



**Royaume du Maroc
Académie Hassan II des Sciences et Techniques**

Sciences et enjeux de développement

Avec la contribution de :

**O. ASSOBEI, M. BADRAOUI, M. BELAICHE, A. BENYOUSSEF, M. BERRIANE,
M. BESRI, I. BOUJENANE, M. BOUSMINA, M.O. BENSALAH, Y. BOUGHALEB,
N. EL AOUI, M. EL FADILI, A. EL HASSANI, B.B. ELLWOOD, Samira ETAHIRI,
O. FASSI-FEHRI, F. GUESSOUS, M. JLIBENE, N. NSARELLAH, M. SADIKI,
E.H. SAÏDI, Ph.A. TANGUY, M. ZIYAD**

**En commémoration du 4^{ème} anniversaire de l'installation de
l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques
par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu Le Garde**

18 mai 2010



*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 le 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**

Sciences et enjeux de développement

Avec la contribution de :

**O. ASSOBEI, M. BADRAOUI, M. BELAICHE, A. BENYOUSSEF, M. BERRIANE,
M. BESRI, I. BOUJENANE, M. BOUSMINA, M.O. BENSALAH, Y. BOUGHALEB,
N. EL AOUI, M. EL FADILI, A. EL HASSANI, B.B. ELLWOOD, Samira ETAHIRI,
O. FASSI-FEHRI, F. GUESSOUS, M. JLIBENE, N. NSARELLAH, M. SADIKI,
E.H. SAÏDI, Ph.A. TANGUY, M. ZIYAD**

**En commémoration du 4^{ème} anniversaire de l'installation de
l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques
par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu Le Garde**

18 mai 2010

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

Dépôt légal : 2010 MO 1456
ISBN : 978 - 9954 - 520 - 01 - 7

Réalisation : AGRI-BYS S.A.R.L. (A.U)

Sommaire

I- Un état de la recherche en sciences économiques au Maroc : Trajectoires, problématiques et champs théoriques Noureddine EL AOUI.....	9
II- L'évolution de la science géographique au Maroc : de la connaissance scientifique de l'espace et de la société à l'engagement dans l'effort de développement Mohamed BERRIANE	37
III- Nouveaux Matériaux : Structure, Propriétés et Applications.....	57
Nouveaux Matériaux pour l'Electronique de Spin Mohammed BELAICHE, Abdelilah BENYOUSSEF.....	58
Graphène et Fullerènes : Matériaux d'Avenir Mostapha BOUSMINA, El Hassan SAÏDI	66
Matériaux Intelligents : Cas des Alliages à Mémoire de Forme Mohammed Ouadie BENSALAH, Omar FASSI-FEHRI, Yahia BOUGHALEB.....	75
IV- Impact de l'amélioration génétique sur la productivité des blés au maroc Mohammed JLIBENE, Nasserlehaq NSARELLAH, Mohamed BESRI, Mohamed BADRAOUI, Mohamed SADIKI	81
V- La Recherche en Amélioration Génétique Ovine au Maroc : Principaux Acquis et Conséquences sur le Développement de la Production Ovine Ismâïl BOUJENANE, Moussa EL FADILI, Fouad GUESSOUS, Mohamed BADRAOUI, Mohamed SADIKI	97
VI- The Magnetostratigraphy Susceptibility for Lowermost Lower Devonian to Uppermost Middle Devonian Marine Rocks : Eastern Anti Atlas, Morocco Ahmed EL HASSANI, Brooks B. ELLWOOD.....	117
VII- Valorisation du CO₂ : de nouvelles opportunités pour le Maroc Mahfoud ZIYAD, Philippe A. TANGUY.....	135
VIII- Les algues marines : une source potentielle de biomolécules Samira ETAHIRI, Omar ASSOBBHEI	151

Avant propos

Le 18 mai 2006, Le 18 mai 2006, Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le protège, procédait à l'installation solennelle de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques en Son Palais d'Agadir. Depuis, quatre années se sont écoulées au cours desquelles l'Académie, dans le cadre des Hautes Orientations Royales, a cherché à accomplir ses missions telles que définies par Le Dahir la créant, promouvoir la recherche scientifique et technique, développer la culture scientifique, contribuer à la définition de la politique scientifique du pays, faire de la science un levier essentiel du développement, et toujours encourager et privilégier l'excellence en matière scientifique.

Nous avons voulu célébrer cet anniversaire en éditant cet ouvrage «Sciences & enjeux de développement» qui regroupe un certain nombre d'articles, qui sans présenter des résultats nouveaux ni originaux, traitent dans un certain nombre de domaines scientifiques, des avancées notables qui montrent avec netteté, combien le développement économique et matériel est tributaire du développement des sciences.

Volontairement nous avons mis en tête de l'ouvrage deux articles qui portent sur des disciplines en sciences humaines et sociales, tant il est vrai que, si pour le bien-être des gens, pour améliorer leurs conditions de vie et de travail, il faut certes assurer un développement scientifique et technologique, il est non moins important de connaître d'abord ces conditions de vie et l'environnement dans lequel évoluent les gens pour pouvoir réussir un tel développement. C'est pourquoi les deux premiers articles sont consacrés l'un à l'état de la recherche en sciences économiques au Maroc, l'autre à l'évolution de la science géographique au Maroc. Les autres articles font le point sur des avancées réalisées dans un certain nombre de domaines comme les nouveaux matériaux et leurs multiples et très utiles applications, comme l'impact de l'amélioration génétique sur la productivité du blé et par voie de conséquence sur la sécurité alimentaire du Maroc, comme la recherche en amélioration génétique ovine au Maroc, les opportunités offertes au Maroc par la valorisation du CO₂, ou encore l'utilisation des algues marines comme source potentielle de biomolécules utilisées notamment dans l'industrie agroalimentaire et l'industrie pharmaceutique.

Dans le cadre de ce travail nous n'avons pas voulu présenter un tableau exhaustif qui serait fatalement fastidieux; notre espoir est de faire partager au lecteur, à travers les quelques exemples, choisis surtout dans l'expérience de la recherche marocaine, que sans développement de la science point de développement; à ce propos rappelons que ce n'est pas un hasard si les pays les plus développés sur les plans économique, social ou culturel, sont aussi ceux qui sont les plus développés sur le plan scientifique, que la production scientifique des Etats-Unis représente 37% de la production mondiale (données 2002), celle de l'Union Européenne 35%, celle des pays asiatiques (sur le Pacifique) 21%, celle des pays arabes 0.03%, celle du Maroc 0.08% (un peu plus de 1500 articles par an).

