier à notre collègue Rachid Benmokhtar qui a dirigé les travaux de notre session avec beaucoup de savoir faire, d'efficacité, il a incontestablement contribué au succès dont certains collègues ont parlé il y a un instant.

Merci également à notre hôte le Professeur Abdellatif Berbich, Secrétaire Perpétuel de l'Académie du Royaume du Maroc et membre de notre Compagnie, pour l'appui qu'il apporté à l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Si vous permettez, je voudrais donner lecture au message de remerciements et de déférente gratitude que je vous propose d'adresser à Sa Majesté le Roi.

Rachid Benmokhtar Benabdellah (Directeur des séances)

Je vais essayer de conclure de manière brève, tout d'abord en vous disant que notre collègue Malik Ghallab a dit quelque chose que je vais répéter parce que je la trouve tout à fait sympathique et admirable «durant cette session, nous nous sommes régales». Je crois que nous partageons tous ce point de vue puisque pendant toutes ces sessions nous avons, non seulement beaucoup apprécié, mais nous avons beaucoup appris. Un académicien est aussi quelqu'un qui doit être modeste, et justement la diversité de nos spécialités nous montre aussi quelque part notre ignorance. Lorsqu'on a la chance de nous retrouver ensemble et surtout avec des invités de marque qui sont venus nous exposer des thèmes auxquels tous nous ne sommes pas habitués, cette session nous a permis de rentrer dans des domaines de grande complexité qui étaient tout à fait liés et qui étaient des problèmes de tous les jours qui ont un effet sur notre pays. Là, je voudrais remercier les différents contributeurs des différentes universités marocaines, des centres de recherches ou des institutions publiques, qui nous ont éclairé avec un certain nombre de chiffres mais aussi beaucoup sur notre pays.

Je dirais aussi que la qualité des débats et la motivation qui ressortaient des intervenants sont encourageantes et montrent que notre Académie est sur une très bonne voie. Les débats sont francs, mûrs et tournés vers l'amélioration et le progrès.

Tout ceci n'aura pas été possible sans un certain nombre de personnes. D'abord, je voudrais remercier de manière particulière nos intervenants et surtout nos invités qui ont accepté parfois de venir de loin pour s'adresser à nous, nos remerciements sincères sont pour eux, en espérant aussi les revoir en d'autres occasions. Je voudrais remercier aussi nos interprètes, leur tâche n'a certainement pas été facile, pour avoir accompagné nos travaux du début jusqu'à la fin avec abnégation. D'un autre côté, nos remerciements doivent aller aussi à monsieur le Secrétaire Perpétuel de l'Académie du Royaume du Maroc et à l'ensemble du personnel de cette Académie qui a été mobilisé avec nous durant notre passage dans ce lieu tout à fait agréable. Il y a aussi toute l'équipe de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques qui va encore rester mobilisée pour la récupération et l'édition de tout le matériel et les débats que nous avons eus durant ces sessions.

Pour terminer, je m'adresserais bien sûr à mes collègues pour leur dire combien il m'a été agréable de diriger ces séances et ceci grâce à eux. Je déclare la session clôturée et à la prochaine.



Vue d'ensemble de la salle des conférences

LISTE DES PARTICIPANTS à la session de février 2007

Membres de l'Académie

Prénom et NOM	Affiliation	Titre	Collège
Driss ABOUTAJDINE	Professeur STIC Faculté des Sciences, Rabat	Membre résident	SMI
Daoud AIT-KADI	Professeur Productique-génie industriel Université Laval, Canada	Membre résident	SMI
Mohamed AIT-KADI	Professeur Président du Conseil Général du Développement Agricole	Membre résident	STETM
Omar ASSOBBHEI	Professeur Sciences de la mer Faculté des Sciences El Jadida	Membre correspondant	STETM
Abdelmalek AZIZI	Professeur Mathématiques Faculté des Sciences, Oujda	Membre correspondant	SMI
Mohammed BELAICHE	Professeur Physique ENS, Rabat	Membre correspondant	SPC
Rachid BENMOKHTAR BENABDELLAH	Président de l'Université Al Akhawayn, Ifrane	Membre résident	ESDE

Collèges (abréviations):

- SPC : Sciences Physiques et Chimiques
- STV : Sciences et Techniques du Vivant
- SMI : Sciences de la Modélisation et de l'Information
- ESDE : Etudes Stratégiques et Développement Economique
- ITIT : Ingénierie Transfert et Innovation Technologique
- STETM : Sciences et Techniques de l'Environnement de la Terre et de la Mer

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	Affiliation	Titre	Collège
Abdelilah BENYOUSSEF	Professeur Physique Faculté des Sciences, Rabat	Membre résident	SPC
Abdellatif BERBICH	Professeur Médecine interne Faculté de Médecine -Rabat Secrétaire Perpétuel de l'Académie du Royaume	Membre résident	STV
Mohamed BERRIANE	Doyen, Faculté des Lettres	Membre correspondant	ESDE
Mohamed BESRI	Professeur Plant Pathology Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat	Membre correspondant	STV
Jean-Jacques BONNET	Professeur Université Paul Sabatier Directeur du Laboratoire de Chimie de Coordination	Membre associé	SPC
Badia BOUAB	Professeur Paléontologie Faculté des Sciences - Rabat	Membre correspondant	STETM
Yahia BOUGHALEB	Professeur de Physique Doyen, Faculté des Sciences El Jadida	Membre correspondant	SPC
Ali BOUKHARI	Professeur de Chimie Doyen, Faculté des Sciences Kénitra	Membre correspondant	ITIT
Tijani BOUNAHMIDI	Vice-Président Université Mohamed V Agdal - Rabat	Membre correspondant	ITIT
Mostapha BOUSMINA	Professeur Département-génie chimique Chaire du Canada sur la physique des polymères et les nanotechnologies	Membre résident	SPC