Nous voyons donc combien les enjeux du développement de notre pays sont intimement liés à son développement scientifique, qui lui-même, bien entendu, ne peut être vraiment assuré et réussi que si le pays dispose d'un système éducatif efficace et performant.

C'est pourquoi plus que jamais, dans un monde, qui se dirige vers les économies fondées sur le savoir et la connaissance, le renforcement des capacités en science et technologie s'impose partout et à tous.

Ce modeste travail participe au besoin de sensibiliser les différents opérateurs et intervenants à la nécessaire «relance de la recherche scientifique et technique au service du développement du Maroc», avec le souci constant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques de s'approcher le plus possible de l'objectif qui lui a été fixé, le jour de son installation, par Son Illustre Protecteur Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le protège, «*servir le pays et contribuer au développement de la science mondiale*».

Pr. Omar Fassi-Fehri
Secrétaire Perpétuel

Un état de la recherche en sciences économiques au Maroc : Trajectoires, problématiques et champs théoriques

Noureddine EL AOUI

Université Mohammed V-Agdal, Rabat

Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Directeur du Collège Eudes Stratégiques et Développement Economique

«Le gain de la recherche, c'est la recherche elle-même.»

St-Grégoire de Nysse, *Homélie sur l'ecclésiaste*

«La recherche comporte et comportera toujours une part d'activité créatrice.»

Pierre Joliot, *La recherche passionnément*

Introduction

Une mise en perspective historique de la recherche en sciences économiques au Maroc depuis l'indépendance met en évidence plusieurs trajectoires (section 1) correspondant à des configurations différentes de la recherche académique en termes de problématiques, de champs thématiques, de contenu analytique et méthodologique (section 2).

Pour appréhender ces tendances, qui ne sont pas sans lien avec l'évolution du contexte et des enjeux au niveau à la fois national et international, il y a lieu de prendre en compte les institutions et les stratégies (voir sur ces points El Aoufi, 2008) dédiées à la recherche en sciences économiques afin de diagnostiquer ses faiblesses et d'explorer ses forces et les conditions de son développement en interaction dynamique avec les besoins en termes de connaissance de l'environnement national et avec les exigences imposées par les standards scientifiques internationaux.

1. Trajectoires

A l'origine, les premières thèses de doctorat soutenues au sein des universités françaises définissent une première trajectoire de recherche allant de 1965 à 1970. Ces Travaux, relayés au niveau des enseignements d'économie à l'université, vont contribuer à un formatage de la recherche et à son indexation sur le standard international.

Marquée par une accélération relative du rythme des soutenances de thèses au sein des universités à la fois étrangères (notamment françaises) et nationales (université Mohammed V de Rabat et Hassan II de Casablanca notamment), la seconde trajectoire, plus longue (1970-1995), correspondant à des thèses préparées, encadrées et soutenues au sein des universités nationales, va connaître une diversification du champ thématique et le développement de travaux portant sur des thèmes moins généraux et plus sectoriels avec un contenu empirique accru.

A partir de la moitié des années 1995, notamment suite à la réforme du troisième cycle, il y a lieu d'observer une tendance à la prolifération de travaux de niveau DESA et de thèses nationales accompagnée d'une chute brutale du nombre de thèses d'Etat.

1.1. Au commencement, la thèse

Les premiers jalons de la recherche nationale en sciences économiques au Maroc remontent aux années 1960 et ont été posés d'abord à l'université française. En effet, en l'absence d'un cycle doctoral au sein de l'université marocaine (une seule université jusqu'en 1975: l'université Mohammed V de Rabat), les doctorants n'avaient pas d'autre choix à l'époque que d'aller s'inscrire dans une université française (Paris, Bordeaux ou Grenoble notamment).

Les quelques thèses soutenues entre 1965 et 1975 ont toutes porté sur des problématiques correspondant aux enjeux nationaux au lendemain de l'indépendance: l'évolution de l'investissement public et privé depuis le protectorat jusqu'en 1965 (Belal, 1966); l'assistance technique étrangère (Oualalou, 1968), le système d'intermédiation financière national (Benamour, 1968), l'entrepreneur comme nouvelle figure d'élite au Maroc (Berrada, 1968), etc.

Ces travaux pionniers sont et demeurent de haute facture au plan de la forme et des conventions de recherche, comme au niveau du fond et de la qualité scientifique. La thèse de Aziz Belal constitue, à cet égard, aujourd'hui encore un standard élevé et continue de servir d'étalon - en termes de benchmarking - aux thèses en cours. Tous les ingrédients formels, méthodologiques et analytiques y sont réunis : pertinence de la problématique de recherche, cohérence des hypothèses et des inférences, validité du cadre d'analyse articulant principes théoriques et données factuelles, usage personnel et distanciation critique par rapport au référentiel à la fois théorique et factuel, originalité de l'analyse et des conclusions, etc. Un modèle de rigueur scientifique contenant, en creux, un «mode d'emploi» pour une thèse de qualité.

Ce qui caractérise la plupart de ces travaux, outre une composante théorique substantielle, c'est une prise en compte des données empiriques produites sur l'économie marocaine. Il importe de souligner qu'au cours de cette période les statistiques officielles sont encore non seulement peu disponibles mais demeurent fort rudimentaires et le système d'information économique national insuffisant et fermé aux chercheurs, ce qui dès lors donne une «valeur intrinsèque» particulière à la part factuelle contenue dans une thèse, le statut d'«élite universitaire» octroyant aux chercheurs une position privilégiée dans les représentations des décideurs sans commune mesure avec la situation de dévalorisation que le statut d'enseignant-chercheur et le milieu universitaire vont connaître par la suite (Cherkaoui, 2009). De fait, la participation, dans les années 1958-1960 (gouvernement Abdellah Ibrahim), de certains chercheurs (A. Belal, M. Lahbabi) à l'élaboration du Plan quinquennal 1960-1964 et à la création d'un secteur public national (Banque du Maroc, BRPM, BEPI, OCP, etc.) n'est cependant pas étrangère à la qualité factuelle des travaux effectués.

L'exigence de mettre en place les bases d'une indépendance économique du pays, en particulier le volontarisme politique du gouvernement A. Ibrahim, n'a pas manqué de mobiliser au sein de l'Administration, à côté des Etrangers, des équipes, certes limitées,

de cadres marocains réservant une place de choix aux universitaires. En témoignent les travaux du Plan quinquennal 1960-1964 imprégnés par une approche académique imputable à ces chercheurs et dont les résultats seront largement exploités par ces derniers dans leurs travaux de thèse.