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	Affiliation	Titre	Collège
Juan Carlos CASTILLA ZENOBI (Chili)	Membre de l'Académie Nationale des USA. Facultad de Ciencias Biológicas Departamento de Ecología & Centro de Estudios Avanzados en Ecología & Biodiversidad	Membre associé	STETM
Mohammed CHERKAOUI	Professeur - Physique Université du Metz - France	Membre correspondant	SPC
Rajaa EL MOURSLI	Professeur de Physique Faculté des sciences- Rabat	Membre correspondant	SPC
Taieb CHKILI	Professeur Neurologie Président Université Mohammed V-Souissi	Membre résident	STV
Silvio CRESTANA (Brésil)	Director-President of Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria « EMBRAPA »	Membre associé	STV
JEAN DERCOURT (France)	Professeur de Géologie Université Pierre et Marie Curie (Paris) Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences (France)	Membre associé	STETM
Rajae EL AOUAD	Professeur de Génétique Directrice Institut d'Hygiène - Rabat	Membre résident	STV
Noureddine ELAOUFI	Professeur d'économie Faculté de Droit - Rabat	Membre résident	ESTE
Farouk EL-BAZ (Egypte – USA)	Director Center of Remote Sensing -Boston University	Membre associé	STETM
Ahmed EL HASSANI	Directeur l'Institut Scientifique Université Mohamed V Agdal – Rabat	Membre résident	STETM

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	Affiliation	Titre	Collège
Abdelhaq EL JAI	Professeur - Mathématiques Laboratoire de Théories des Systèmes Université Perpignan - France	Membre résident	SMI
El Mokhtar ESSASSI	Professeur - Chimie Faculté des Sciences - Rabat	Membre résident	SPC
OMAR FASSI-FEHRI	Professeur de Mécanique Faculté des Sciences - Rabat	Membre résident Secrétaire Perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques	SPC
Gerald G. FULLER (USA)	Fellow of the Academy of Engineering Department Chemical Engineering	Membre associé	SPC
Francisco GARCIA-GARCIA (Mexique)	Director General de Gestión Forestal y Suelos Secretario de Medio Ambiente	Membre associé	STV
Malik GHALLAB	INRIA-France Délégué Général à la recherche et au transfert pour l'innovation	Membre résident	SMI
Nadia GHAZZALI	Professeur Titulaire de la Chaire de recherche CRSNG-Industrielle Alliance sur les femmes en sciences et génie Départ. Maths et de Statistique Université Laval (Québec)	Membre correspondant	SMI
Claude GRISCELLI (France)	Institut Necker Faculté de Médecine-Université René Descarte - France	Membre associé	STV
Abdelali HAOUDI	Professor – Department of Microbiology and Molecular Cell Biology Eastern Virginia Medical School	Membre correspondant	STV

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	Affiliation	Titre	Collège
Mohammed JELLALI	Ingénieur en Hydraulique Conseiller auprès du Premier Ministre	Membre résident	STETM
Abderrahim MAAZOUZ	Professeur – INSA Départ. de Génie Mécanique Conception Lyon – France	Membre résident	ITIT
Carlos MARTINEZ ALONSO (Espagne)	Professeur d'Immunologie Président- Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique (CSIC – Madrid)	Membre associé	STV
Sellama NADIFI	Professeur de Génétique et Immunologie Faculté de Médecine - Casablanca	Membre correspondant	STV
Driss OUAZAR	Professeur Hydromécanique (EMI) Université Mohamed V Agdal, Rabat	Membre résident	STETM
Youssef OUKNINE	Professeur Faculté des Sciences Université Cadi Ayyad Marrakech	Membre résident	SMI
Valeriano RUIZ HERNANDEZ (Espagne)	Professeur à la Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla	Membre associé	ITIT
El Hassan SAIDI	Professeur – Physique Faculté des Sciences, Rabat	Membre résident	SPC
Albert SASSON	Professeur Sciences biologiques Consultant auprès UNESCO	Membre résident	STV
Abdelaziz SEFIANI	Professeur Faculté de Médecine - Rabat Directeur du Département de Génétique médicale (INH) Rabat	Membre correspondant	STV

LISTE DES PARTICIPANTS (suite)

Prénom et NOM	Affiliation	Titre	Collège
Khalid SEKKAT	Professeur – Economie Université Libre de Bruxelles Belgique	Membre correspondant	ESDE
Zouheir SEKKAT	Professeur Nanotechnologies - AUI (School of Science and Engineering) Osaka University	Membre correspondant	SPC
Jean SWINGS (Belgique)	Professeur Université de Ghant Directeur du Laboratoire de Microbiologie de Ghant	Membre correspondant	STV
Philippe A. TANGUY (Canada)	Professeur -Département of Chemical Enginnering Ecole Polytechnique de Montréal	Membre associé	ITIT
Marcelo DE SOUSA VASCONCELOS (Portugal)	Chairman Administrative Board Community Fisheries Control Agency (Agence Communautaire de Contrôle des Pêches)	Membre correspondant	STETM
André ZAOUI (France)	Professeur Micromécanique des Matériaux Ecole Polytechnique Membre de l'Académie des Sciences	Membre associé	SPC
Mahfoud ZIYAD	Professeur de Chimie Faculté des Sciences - Rabat	Membre correspondant	ITIT

LISTE DES INVITÉS ayant présenté une communication

Prénom et NOM	Affiliation
Pierre AUGER	Institut de Recherche pour le Développement. Académie des Sciences (France)
Ali ALAMI IDRISSE	Optima Finance Consulting - Casablanca, Maroc
Azzeddine AZZAM	Department of Agriculture Economics University of Nebraska - Lincoln, USA
Amina BENKHADRA	Directeur Général, Office National des Hydrocarbures et des Mines Rabat, Maroc
Aymen CHEIKH LAHLOU	Cooper Maroc - Casablanca, Maroc
Mohamed FLIYOU	Ecole Normale Supérieure, Marrakech, Maroc
Robert GUILLAUMONT	Université Paris Sud, Académie des Sciences (France)
François GUINOT	Académie des Technologies (France)
Bruno JARRY	Académie des Technologies (France)
Abdallah LAOUINA	Université Mohamed V, Agdal - Rabat, Maroc
Hervé LE TREUT	Académie des Sciences (France)
Yves MAIGNE	Académie des Technologies (France)
Chris MILLY	United States Geological Survey, USA
Jean-François MINSTER	IFREMER, Total S.A., Membre correspondant de l'Académie des Sciences (France)
Abdellah MOKSSIT	Direction de la Météorologie Nationale, Casablanca, Maroc

**المملكة المغربية
أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات**



**أشغال الدورة العامة
لسنة 2007**

الرباط 21-23 فبراير 2007

مقدمة

أشرف صاحب الجلالة الملك محمد السادس، نصره الله، بأكادير يوم الخميس 18 ماي 2006 على تنصيب أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات التي بعد ذلك تابعت أشغالها بالرباط يومي 18 و 19 ماي 2006.

خلال أيام 21 و 22 و 23 فبراير الأخير نظمت الأكاديمية دورتها العامة الرسمية لسنة 2007 حول أربعة مواضيع :

- النمؤذجة والرياضيات التطبيقية،
- مسألة الطاقة اليوم : تحديات علمية وتقنية،
- البيوتكنولوجيات،
- التغيرات المناخية ومشاكل البيئة.

أثناء هذه الدورة ناقش أعضاء الأكاديمية كذلك تقريراً حول أنشطتها خلال الفترة الممتدة ما بين ماي 2006 وفبراير 2007، قدمه أمين السر الدائم، وكذلك خطط العمل لمختلف الهيئات العلمية التابعة لها.

إننا نضع اليوم بين يدي القراء مجموع أشغال هذه الدورة متضمنة المحاضرات والمدخلات التي قدمت بهذه المناسبة والتي استطعنا الحصول عليها على شكل نصوص أو عروض مصورة. وبفضل مجهود خاص نضع أيضاً رهن إشارة العموم التقرير الكامل للمناقشات التي تبعت العروض العلمية أو خصت القضايا التنظيمية للأكاديمية.

إننا نعتبر أن مضمون أشغال دورة 2007 العامة يساعد على تحقيق واحدة من المهام الأساسية للأكاديمية في شأن تشجيع البحث العلمي والتقني من أجل تنمية البلاد، وأن هذه الأشغال تتجاوب تماماً مع الهدف الذي حدده صاحب الجلالة الملك محمد السادس، حفظه الله، في خطاب تنصيب الأكاديمية، حيث يشير إلى «أهمية الدور الفاعل الذي سيقوم به علماءنا بصفة عامة، وأعضاء الأكاديمية بصفة خاصة، في الإسهام في رفع ما تطرحه التنمية من تحديات، ولا سيما منها تلك المرتبطة بالتنمية البشرية»

أمين السر الدائم

الرباط، يوليو 2007



محضر أشغال الدورة العامة لأكاديمية
الحسن الثاني للعلوم والتقنيات
لسنة 2007

عقدت أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات دورتها العامة الثانية بمقر أكاديمية المملكة بالرباط أيام 21-22-23 فبراير 2007.

الجلسة الافتتاحية الأربعاء 21 فبراير 2007 صباحا

انعقدت الجلسة الافتتاحية لأشغال الدورة العامة الرسمية الثانية لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات بمقر أكاديمية المملكة بالرباط يوم الأربعاء 21 فبراير 2007 على الساعة التاسعة صباحا بحضور الأكاديميين وعدد من الشخصيات المدعوة. وترأس أشغال هذه الدورة السيد رشيد بنمختار بن عبد الله، مدير الجلسات.

خلال الجلسة الافتتاحية، تناول الكلمة الأستاذ عمر الفاسي الفهري، أمين السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، وذكر بأهم الأعمال والأنشطة التي قامت بها الأكاديمية منذ تنصيبها في شهر مايو 2006 من طرف صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، وقدم كذلك البرنامج الكامل لأشغال هذه الدورة.

مباشرة بعد الجلسة الافتتاحية، استأنفت الأكاديمية أشغالها وتدارست التقرير الذي قدمه أمين السر الدائم حول نشاط الأكاديمية وبرنامج الأعمال ومشاريع البحث المقدمة للجنة الأعمال من طرف الهيئات العلمية للحصول على دعم الأكاديمية خلال الفترة الممتدة من سنة 2007 إلى سنة 2009.

كما تناول التقرير مختلف الأنشطة التي قامت بها الأجهزة المشرفة على إدارة الأكاديمية من مجلس الأكاديمية ولجنة الأعمال، وركز التقرير على التظاهرة العلمية التي نظمتها الأكاديمية في إطار عمل مشترك مع وزارة التربية الوطنية خلال الأيام الممتدة من 29 نوفمبر إلى 6 دجنبر 2006 تحت شعار «الشباب والعلم في خدمة التنمية»، والتي انعقدت تحت الرعاية السامية لصاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله. كما أشار التقرير إلى مساهمة الأكاديمية في بعض الأنشطة الدولية وإلى الزيارات التي قامت بها عدد من الشخصيات العلمية الدولية للأكاديمية.

وفي الأخير تطرق التقرير إلى برنامج الأعمال ومشاريع البحث المقترحة، التي تم إعدادها من طرف الهيئات العلمية ومعالجتها من طرف لجنة الأعمال قصد تمويلها جزئيا أو كاملا خلال الفترة الممتدة من سنة 2007 إلى سنة 2009.