L'année 1970 va connaître la soutenance pour la première fois à l'université marocaine d'une thèse de doctorat en sciences économiques sur *Les investissements entrepris et projetés dans le cadre du développement agricole au Maroc : leur orientation et leurs problèmes* de Abdeljalil Agourram sous la direction de A. Belal. Une seconde soutenance aura lieu quatre ans plus tard seulement et le rythme ne dépassera pas 1,5 thèse par an en moyenne sur la période 1970-1985.

Le dispositif de thèse est de type « classique » en termes à la fois d'exigence, de format et de profil du doctorant. Celui-ci, enseignant à l'université ou cadre supérieur de l'administration, doit conduire ses recherches parallèlement à son travail professionnel, le statut d'enseignant offrant naturellement plus de temps au chercheur, celui de cadre favorisant, en revanche, l'accès à l'information. Le travail de recherche est accompli comme un apprentissage individuel, l'encadrement se limitant à quelques échanges portant sur la définition du sujet de thèse et sur la fixation de la date de soutenance et la composition du jury. A l'arrivée la qualité du produit dépend beaucoup plus de l'exigence et de la norme que se fixe le chercheur en fonction de ses dispositions personnelles que le résultat d'un exercice collectif d'encadrement et d'échange avec le directeur de thèse et avec les pairs. L'encadrement est assuré, à l'échelle nationale, pour l'essentiel par moins de cinq enseignants-chercheurs jusqu'en 1985 et par moins de dix jusqu'à la moitié des années 1990.

Le faible nombre de thèses accomplies s'explique par deux éléments : d'abord la préférence pour l'emploi dans l'administration publique, celle-ci se trouvant, jusqu'au milieu de la décennie 1980, dans une situation structurelle d'offre d'emploi pour les diplômés niveau licence. Ensuite, les routines installées en termes de contraintes de qualité et de temps (une dizaine d'années en moyenne) fonctionnent pour beaucoup de doctorants comme un facteur d'aversion pour le travail de thèse.

Le retournement brutal du marché de l'emploi des diplômés opéré au milieu des années 1980, en correspondance de phase avec la mise en application en 1983 du Programme d'Ajustement structurel (PAS), constitue un point d'inflexion majeur dans la trajectoire. Traduisant une crise profonde du système éducatif en général et de l'enseignement supérieur en particulier, le phénomène de chômage des diplômés, qui va atteindre des niveaux sans précédents au début des années 1990 (justifiant ainsi la création du Conseil national de la Jeunesse et de l'Avenir en 1990), va opérer un « déversement » vers le troisième cycle comme un pis-aller en attendant de trouver un emploi. Dans l'ancien régime, le diplôme d'études supérieures (DES), obtenu suite à la soutenance d'un mémoire, permet d'améliorer l'employabilité des jeunes les faisant accéder statutairement à l'échelle 11 dans l'administration publique. Le mémoire de DES constitue une séquence importante d'initiation à la recherche qui, dès le départ, a imposé des normes en matière de forme et de fond faisant de l'exercice une épreuve exigeante et, par conséquent, dépassant le plus souvent le délai fixé pour sa préparation par la loi (3 à 5 ans au lieu de 2 ans). De fait, certains mémoires (soutenus notamment sur la période 1968- 1985), de par leur rigueur analytique, sont d'une qualité tout à fait comparable aux thèses de doctorat. Mais en général, il s'agit de travaux peu

rigoureux et à contenu analytique faible amorçant une tendance au nivellement par le bas, tendance renforcée par le gel des recrutements au sein des universités imposé par le PAS et ses conséquences sur l'encadrement. L'accroissement quantitatif de travaux de recherche va dès lors s'opérer au détriment de la qualité (plus de 300 mémoires soutenus entre 1968 et 2002 dans la seule université Mohammed V contre 50 thèses environ).

Le mouvement des doctorants «malgré eux» connaîtra, avec le nouveau régime (1997), une nette accélération : une centaine de thèses de doctorat national soutenues à l'université Mohammed V-Agdal entre 1999 et 2005, soit environ 15 thèses par an contre moins de 1,5 thèse de doctorat d'Etat (1968-2005) et moins de 10 mémoires de DES (1968-2002). La même tendance, observée à l'échelle nationale (tableau 1), fait apparaître sur la période 1995-2005 une variation du nombre de thèses autour d'une moyenne par an inférieure à 25 thèses (fréquence cinq fois plus faible qu'en droit).

La dégradation de la qualité des travaux de recherche universitaire s'explique, outre le faible taux d'encadrement (une quinzaine de professeurs de l'enseignement supérieur au total), par une tendance au relâchement de celui-ci sous le double effet de la spécialisation disciplinaire et de la désincitation de la fonction d'encadrement.

- d'une part les sujets de thèse, de plus en plus diversifiés et spécialisés, continuent d'être encadrés selon une logique «généraliste» que renforce l'absence de moyens et de structures d'accueil des doctorants (équipes de recherche, laboratoires, etc.) au sein des établissements universitaires;
- d'autre part, le phénomène de «déclassement» en termes à la fois de *position* et de *disposition* (selon une terminologie de P. Bourdieu) ayant affecté à partir des années 1980 la profession d'enseignant universitaire (Cherkaoui, 2009), nombre d'enseignants trouvèrent une solution, notamment matérielle, dans un cumul d'activités professionnelles (enseignement dans le privé, consultation, expertise, etc.), limitant ainsi leurs engagements professionnels à l'université à la seule composante enseignement.

Cette nouvelle trajectoire, qui va se poursuivre tout au long de la décennie 1990, ne manquera pas de se traduire par un véritable effet d'éviction sur la recherche académique par les études et les rapports commandés par l'administration, le secteur privé et les organismes internationaux.

Tableau 1. Doctorat et Doctorat d'Etat en sciences économiques et en Droit (1995-2005)

	1995/96	96/97	97/98	98/99	99/2000	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05
Sciences économiques	26	33	19	34	19	17	22	22	24	18
Sciences juridiques	126	159	94	168	93	82	110	106	118	86
Total	152	192	113	202	112	99	132	128	142	104

Source : Ministère de l'Enseignement supérieur

1.2. De la thèse à l'expertise ou la mauvaise recherche chasse la bonne

Les années 1985-1995 correspondent à la mise en œuvre du PAS (1983-1993), le rétablissement des équilibres fondamentaux visant la libéralisation et l'ouverture de l'économie nationale par le moyen de réformes institutionnelles (El Aoufi *et al.*, 2005). L'inflexion ainsi opérée en termes de politique économique prend appui sur le modèle macro-économique du FMI, en vogue à l'époque dans la plupart des pays en développement, donnant lieu à une série de rapports et d'études sur les structures, les modes de fonctionnement de l'économie nationale, ainsi que sur les effets espérés de l'application du PAS. Dans cette perspective, plusieurs chercheurs ont voulu trouver, outre un complément non négligeable de revenu, l'opportunité de réaliser des travaux et des analyses fondés sur une démarche plus empirique, exonérée des justifications théoriques et délestée de l'appareil académique (revue de littérature, validation du cadre d'analyse, pertinence des hypothèses de recherche, références bibliographiques, etc.). De fait, impliquant un travail de groupe, le principe des études présente plusieurs externalités positives par rapport au modèle de la thèse, lequel est vécu, dans les conditions d'encadrement décrites plus haut, comme un apprentissage individuel et solitaire de la recherche. La présence d'experts internationaux au sein des équipes de pilotage scientifique permet de favoriser un échange technique et méthodologique et un transfert de compétence en matière d'élaboration du protocole d'enquête, de maîtrise d'outils d'analyse, de pratique du terrain, de conduite d'entretien, d'exploitation des résultats, de modélisation, etc. Certaines études sont, en l'occurrence, de véritables exercices d'acquisition de connaissances méthodologiques et de formation aux techniques d'investigation offrant ainsi des possibilités de «pratique de la recherche par la recherche» qui - comme on l'a déjà dit- font défaut au sein de l'université.

Tirant profit de cette expérience, des bureaux d'études nationaux se sont multipliés dans les grandes villes du pays réussissant à emporter des marchés face même quelques fois à la concurrence internationale. Ce qui n'a pas manqué de contribuer à faire émerger un marché national d'expertise et à exercer une forte attraction sur la communauté des enseignants-chercheurs toutes catégories confondues (professeurs, professeurs habilités ou maîtres de conférence, professeurs assistants ou maîtres-assistants).

L'analyse, à grands traits, de la «littérature grise» produite tout au long de cette période fait apparaître une série de faits stylisés :

(i) Une utilité immédiate. Tout d'abord il s'agit d'études portant sur des problématiques sectorielles et thématiques à périmètre souvent limité. Prenant en compte les contraintes de format, de délais et/ou de budget, de telles études débouchent la plupart du temps sur des résultats ponctuels, à utilité immédiate.

(ii) Un contenu empirique. Ensuite, le contenu empirique est prédominant aussi bien dans les enquêtes qualitatives que dans les élaborations économétriques. La substance plus ou moins extensive ou intensive de ces travaux constitue, dès lors, un élément de différenciation lié à la qualité des experts et consultants, au degré de leur maîtrise des techniques d'investigation et d'analyse, voire à la densité des *liens faibles* et des réseaux dont ils bénéficient au sein de l'administration publique, du monde des affaires, des associations professionnelles (patronales et syndicales).

(iii) Une expertise segmentée. Parallèlement aux rapports effectués par les organismes internationaux (Banque mondiale, FMI, PNUD, Unicef, notamment), s'est progressivement développée une modalité nationale d'expertise et de consultation à la fois privée (bureaux d'études) et publique (administration). Les premiers, produits de façon récurrente dans le cadre de stratégies propres à ces organismes au niveau mondial, visent à peser sur la décision des pouvoirs publics dans les pays en développement et à infléchir leurs politiques économiques en cohérence avec les exigences de l'ouverture et du libre-échange. Rares et strictement confidentiels au cours des années 1960 (rapport du FMI sur la crise financière du pays) et 1970 (rapport de la Banque mondiale sur les salaires), ces rapports vont se succéder à un rythme accéléré à partir des années 1980, en relation avec la libéralisation et les privatisations, pour devenir à partir des années 1990 une source d'information, d'inspiration et d'aide à la décision. Allant de la macroéconomie budgétaire, monétaire et financière (FMI) aux questions plus spécifiques de travail des enfants (Unicef), de micro-crédit et de lutte contre la pauvreté (Banque mondiale), de mise à niveau des entreprises (Union européenne, GTZ) en passant par la problématique du développement humain (PNUD), et de gouvernance (PNUD, Banque mondiale) les champs abordés correspondent à des choix stratégiques et à des priorités en termes de stabilisation et d'ajustement. Quant à l'expertise nationale, elle intervient à un niveau moins global et plus spécifique et porte en général sur des questions plus micro-économiques concernant l'action d'une organisation publique (administration, collectivités locales) ou privée en matière de management, de gestion des ressources humaines, d'audit, etc.

(iv) Crédibilité et fiabilité. Cette hiérarchie en termes de niveaux d'intervention se double aux yeux des décideurs publics d'une plus grande fiabilité des rapports élaborés par les organismes internationaux dont les recommandations ont, de ce fait, plus de chance de sortir des tiroirs et d'être prises en compte dans l'action publique. Une telle crédibilité, loin d'être justifiée du point de vue de la communauté des économistes et experts nationaux, semble se fonder sur deux éléments : d'une part la mise en oeuvre des préconisations des experts internationaux est souvent assortie d'un appui financier et d'un accompagnement technique de la part des bailleurs de fonds; d'autre part, bénéficiant de l'accès direct à l'information disponible, les experts internationaux peuvent mobiliser des outils plus puissants d'analyse quantitative et de modélisation.

(v) L'avantage différentiel de l'expertise nationale. En revanche, il convient de souligner l'avantage comparatif que présente l'expertise nationale, du fait de son ancrage, en termes de pertinence et de capacité d'appréhender de façon plus qualitative et plus approfondie le terrain, de capturer les fonctionnements complexes de l'économie nationale et de saisir les subtilités psychologiques et culturelles des comportements individuels et collectifs. Perçue par les experts nationaux comme une «discrimination», la préférence internationale est d'autant moins «défendable» qu'à leurs yeux elle est sujette à caution dès lors que sa démarche hypothético-déductive procède d'une vision univoque et réductrice de la réalité des pays en développement, rappelant ainsi les critiques faites par un «insider» (Stiglitz, 2002, p. 78-79) dans les termes suivants : «Les critiques contre les conditions du FMI ne portaient pas sur leur nature et sur les moyens par lesquels on les imposait, mais aussi sur la façon dont on les élaborait. La procédure normale du Fonds consiste à rédiger un projet de rapport avant de se rendre dans le pays client. La visite n'a pour but que d'affiner ce projet et ses recommandations et de repérer d'éventuelles erreurs grossières. En pratique, le projet de rapport est souvent ce que l'on appelle un *boiler plate*: on y

insère des paragraphes entiers empruntés au rapport d'un autre pays. Rien de plus simple, avec le traitement de texte. Une histoire, peut-être apocryphe, veut qu'un jour, un logiciel de traitement de texte ayant omis de faire un «rechercher-remplacer», le nom du pays auquel un rapport avait été emprunté dans sa quasi-totalité soit resté dans le document mis en circulation. S'agissait-il d'un cas unique s'expliquant par l'urgence? Il est difficile de le savoir, mais cette bourde réelle ou supposée a renforcé dans bien des esprits l'image du rapport «taille unique».