- بعد تقديم التقرير جرت مناقشة واسعة بين الأكاديميين، أسفرت على التوصيات التالية:
- اعتبار ضرورة التكامل بين الأولويات المحددة من طرف الهيئات العلمية للأكاديمية والأولويات المحددة من طرف باقي المؤسسات الوطنية في ميدان البحث العلمي؛
 - العمل في أقرب الآجال على تقديم الدعم لبعض مشاريع البحث عن طريق الاقتراحات والعروض العفوية؛
 - تشجيع البحث العلمي عبر طلب عروض واسع موجه إلى المجموعة العلمية الوطنية؛
 - اعتبار التقارب بين المواضيع المقترحة من طرف الهيئات العلمية، ووضع نظام يمكن من تنسيق أكثر بين الهيئات العلمية؛
 - اعتبار مسألة تداخل التخصصات عند اختيار مشاريع البحث التي سيتم دعمها؛
 - دعم مشاريع البحث انطلاقاً من الميزانية المرصودة وإعتباراً للأولويات الوطنية مع مراعاة الدعم المقدم من طرف المؤسسات الوطنية أو الأجنبية الأخرى؛
 - تحسين المعايير والإجراءات لاختيار المشاريع وتمكين القيام بالعمل المنظم؛
 - إنشاء خلية لتتبع تطور مؤشرات البحث العلمي في البلاد وخاصة الإنتاج العلمي المغربي؛
 - على الأكاديمية أن تجتنب القيام بمهام الهيئات والمؤسسات الأخرى للبحث، وعليها أن تحافظ على خصوصيتها في ما يتعلق بنظامها وبمهامها؛
 - تدعيم الهيئات العلمية التي تعاني من النقص في عدد أعضائها بتعيين أعضاء جدد وفق المقتضيات والإجراءات المحددة في القانون المؤسس للأكاديمية؛
 - تعيين الخبراء لدى الأكاديمية اعتماداً على الإمكانيات المتاحة في القانون الذي يسمح بأن تستعين الأكاديمية بخبراء قصد تدعيم الهيئات العلمية التي تعاني من النقص في عدد أعضائها؛
 - من الممكن دعم مشاريع البحث المقيمة بالخارج شريطة أن تكون إسقاطاتها ذات نفع مباشر على البحث العلمي وعلى التنمية في المغرب؛
 - تشجيع الباحثين والطلبة المغاربة على المساهمة في الندوات والمؤتمرات العلمية داخل المغرب وخارجه؛
 - المساهمة في نشر المعرفة والثقافة العلمية؛
 - توطيد وتدعيم التعاون الدولي في ميدان البحث العلمي والتكنولوجي.
- كما مكنت أشغال هذه الجلسة من التفاعل المثمر بين مجموع المساهمين وأسفرت على إبراز خطوط عمل طموحة وواقعية وملموسة.

وفي ختام هذه الجلسة الأولى، تابعت الأكاديمية أشغالها في إطار أربع جلسات للاستماع ومناقشة المحاور العلمية المختارة لهذه الدورة من خلال المحاضرات والمدخلات العلمية التي قدمها عدد من الأكاديميين ومن الشخصيات العلمية المدعوة.

الجلسة الأولى «النموذج والرياضيات التطبيقية» الأربعاء 21 فبراير 2007 زوالا

تمحورت هذه الجلسة حول موضوع «النموذج والرياضيات التطبيقية».

بعد الاستماع إلى المحاضرة والأوراق العلمية المقدمة بخصوص هذا الموضوع، جرت مناقشة همت بالاساس النمذجة الرياضية المستعملة في ميدان المنظومات الإيكولوجية وتطبيقاتها على الموارد السمكية في المغرب كمثل، وحول الرياضيات التطبيقية في ميدان الاقتصاد والمسائل المالية وتديير المجازفة في ميدان الاسواق المالية والعمل في ميدان الصناعة وكذلك في ميدان الاساليب الصناعية قصد تحسين تنافسية المقاولات وثمانين نتائج البحث العلمي والبحث التنموي، كما بينت المناقشة أن كل تحليل للقضايا الفعلية المتعلقة بالحياة وكل معالجة لإدراك التوقعات المتعلقة بالاقتصاد والمسائل المالية والتجارة والبيئة أو التنمية المستدامة يقتضيان اللجوء إلى وضع نماذج تعتمد الرياضيات التطبيقية من أجل فهم هذه القضايا والتكهن بكيفية تطورها واستنتاج في أي اتجاه تسير.

الجلسة الثانية «مشكلة الطاقة اليوم : تحديات علمية وتقنية» الخميس 22 فبراير 2007 صباحا

خلال هذه الجلسة تمت معالجة محور هام يتعلق بمسألة «الطاقة اليوم : تحديات علمية وتقنية».

مكنت هذه الجلسة من معالجة الواقع الحالي لإنتاج الطاقة المتعلق بالطاقة النفطية والفحم الحجري وكذلك بالطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية والهوائية، وكذلك الاستدلال بالمؤشرات والمعطيات العلمية التي تتوقع عددا من الاحتمالات والرهانات جد مهمة، تتعلق بشكل خاص بالمشاكل المرتبطة بتأمين واستقلال الموارد الطاقية، وبلاستنفاد التدريجي للاحتياطي من الموارد النفطية الطبيعية، وكذل بالتبعات الناجمة عن ارتفاع الحرارة المناخية بسبب الاستهلاك المتنامي للوقود الأحفوري، كما ناقش الاكاديميون مختلف الأبحاث المتعلقة بالتطورات الحتمية لإنتاج الطاقة والتبعات الناجمة عن الاحتباس الحراري والتقلبات المناخية. كما تم التطرق إلى أهم التطورات لجعل الفعالية الاقتصادية تستجيب للتطورات في خضم سلوك يستدعي احترام البيئة والإرادة على حفظ التوازنات البيئية قصد السماح للأجيال القادمة أن تمارس اختياراتها بالنسبة للتنمية.