Au-delà de leur pertinence, les préconisations contenues dans les rapports internationaux tirent leur fondement théorique du paradigme dominant et ressortissent, de façon implicite, au programme de recherche néo-classique. Mobilisant les résultats théoriques et empiriques les plus récents du modèle standard, ces rapports tentent de traduire en politique économique et en dispositifs de réforme et d'action les concepts, les conjectures et les axiomes issus des élaborations théoriques.

Une telle traverse de la théorie à la politique économique est précisément ce qui permet d'octroyer du crédit aux travaux d'expertise et d'en faire un prolongement positif et pragmatique de la recherche fondamentale et normative. Un prolongement mais aussi, en retour, un test de vérification et de réfutabilité des élaborations théoriques et des principes méthodologiques propres au développement du procès de production scientifique.

La réforme du troisième cycle de 1997 constitue, comme le suggère le point qui suit, l'amorce d'une restructuration de la recherche universitaire.

1.3. Vers une résilience de la recherche?

La «mauvaise recherche chasse la bonne» : la «défection» d'enseignants-chercheurs dans les années 1985-1995 et l'attraction exercée sur nombre d'entre eux par le monde de la consultation et de l'expertise ont été à l'origine de la détérioration de la qualité des thèses et de la redondance des thèmes abordés, la réplication des approches, des analyses et des méthodes débouchant sur un phénomène d'entropie de la recherche au sein de l'université.

Une telle tendance fut atténuée par la mise en œuvre en février 1987 de la réforme du troisième cycle instituant le système des unités de formation et de recherche (UFR) qui, tout en introduisant les critères de «sélection», favorise la mise en place de structures d'appui à la recherche et d'encadrement des mémoires de DESA et de thèses de doctorat.

L'effet de «résilience» produit par le système des UFR sur la recherche universitaire peut être appréhendé à deux niveaux :

- Le premier concerne l'organisation du travail d'encadrement en équipes d'enseignants assurant sous la coordination du responsable de l'UFR les différentes séquences du processus de préparation d'un mémoire ou d'une thèse depuis le choix du sujet jusqu'à la soutenance en passant par l'élaboration de la problématique et des hypothèses de recherche, le protocole d'enquête, l'accès au terrain, etc. Ce schéma certes théorique n'en constitue pas moins un dispositif institutionnel optimal susceptible de structurer un processus auto-entretenu de recherche et de créer les routines propres à une pratique scientifique au sein de l'université.

- Le second effet a trait au *Research Design* et aux orientations thématiques des travaux de mémoire de DESA et de thèses de doctorat. Le principe d'accréditation des UFR implique une définition à la fois des séminaires de formation (DESA) et des axes de recherche (doctorat), ce qui est de nature à assurer aux travaux de recherche effectués au sein des UFR les conditions de cohérence et de continuité nécessaires au processus cumulatif de recherche et à l'amélioration de sa substance scientifique. De fait, on a pu observer une tendance à une plus grande diversification des sujets de mémoire et de thèse d'une part, à une spécification accrue des problématiques et des hypothèses de recherche d'autre part.

Toutefois, dans la pratique la prépondérance des cours et des examens, en prolongement et en duplication du modèle de la licence, tend à réduire à la portion congrue la composante recherche. De sorte que les mémoires de DESA sont très vite devenus de simples «rapports de fin d'études», ne comportant nulle valeur ajoutée et sont effectués en grande partie selon la technique du «copier-coller». La soutenance «en série» de ces travaux ne permettant guère, dans ces conditions, d'en assurer l'évaluation et le contrôle, la plupart des mémoires acceptés sont, d'un point de vue strict, tout sauf des travaux de recherche : problématique réduite à une liste plus ou moins exhaustive de questions, revue de littérature déclinée en termes d'inventaire «à la Prévert», structure du plan désarticulée et éclatée en deux parties disjointes théorique et empirique, données statistiques incohérentes, discontinues et poreuses, usage peu rigoureux des citations et des références bibliographiques, etc.

Exercice d'apprentissage de la recherche, le mémoire de DESA a, en principe, pour finalité la mobilisation et la mise en application des ressources essentielles de la recherche scientifique : l'appropriation théorique et méthodologique, la pratique du terrain, l'analyse critique, l'usage des conventions formelles de recherche. Force est de constater que ces lacunes devenues structurelles vont se trouver amplifiées au niveau des thèses de doctorat. Elles seront reproduites, pour ainsi dire, par un phénomène de «mimétisme par le bas».

Un autre facteur mérite d'être souligné : la quasi-totalité des titulaires de DESA abandonne le cycle doctoral attirée par le marché de l'emploi, le DESA améliorant nettement leur employabilité (échelle 11 dans l'administration publique). L'institution en 2005 d'un système d'allocations de recherche pour les doctorants (200 bourses par an au niveau national d'un montant de 2.300 DH par mois pendant 36 mois) n'est, apparemment, pas suffisamment incitative pour s'engager, sur une durée minimum de trois ans, dans une thèse de doctorat.

Dans la même optique, la faiblesse des moyens matériels ou plutôt les rigidités liées au mode de gestion centralisée des budgets affectés aux UFR n'ont pas été sans conséquences sur la mise en place de structures de recherche (groupes de recherche, laboratoires) et sur la définition de stratégies de recherche appropriées : rares sont en définitive les UFR qui ont pu assurer aux doctorants les structures d'appui nécessaires prévues par les textes.