كما كانت مسألة استهلاك واقتصاد الطاقة أحد محاور النقاش حيث تم التركيز على الإمكانيات العلمية والتقنية لأجل تحسين مردودية الأجهزة الكهربائية المنزلية والإنارة الباردة، وعلى أهمية استعمال التكنولوجيات الخفيفة في اتجاه إنتاج الطاقة عبر محطات توليد الحرارة الشمسية.

وخلال المناقشة تم التطرق إلى بعض الحلول لتأمين التنمية الطاقية بالمغرب على ضوء الموارد المتاحة وذلك في إطار التنمية المستدامة.

الجلسة الثالثة

«البيوتكنولوجيات»

الخميس 22 فبراير 2007 زوالا

خصصت هذه الجلسة لمحور «البيوتكنولوجيات» في الميدان الصحي والطبي.

خلال هذه الجلسة تمحور النقاش حول الإمكانيات الإيجابية التي يمكن أن تقدمها علوم الحياة الجزيئية والعلوم الجينية لمكافحة داء السرطان والسل والأمراض الذهنية، كما تم التطرق إلى أهمية «البيوتكنولوجيات» التي أصبحت تمثل اليوم إحدى رافعات التنمية بالنسبة لكل مخطط يهدف إلى التنمية العلمية والتكنولوجية وكذلك الاجتماعية والاقتصادية، خصوصا بعد الاستكشافات الحديثة والنتائج الواعدة التي تم التوصل إليها في ميادين العلوم الجينية وفي ميادين علوم الحياة الجزيئية وفي ميدان الصيدلة وعلوم المواد، الشيء الذي يمكن أن يترتب عنه فرص هائلة لتحسين ظروف حياة البشرية، وكذلك تحديات كبيرة بالنسبة للقضايا المتعلقة بالبيواخلاقيات.

كما أشار المشاركون خلال مناقشتهم إلى ضرورة توطيد علاقات التعاون بين الباحثين وقطاع الإنتاج خصوصا في ميدان الصحة.

الجلسة الرابعة

«التحولات المناخية وقضايا البيئة»

الجمعة 23 فبراير 2007 صباحا

خصص محور هذه الجلسة لإشكالية «التغيرات المناخية وقضايا البيئة».

إن هذا الموضوع أصبح موضوع الساعة ومصدر قلق حقيقي على النطاق العالمي لما له من انعكاسات أساسية على مستوى الحياة، حيث بينت أغلب الدراسات والمعطيات المناخية أن انتشار غازات ثاني أكسيد الكربون المتزايد قد يقود لا محالة إلى الاحتباس

الحراري والسير الحثيث نحو تغيير مناخي سمته الأساسية ارتفاع درجة حرارة كوكب الأرض وارتفاع مستوى مياه البحر مما يترتب عليه من عواقب سلبية على الطبيعة والبيئة والبشرية.

وشكلت كل هذه المواضيع مضمون هذه الجلسة التي تلتها مناقشة مستفيضة تبين من خلالها أن التحولات المناخية أصبحت حقيقة انطلاقاً من المعطيات العلمية وأن السبب الرئيسي فيها يعود إلى تأثير الإنسان، كما أن هذه التحولات أصبحت حتمية، وأن مسألة التوازن بين الوقاية والانعكاسات السلبية والتأقلم مع البيئة أصبحت ضرورية. وخلال المناقشة تم إبراز بعض الاجوبة تعتمد على ثلاثة توجهات.

- التوجه الأول يركز على استدراك التحولات المناخية بالعمل على خفض انبعاث الغازات المؤدية إلى الاحتباس الحراري وذلك عبر استعمال الموارد الطاقية ذات محتويات ضعيفة من الكربون، وعبر السيطرة على الحاجيات الطاقية، وعبر تنمية الطاقات المتجددة والعمل على اقتصاد الطاقة.

- التوجه الثاني يهدف إلى جمع وتخزين الغازات المسببة للانحباس الحراري.
- ويرتكز التوجه الثالث على الوقاية من الانعكاسات الناتجة عن التغيرات المناخية ومن الأخطار المتعلقة بها، مثل :

. الفيضانات

. إتلاف التربة

. التصحر

. الارتفاع الشديد للحرارة في فصول الصيف

. العواصف القوية

. تنمية الأمراض المعدية

وخلال هذه الجلسة تمت كذلك مناقشة مسألة الحكامة وتدابير الانعكاسات الناتجة عن التحولات المناخية والبيئية.

أمام هذه السيناريوهات المقلقة، تم التطرق إلى بعض الحلول المتفائلة المتعلقة خصوصاً بالنماذج الرقمية التي أصبحت من النماذج التوقعية. حيث تم تقديم خلال هذه الجلسة نموذج "الكوكب الرقمي" الذي يسمح من توقع السيناريوهات المحتملة بالنسبة للأجيال القادمة ومن المساعدة على اخذ القرارات. إلا أن الأكاديميون اعتبروا أن هذه النماذج الرقمية يجب أن تخضع باستمرار إلى الإغناء والنقد البناء وأن على العلماء أن يبقوا يقظين وأن لا يعتبروا أن هذه النماذج هي حقيقة نهائية.

في ختام هذه الجلسة أكد الأكاديميون على أن التغيرات المناخية والقضايا المتعلقة بالبيئة تعتبر من المواضيع العلمية المعترضة (العمودية) ومن أهم ميادين البحث المتميزة بتداخل

التخصصات، وعلى أن أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات يجب عليها أن تجعل من هذه المواضيع أحد انشغالاتها وأن تكون دائما حاضرة في جدول أعمالها خلال العقود المقبلة.

اختتام أشغال الدورة العامة يوم الجمعة 23 فبراير 2007 زوالا

بعدها اجتمعت الهيئات العلمية كل واحدة على حدة من أجل الموافقة على برنامج عمل لسنة 2007، تابعت الأكاديمية أشغالها في جلسة مغلقة تدارست خلالها أنجع الطرق لتحسين عملها ودعم البحث العلمي على المستوى الوطني.

بعد ذلك عقدت الجلسة الختامية التي تميزت بتلاوة البرقية المرفوعة من طرف الأكاديميين إلى صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله والمشفوعة بمشاعر التقدير والشكر والامتنان.



نص البرقية المرفوعة
إلى السدة العلية بالله
صاحب الجلالة الملك محمد السادس
نصره الله

بسم الله الرحمن الرحيم، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين

حضرة صاحب الجلالة،

حفظكم الله يا مولاي، وسدد خطاكم، وخذ في الصالحات ذكركم، والسلام
على مقامكم العالي بالله ورحمته وبركاته.

مولاي صاحب الجلالة،

بعد تقديم ما يليق من فروض الطاعة والولاء، وكل ما يليق بمقامكم من واجب
التبجيل والإجلال، يتشرف خديم الأعتاب الشريفة عمر الفاسي الفهري، أمين
السر الدائم لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، أصالة عن نفسه ونيابة عن
أعضاء الأكاديمية، المشاركين في الدورة الثانية لهذه الأكاديمية المنعقدة بعاصمة
مملكتم أيام الأربعاء والخميس والجمعة 3 و4 و5 صفر 1428 هجرية، موافق
ل21 و22 و23 فبراير 2007 ميلادية، أن يتقدم إلى سيدنا المنصور بالله بأصدق
مشاعر التقدير والاحترام معبرا للسيدة العالية بالله عما يغمر أعضاء الأكاديمية
من فخر واعتزاز، بعد مساهمتهم في أشغال هذه الدورة، مستحضرين بكل إكبار
وإجلال لحظة استقبالهم من طرف جلالتم بقصركم العامر بمدينة أكادير يوم
الخميس 20 ربيع الثاني 1427 الموافق ل18 مايو 2006 بمناسبة تنصيب أكاديمية
الحسن الثاني للعلوم والتقنيات الفتية، مؤكدين لجلالتم حرصهم التام و التزامهم
الأكيد علي الإسهام في جعل المجتمع المغربي مجتمعا منتجا، منفتحا علي علوم
وتكنولوجيا العصر، متمسكا بمقوماته الروحية، وأخذا في ذات الوقت بكل أسباب
النهضة والتقدم، مستنيرين في ذلك بتوجيهاتكم النيرة ونصائحكم السديدة.

مولاي صاحب الجلالة،

لقد انكب أعضاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات المشاركون في هذه
الدورة، على الدراسة الوافية للتقرير السنوي لاعمال وأنشطة الأكاديمية، وعلى
المعالجة الشاملة لبرنامج عمل سنة 2007، وعلى المناقشة المستفيضة لدعم مشاريع
البحث خلال الفترة الممتدة من سنة 2007 إلى سنة 2009، وعلى المصادقة على
مناهج العمل لكل هيئة علمية خلال سنة 2007. كما تميزت هذه الدورة بعقد

أربع جلسات خصصت للاستماع إلى عدة عروض علمية، وصل عددها أربعة محاضرات وثلاثة وعشرين ورقة علمية، تقدم بها عدد من أعضاء الأكاديمية وعدد من العلماء الباحثين المدعوين مغاربة وأجانب شملت المحاور العلمية التالية:

- الجلسة الأولى: «النموذج والرياضيات التطبيقية»
- الجلسة الثانية: «مسألة الطاقة اليوم: تحديات علمية وتقنية»
- الجلسة الثالثة: «البيوتكنولوجيات»
- الجلسة الرابعة: «التغيرات المناخية وقضايا البيئة»

وقد استحضر المشاركون، من خلال مناقشاتهم ومداخلاتهم، جميع التوجيهات الجليلة والنيرة التي ما فتئت جلالتم تولونها باستمرار لتنمية البحث العلمي والابتكار التكنولوجي بصفة عامة، ولنساء ورجال العلم بصفة خاصة، وهي توجيهات تعبر عن رغبة جلالتم الأكيدة في أن ترسم هذه المؤسسة التي تحظى برعايتكم وسابغ عنايتكم المسالك الملائمة للنهوض برسالتها حتى تساهم في خدمة هذا الوطن العزيز وفي تنمية العلوم بأبعادها الكونية.

وفق الله جلالتم لما فيه خير هذا البلد الأمين الذي ما فتئتم، أعز الله أمركم، توفرون له من وسائل النهضة والنمو، و من أورش البناء والتشييد، حتى تتحقق له تحت ظلال عرشكم الوارفة، العزة والمناعة والعيش الرغيد، وأقر عينكم بولي عهدكم الجليل صاحب السمو الملكي الأمير مولاي الحسن، وشهد أزركم بشقيقكم السعيد صاحب السمو الملكي الأمير المولى الرشيد، وبسائر أفراد العائلة الملكية الشريفة، إنه على ما يشاء قدير، وبالإجابة جدير.

والسلام على السدة العالية بالله ورحمة الله تعالى وبركاته.

خديم الأعتاب الشريفة
عمر الفاسي الفهري

حرر بالرباط في 5 صفر 1428 الموافق ل 23 فبراير 2007



كلمة الأستاذ عمر الفاسي الفهري
أمين السر الدائم
لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات
في
إفتتاح الدورة العامة الرسمية
لسنة 2007

بسم الله الرحمن الرحيم

أصحاب السعادة،
السيدات والسادة أعضاء الأكاديمية،
سيداتني، ساداتني،

إنه لمن دواعي الاعتزاز والفخر أن نلتئم من جديد، بمناسبة افتتاح الدورة العامة الرسمية لسنة 2007 لأكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات، في رحاب أكاديمية المملكة وداخل هذه القاعة الجامعة لعبقريه الصانع المغربي، الشاهدة على عراقة الهندسة المعمارية المغربية وتحت قبتها التي شهدت انعقاد عدد من اللقاءات الدولية والندوات العلمية من المستوى الرفيع.