En 1998, le gouvernement d'«alternance» mit au point une «nouvelle stratégie» visant les quelques objectifs suivants (Secrétariat d'Etat chargé de la recherche scientifique, 2002) :

- organiser, structurer et coordonner les activités de la recherche scientifique;
- déterminer des programmes et des axes de recherche prioritaires;
- assurer un financement adéquat pour mieux assurer la participation de la recherche scientifique au renforcement du potentiel productif national aux niveaux économique, social et culturel.

Des programmes d'appui à la recherche scientifique (PARS), puis des programmes thématiques d'appui à la recherche scientifique (PROTARS) ont pu être lancés. Le premier a permis de financer 227 projets sur un total de 731 propositions. La subvention allouée dans le cadre de ce programme a été de 37,78 millions de dirhams, soit une moyenne de 50 000 DH par projet. Le second, destiné à promouvoir «la recherche appliquée et pluridisciplinaire» et décliné sur trois tranches (au total 409 projets retenus sur 1295 proposés), s'est élevé à 94 millions de DH au total.

Ces financements ont, dans une certaine mesure, contribué à faire émerger au sein de l'université des équipes de recherche et à y définir des programmes de recherche autour de problématiques communes (on y reviendra), correspondant pour la première fois à la «stratégie de recherche» définie et coordonnée au niveau national. Cependant, l'impact induit par ces programmes (moins d'une trentaine en sciences économiques et gestion) est tout compte fait très limité et bien en deçà de l'effet de seuil escompté : diffusion restreinte, documents de travail ne donnant pas lieu à une publication, voire certains programmes n'ont jamais débouché, etc.

L'impératif d'une réforme du système éducatif dans son ensemble englobant comme un levier essentiel la recherche scientifique a été souligné, de façon radicale, par la Charte nationale d'éducation et de formation (1999) qui préconisa une série de mesures favorisant une «résilience» de la recherche universitaire :

- augmenter progressivement les moyens consacrés à la recherche scientifique et technique pour atteindre au moins 1% du PIB;
- restructurer les unités et centres de recherche publics existants, pour mettre en réseau ceux qui travaillent dans un même domaine;
- renforcer les missions de documentation, de veille technologique et de diffusion de résultats des travaux de la recherche;
- orienter la recherche scientifique et technique nationale vers la recherche appliquée, la maîtrise et l'adaptation des technologies et l'appui à l'innovation;
- encourager la création au sein des établissements de recherche et de formation d'incubateurs d'entreprises innovantes;
- publier un rapport d'évaluation tous les deux ans.

Dans la même perspective, outre la «restructuration de la recherche universitaire» lancée en 2005, la mise en œuvre du système L/M/D en 2003 qui s'achève par le démarrage à la rentrée 2009/2010 du nouveau doctorat semble définir une nouvelle architecture institutionnelle (on y reviendra) de nature à reconfigurer l'université sur son métier : la formation à la recherche par la recherche. Mais auparavant il importe de passer en revue les caractéristiques du champ disciplinaire.

2. Problématiques et champs théoriques

La trajectoire de la recherche esquissée plus haut n'a pas mis en évidence l'évolution des contenus thématiques des travaux de thèse et les changements intervenus en termes de paradigmes (au sens de Khun, 1970) et de contextes économiques national et international.

L'analyse du champ disciplinaire en longue période fait apparaître deux grandes configurations différentes : la première, marquée par la prégnance du paradigme structuraliste, marxiste pour l'essentiel, correspond au contexte des années 1960-1970, est dominée par les enjeux du développement auto-centré. Associée à la rupture introduite en 1983 par le Programme d'ajustement structurel (PAS), la seconde configuration disciplinaire est caractérisée par une prise en compte plus substantielle des principes de l'économie néo-classique. Elle s'accompagne, dans le même mouvement, d'une orientation thématique vers l'étude sectorielle, la gestion et le management et d'un recours, quoique limité, aux techniques de modélisation et de formalisation. Depuis le milieu des années 1990, parallèlement à la mise en œuvre de la réforme de l'enseignement supérieur et à la restructuration de la recherche au sein des universités, on assiste à une appropriation des nouvelles théories (néo-institutionnalisme, économie évolutionniste, etc.) et des approches méthodologiques qui leur sont associées (hol-individualisme, simulation de mécanismes d'enchères propre à l'économie expérimentale, etc.).

2.1. Une approche structurale, critique et normative

Les premiers travaux de thèse (soutenus en France) portent, on l'a rappelé plus haut, sur les problématiques de l'investissement (Belal, 1966), de l'assistance étrangère (Oualalou, 1968), de l'intermédiation financière (Benamour, 1968), de l'entrepreneur (Berrada, 1968) et du surplus économique (El Malki, 1973).

Ces travaux vont constituer une orientation générale pour les thèses inscrites au sein de l'université nationale et définir une «convention» de recherche, c'est-à-dire un ensemble de règles que la communauté des chercheurs, notamment les doctorants, va suivre, dupliquer et reproduire.

Une qualification en termes de contenu thématique, théorique et méthodologique de ces travaux met en évidence une série de *faits stylisés* : (i) d'abord une focalisation sur les problématiques liées au procès du sous-développement, (ii) ensuite une approche normative en termes de critique de l'économie politique, (iii) enfin une démarche hypothético-déductive privilégiant le holisme méthodologique.

(i) Le sous-développement comme processus structurel. La problématique du sous-développement est explicite dans la plupart des travaux dont l'hypothèse commune peut être schématisée dans la formule ramassée (Freyssinet, 1966) : «le sous-développement des uns est dû au développement des autres». L'analyse, en référence à l'anthropologie structuraliste (Lévy-Strauss, 1955), privilégie les structures économiques et sociales afin de capturer les mécanismes générateurs du sous-développement. Ce sont les *formations économiques et sociales* (FES) qui constituent l'objet de recherche dont il importe de *déconstruire* (au sens de Derrida, 19) la *combinatoire* des modes de production et d'y

saisir la *dominance* d'un mode, en l'occurrence le mode de production capitaliste (MPC), sur les autres modes qualifiés de pré-capitalistes. L'approche en termes de FES a pour corollaire une configuration de classes sociales, de hiérarchies, d'alliances et de luttes de classes qui, en dernière analyse, expliquent le mouvement historique d'ensemble (Rey, 1976).