إننا لازلنا نستحضر بتأثر بالغ الحدث البارز الذي ظل راسخا في أذهاننا والمتمثل في تنصيب أكاديميتنا الفتية من طرف صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله بالقصر الملكي باكاير يوم 18 ماي 2006، وفي الكلمة المولوية السامية التي زودتنا بتوجيهاته النيرة وذكرتنا بتحديات ورهانات العلم والمعرفة في هذا العصر الذي نحياه، وكذا بجسامة ونبل الاهداف المرسومة لمؤسستنا.

لقد أكد صاحب الجلالة في كلمته السامية «عن التزامه القوي بالانخراط في امتلاك ناصية المعرفة» وعن الإرادة الملكية الواعدة بأن يقوم البحث العلمي والتطور التكنولوجي، والتجديد والابتكار في الإسهام بالنهوض بأوضاع المواطنين والمساهمة في المبادرة الملكية للتنمية البشرية. وقد استوعبنا باهتمام بالغ توجيهات صاحب الجلالة بخصوص الأمل الذي يحذو جلالته بأن يتمكن أعضاء أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات من الإسهام في جعل المجتمع المغربي مجتمعا منتجا، منفتحا على علوم وتكنولوجيا العصر، ومتشعبا بقيم الحوار بين الثقافات.

إن الطابع الاحتفائي الذي ميز تنصيب أكاديميتنا والرعاية الملكية السامية التي أحاط بها جلالته كل مراحل وضع أسس هذه الأكاديمية يترجمان الإرادة المولوية السامية لدعمه الوصول لمؤسستنا حتى تتبوا المكانة اللائقة بها لتقوم بالمهام الموكولة لها ولتساهم في إدماج المجتمع المغربي في مجتمع العلم والمعرفة. اسمحوا لي بهذه المناسبة أن أتقدم من جديد باسمي الشخصي وباسم جميع أعضاء الأكاديمية إلى جلالة الملك محمد السادس نصره الله وأيده، بأصدق مشاعر الامتنان والتقدير وجميل العرفان، راجين من الله سبحانه وتعالى أن نكون أهلا لثقتة الغالية ورعايته الكريمة.

أصحاب السعادة،
سيداتي ، سادتي،

في يوم 19 ماي من السنة الماضية، عند انتهاء أشغال الدورة التدشينية، قررنا أن نعقد الدورة العامة الرسمية لسنة 2007 في نهاية فبراير من هذه السنة. وها نحن نلتقي اليوم في الموعد المحدد. وأود بهذه المناسبة تقديم خالص تشكراتي إلى جميع أعضاء الاكاديمية الحاضرين في هذه الدورة، وبصفة خاصة إلى الذين أتوا من خارج الوطن وشرفونا بحضورهم. كما أشكر كل الشخصيات العلمية البارزة التي لبت دعوتنا والتي ستفضل بإلقاء محاضرة أو مداخلة علمية أثناء هذه الدورة.

كما أتقدم بصادق عبارات الشكر إلى كل الشخصيات التي لبت دعوتنا لحضور افتتاح هذه الدورة العامة الرسمية.

أصحاب السعادة،
سيداتي، سادتي،

إن الأكاديمية، بعد تنصيبها من طرف صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، التّأمت في دورتها التدشينية، التي خصصتها أساسا لوضع الأجهزة المشرفة على إدارة الأكاديمية وفق مقتضيات القانون المؤسس لها.

لقد انكبت هذه الأجهزة على تنظيم وتدبير أساليب ومنهجيات عمل الأكاديمية، وعلى وضع برنامج عمل لتحقيق مهامها على أفضل وجه، وفي هذا السياق اتخذ مجلس الأكاديمية جميع التدابير اللازمة المتعلقة بحصر ميزانية الأكاديمية وحساباتها السنوية وإعداد النظام الأساسي لموظفي مصالح الأكاديمية الذي رفع إلى أنظار السدة العالية بالله صاحب الجلالة الذي أعطى أمره المطاع بالموافقة عليه. كما تدارس مجلس الأكاديمية خطة عمل الهيئات العلمية ومشاريع البحث التي درستها لكي توفر لها الإمكانيات الضرورية لتمويلها.

كما تولت لجنة الأعمال مهامها بتنسيق أنشطة الهيئات العلمية وحصر المحاور العلمية وتحديد المحاضرات والمداخلات العلمية المزمع تقديمها خلال هذه الدورة.

كما انكبت كل هيئة علمية على المساهمة في تحديد المواضيع ذات الأولوية في التخصصات التي تعنيها وعلى وضع خطة عمل وتقييم مشاريع البحث الأولى التي عرضت عليها لإبداء رأيها في جودتها وملائمتها ومطابقتها مع الأولويات الوطنية قصد المساهمة في تمويلها خلال الفترة الممتدة من السنة 2007 إلى 2009.

أصحاب السعادة،
سيداتي، ساداتي،

إذا كان من مهام الأكاديمية الإسهام في النهوض بالبحث العلمي وتنميته، وفي تحديد التوجهات العامة الأساسية للتنمية العلمية والتكنولوجية وكذلك تقييم وتمويل برامج البحث، فإن من مهامها كذلك الاهتمام بنشر وترسيخ الثقافة العلمية والمساهمة في النهوض بدراسة العلوم في المؤسسات التربوية.

لذا، وفي إطار عمل مشترك بين وزارة التربية الوطنية والتعليم العالي وتكوين الأطر والبحث العلمي، ارتأت الأكاديمية أن يكون أول نشاطها بعد تنصيبها متجها نحو الشباب المغربي لتشجيعه على الاهتمام بالعلوم والمعرفة ولتمكينه من المساهمة في الانخراط في السياسة الوطنية الرامية إلى النهوض بالبحث العلمي والتنمية التكنولوجية ونشر الثقافة العلمية داخل المجتمع المغربي.