Par ailleurs, le sous-développement est appréhendé comme un «phénomène historiquement daté» : c'est la colonisation qui fut à l'origine du processus de sous-développement. Les thèses développées rejoignent deux théories apparemment divergentes de l'impérialisme : la thèse que ce dernier, résultat d'une maturation du capitalisme monopoliste et d'un excédent de capitaux, implique l'implantation, y compris par la guerre, du MPC au sein des FES pré-capitalistes (Lénine) *versus* la thèse selon laquelle la crise du capitalisme de la fin du xx^e siècle correspond plutôt à un problème de débouchés ne pouvant se résoudre que par l'expansion commerciale (R. Luxemburg). Les implications de ces deux partis pris ne sont pas que d'ordre politique et stratégique, mais aussi analytique : produit de l'impérialisme commercial, le sous-développement a tendance à se perpétuer par la détérioration séculaire des termes de l'échange (Prebish, 1950), associée à *l'échange inégal* (Emmanuel, 1969) et aux rapports de *dépendance* (CEPAL) imposés aux pays sous-développés, suite à leur indépendance politique, par les pays capitalistes développés. A l'inverse de la première, la seconde thèse considère que le «procès du sous-développement» (Salama, 1973) a partie liée avec le *développement inégal* (Amin, 1973) fondé sur une asymétrie historique entre le «centre» (pays capitalistes développés) et la «périphérie» (pays capitalistes sous-développés), cette dernière subissant de façon durable une ponction substantielle, *via* les firmes multinationales, sur ses ressources et sur sa plus-value générant un cercle vicieux du sous-développement.

Les itérations faites sur le cas du Maroc établissent un lien historique et structural entre la genèse du sous-développement et la « greffe », sous le Protectorat (1912-1956), du MPC, celui-ci contribuant à la désintégration de l'équilibre traditionnel et communautaire à travers la diffusion du rapport marchand et du salariat. Dès lors le maintien dans le sous-développement de la FES marocaine est assuré durablement par la «satellisation» de l'économie marocaine par rapport à la métropole (Belal, 1968). Au-delà de l'indépendance, plusieurs mécanismes contribuent à la reproduction de l'accumulation du capital au profit de la métropole : l'assistance étrangère (Oualalou, 1969), les carences structurelles du système monétaire et financier (Benamour, 1971), mais aussi et surtout la structure de classes polarisée autour de la bourgeoisie «compradore» (Belal, 1966) et «mangeuse de surplus» (El Malki, 1973) et de l'ensemble des classes populaires exploitées et dominées sur une double échelle nationale et internationale.

(ii) Une approche critique et normative. L'approche procède, *mutatis mutandis*, d'une critique radicale de l'économisme réservant aux «facteurs économiques», à la suite d'Althusser (1965), un effet déterminant, mais «en dernière instance» seulement. Les travaux de A. Belal sont à cet égard exemplaires : le sous-développement, défini comme processus historique, est irréductible aux seuls «effets multiplicateurs» de l'investissement. Les évolutions politiques, sociales et culturelles du Maroc sous le protectorat ont été à l'origine d'une désagrégation des rapports sociaux traditionnels par le mode de production capitaliste (MPC), ce dernier assurant sa domination en vertu de dispositifs politiques propres au système colonial. La démarche *historiciste*, sous-jacente à cette approche, est

empruntée aux travaux de A. Laroui, notamment sur le monde arabe (1974), restituant dans la longue durée les processus complexes politiques, économiques, culturels ayant structuré les sociétés maghrébines en général et la société marocaine en particulier.

Parallèlement on retrouve dans l'ensemble des travaux, en creux ou de façon explicite, une référence à la critique de la « thèse dualiste » formulée par E. Gannagé (1962) accréditant l'hypothèse d'une juxtaposition au sein des sociétés sous-développées de deux secteurs, un secteur moderne, capitaliste et ouvert d'une part et un secteur traditionnel, précapitaliste et archaïque d'autre part. Contrairement à la rhétorique binaire, l'analyse structurale et historique de l'économie marocaine met en évidence une pluralité de formes d'activité ou une combinatoire de modes de production au sein de la quelle le MPC occupe une position dominante.

Cette critique du dualisme économique prend appui sur les résultats empiriques de la « sociologie rurale », notamment les travaux de P. Pascon (1977) sur la « société composite » faisant apparaître une configuration plus complexe articulant une diversité de formes d'activité et d'échange (mode caidal, patriarcal, féodal, capitaliste, etc.).

Dans la même optique, l'approche en termes « métropole/satellite » tend à privilégier, implicitement chez l'auteur comme dans la plupart des travaux de cette période (Oualalou, 1969) les « causalités externes » dans l'explication du sous-développement et de sa reproduction par rapport aux « facteurs internes » considérés comme *induits* dans la théorie de la dépendance.

C'est en résonance par rapport au modèle de W. W. Rostow (1960) sur *les étapes de la croissance économique* que la « thèse du retard » est vigoureusement rejetée. De fait, la thèse semble admettre pour les pays sous-développés la possibilité, compte tenu d'un effort particulier en matière d'épargne et d'investissement comme condition du « décollage économique », de rattrapage de leur retard dans le cadre du système d'échange international. Dans cette configuration, l'investissement étranger est considéré comme un facteur décisif dans le processus d'industrialisation favorisant l'accroissement de la productivité du travail et la modernisation de l'agriculture. A cette trajectoire linéaire, plusieurs travaux opposent une « stratégie de développement auto-centré et intégré », impliquant un processus de « déconnexion » et d'« autonomie collective » de la « périphérie » par rapport au « centre » (Amin, 1970) et fondée sur les principes essentiels suivants : (i) la réforme agraire; (ii) l'industrialisation; (iii) l'interventionnisme de l'Etat. Prenant appui sur les orientations stratégiques du Plan quinquennal 1960-1964 tracées par le gouvernement Abdellah Ibrahim, ces principes de réforme procèdent d'un « constructivisme théorique » combinant politique économique keynésienne, développement du secteur public, redistribution par la fiscalité, planification indicative, élargissement du marché interne, promotion de l'entreprise privée, etc. (Oualalou, 1969; Benamour, 1971) et « réformes structurelles » tendant à réduire les inégalités ville/campagne (en l'occurrence la politique des barrages lancée dans les années 1970 est analysée comme une politique favorisant les gros propriétaires terriens du Gharb au détriment de la majorité des paysans), à renforcer l'accumulation domestique du capital par rapport aux investissements étrangers, à donner la priorité à l'industrialisation lourde (biens d'équipement), celle-ci contribuant à terme, plus que les industries légères (biens de consommation), au « noircissement de la matrice inter-industrielle » selon une « application » du modèle de Léontieff (1966) au cas algérien

faite dans les années 1960 par G.D. De Bernis (1966, 1971). Au sein de ce paradigme, porté à bras le corps par les travaux de la CEPAL, l'Etat interventionniste et volontariste se voit assigné, outre la tâche primordiale de mise en œuvre de la stratégie de développement, le rôle de «jonction de l'économique, du politique et du social» (Belal, 1968), c'est-à-dire de soumission des lois et des contraintes économiques à l'action publique, fondatrice et constructiviste.