وفي هذا الإطار، تم تنظيم تظاهرة ثقافية علمية تحت شعار «الشباب والعلم في خدمة التنمية»، تحت الرعاية السامية لصاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، في كل من الرباط والدار البيضاء والقنيطرة والمحمدية وتمازة، انخرط فيها وساهم في برامجها أكثر من 14000 شاب وشابة من تلاميذ وطلبة، وهي الأولى من نوعها نأمل أن تصبح موعدا تقليديا مع تعميمها تدريجيا على مجموع جهات المملكة.

ولم يفت أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات خلال الفترة الممتدة منذ تنصيبها أن تساهم في بعض الأنشطة الدولية، حيث ساهمت على الخصوص في أشغال الجمعية العامة للجنة الدولية ما بين الأكاديميات (IAP) المنعقدة في الإسكندرية في نوفمبر 2006 علما أن أكاديمية الحسن الثاني تقدمت بطلب الانخراط في هذه الهيئة في إطار عمل تنسيقي مع أكاديمية المملكة في هذا الصدد.

ومن جهة أخرى قام بزيارة الأكاديمية، خلال سنة 2006، عدد من الوفود الأجنبية والمسؤولين من بينهم على الخصوص السيدة ماك موري McMurray كاتبة الدولة المساعدة للمحيطات والبيئة والعلم في الولايات المتحدة الأمريكية.

أصحاب السعادة،
سيداتي، ساداتي،

إننا نريد من هذه الدورة العامة، أن تشكل منبرا علميا لعدد من الأكاديميين أعضاء

أكاديمية الحسن الثاني للعلوم والتقنيات ومن شخصيات علمية من داخل وخارج المملكة سيتفضلون بإلقاء محاضرات وتقديم ورقات علمية في المحاور التي تم تحديدها من طرف لجنة الأعمال، باعتبار أهميتها وارتباطها بقضايا الساعة ونظرا لما لابعادها من انعكاسات على التنمية البشرية في بلادنا.

فخلال الجلسة الأولى سيتم معالجة محور «النموذج والرياضيات التطبيقية». إن كل تحليل ومعالجة للقضايا الفعلية والحقيقية المتعلقة بالحياة، والاقتصاد، والمسائل المالية، والمجتمع ومختلف المعارف يقتضيان اللجوء إلى وضع نماذج تعتمد الرياضيات التطبيقية من أجل محاولة فهم هذه القضايا والتكهن بكيفية تطورها واستنتاج في أي اتجاه تسير. إن الرياضيات التطبيقية اليوم تستفيد منها كل التخصصات ويستعملها كل من الباحث في العلوم الدقيقة أو في العلوم الإنسانية والاجتماعية.

وفي الجلسة الثانية سيتم معالجة محور هام يتعلق بـ «مسألة الطاقة اليوم والتحديات العلمية والتقنية»، إن اختيار هذا الموضوع يعبر عن انشغال حقيقي، فالطاقة كانت وما تزال وستبقى تتحكم في حياة البشرية. فكل المؤشرات تتوقع عددا من الاحتمالات والرهانات جد مهمة، تتعلق بشكل خاص بالمشاكل المرتبطة بتأمين واستقلال الموارد الطاقية، وبلاستنفاد التدريجي لاحتياطي الموارد النفطية الطبيعية وكذلك بالتبعات الناتجة عن ارتفاع الحرارة المناخية بسبب الاستهلاك المتنامي للوقود الأحفوري. وسيمكن هذا المحور من مناقشة كل هذه القضايا ومن معالجة الرهانات والتحديات العلمية والتقنية لإيجاد الحلول المناسبة لتجنب هذه التوقعات الغير المطمئنة.

أما الجلسة الثالثة فستخصص لمحور «البيوتكنولوجيات»، التي أصبحت تمثل إحدى رافعات التنمية بالنسبة لكل مخطط يهدف إلى التنمية العلمية والتكنولوجية وكذلك الاجتماعية والاقتصادية، خصوصا بعد الاستكشافات الحديثة والنتائج الواعدة التي تم التوصل إليها في ميادين العلوم الجينية «génomique» وفي ميادين علوم الحياة الجزيئية «biologie moléculaire»، والتي يمكن أن يترتب عنها فرص هائلة لتحسين ظروف حياة البشرية، وتحديات كبيرة بالنسبة للقضايا المتعلقة بالبيواخلاقيات.

أما الجلسة الرابعة والأخيرة فسيكون محورها مخصص لإشكالية «التغيرات المناخية ومشاكل البيئة»، إن هذا الموضوع أصبح مصدر قلق حقيقي على النطاق العالمي لما له من انعكاسات أساسية على مستوى الحياة، والاجتماع الأخير المنعقد في بداية فبراير بباريس حول الموضوع أكد استفحال الوضع وخطورته؛ حيث تبين أغلب الدراسات والمعطيات المناخية أن انبعاث غازات ثاني أكسيد الكربون المتزايد قد يقود لا محالة إلى تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري والسير حثيثا نحو تغيير مناخي سمته الأساسية ارتفاع

درجة حرارة كوكبنا وارتفاع مستوى مياه البحر مما يترتب عليه من عواقب سلبية على الطبيعة والبشرية.

فكل هذه المواضيع تشكل مضمون أشغال دورتنا هذه، والتي ستتم دراستها ومناقشتها من خلال أربع محاضرات و 23 مداخلة علمية.

وفي الأخير ندعو الله تبارك وتعالى أن يوفقنا وأن يجعلنا عند حسن ظن صاحب الجلالة الملك محمد السادس نصره الله، كما نرجوه عز وجل أن يطيل في عمر جلالته ويحفظه ويقر عينه بولي عهده الميمون صاحب السمو الملكي الأمير مولاي الحسن ويشد أزره بصاحب السمو الملكي الأمير مولاي رشيد وبسائر أفراد الأسرة الملكية الشريفة. إنه سميع مجيب وبالإجابة قدير.

والسلام عليكم ورحمة الله وبركاته.