(iii) Une démarche holiste. L'optique normative qui vient d'être soulignée est fondée sur une démarche méthodologique holiste et hypothético-déductive. Adoptant une structure analytique en termes de périodes historiques, les données factuelles et statistiques disponibles sont toutefois loin d'être suffisantes et significatives. D'une part, les problématiques analysées ayant trait au procès du sous-développement, à l'Etat, au secteur public, aux structures agraires, aux stratégies de développement, à l'industrialisation, au commerce extérieur, au système monétaire, etc. définissent des champs macro-économiques et mobilisent les agrégats globaux de la comptabilité nationale et de la planification et les données statistiques officielles. Le travail d'investigation se limite la plupart du temps à l'exploitation des documents produits par l'administration. L'accès direct à l'information constitue, en effet, pour nombre de chercheurs occupant - on l'a déjà signalé - des postes de responsabilité au sein de l'administration, un atout important et crédite leurs travaux d'une pertinence accrue. La qualité des données utilisées est, dans ce contexte, liée à son caractère «inédit» ou «confidentiel», le chercheur doit faire preuve d'ingéniosité lorsqu'il ne bénéficie pas, de par sa position dans l'administration, d'une «rente informationnelle».

D'autre part, il y a lieu de souligner une prédominance, dans la plupart des travaux de thèses, de l'analyse temporelle se déclinant sur la longue durée de façon séquentielle : la période précoloniale, le protectorat, l'indépendance. Toutefois, si les séries statistiques, courtes et poreuses, ne sont guère de nature à autoriser des analyses en «coupes» historiques longues, le caractère fragmentaire et discontinu des données disponibles à partir de l'indépendance tend à limiter la cohérence de l'analyse de type diachronique et la pertinence de la périodisation. Du point de vue méthodologique, la prise en compte des évolutions longues semble en correspondance de phase avec la démarche structurale dominante, privilégiant les processus et les tendances lourdes. Mais si sur la période précoloniale (notamment le XIX^e siècle) les travaux des historiens (Terrasse, 1949; Miège, 1961; Laroui, 1980) apportent des résultats édifiants et constituent une source incontournable, en revanche le Protectorat est appréhendé en référence à deux ouvrages essentiels, le premier faisant le «bilan de la colonisation» (Ayache, 1956), le second portant sur le patronat européen (Galissot, 1964).

Enfin, les travaux de thèse ont tendance à déployer une méthodologie circulaire, allant du général au général et ne laissant quasiment pas de place aux catégories micro-économiques et aux comportements individuels des agents. Une seule exception toutefois : la thèse de M. G. Berrada (1968) soutenue à l'université de Bordeaux portant sur *L'entrepreneur marocain, une élite de transition*. Anticipant sur des problématiques de recherche qui vont correspondre, dans les années 90, à des enjeux essentiels de l'économie nationale, ce travail prend pour objet, à contre-courant des travaux de l'époque, l'entreprise et l'entrepreneur et mobilise, dans sa démarche qualitative, un dispositif d'enquête auprès de 39 entreprises (auxquelles il faut ajouter 47 entreprises visitées). Bien qu'il ne fasse

aucune référence aux travaux fondateurs des «nouvelles théories des firmes» aujourd'hui dominantes, notamment le texte, datant de 1937, dû à R. Coase sur «la nature de la firme», on y trouve une analyse pénétrante pouvant servir de point de départ pour un programme de recherche dédiée à d'entreprise au Maroc dans la lignée du modèle standard.

Tableau 2. Une trajectoire structuraliste centrée sur la problématique du développement

Problématiques	Paradigmes/Théories	Contextes	Références
<p><i>Sous-développement / développement</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Facteurs explicatifs du sous-développement du Maroc - Impact du protectorat et du mode de production capitaliste sur les structures économiques et sociales - Rôle des investissements étrangers et des firmes multinationales dans la reproduction de la dépendance 	<ul style="list-style-type: none"> - Hétérodoxie structuraliste et historique - Théorie de l'impérialisme et de la dépendance : polarisation centre/périphérie - Pôles de croissance - Croissance équilibrée vs croissance déséquilibrée - Détérioration séculaire des termes de l'échange - Développement auto-centré 	<ul style="list-style-type: none"> - Bipolarisation pays capitalistes avancés/ pays du socialisme réel - Keynésianisme et fordisme au «centre» - Processus de décolonisation et d'indépendance à la «périphérie» 	<ul style="list-style-type: none"> - Marx (1867) - Keynes (1936) - Prebisch (1950) - Nurkse (1967) - Myrdal (1957) - Singer (1975) - Hirschman (1958) - Frank (1967) - Emmanuel (1969) - Amin (1970, 1973) - Freyssinet (1966) - CODESRIA
<p><i>Industrialisation</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Politiques d'industrialisation dans le tiers-Monde en général et au Maroc en particulier - ... et leur crise liée aux effets négatifs de l'extraversion et à une faible intégration industrielle 	<ul style="list-style-type: none"> - Critique de l'étapisme de Rostow - Matrice inter-industrielle - Industrialisation intravertie - vs industrialisation extravertie 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle de substitution des importations de la (CEPAL) - Modèle d'industries industrialisantes (modèle nassérien et algérien) - Emergence des pays semi-industriels (Asie du Sud-Est) 	<ul style="list-style-type: none"> - CEPAL - Debernis (1966) - Léontieff (1966)
<p><i>Réforme agraire et développement agricole</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Politiques agricoles... - ... structures agraires... - ... et développement capitaliste - Réforme agraire et limites de la politique des barrages 	<ul style="list-style-type: none"> - Hypothèse de l'élasticité infinie de l'offre de main-d'œuvre - Critique de la thèse du dualisme 	<ul style="list-style-type: none"> - Réformes agraires (exemple des pays d'Amérique latine) - «Révolution verte» dans les pays asiatiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Lewis (1955) - Amin et Vergopoulos (1974) - Lambert (1970) - Gutelman (1974) - Mendras (1976) - Dumont (1978)
<p><i>Politique monétaire et financière</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Rôle du système bancaire dans le développement économique - Relation épargne/ investissement - Mécanismes de la dépendance monétaire et financière 	<ul style="list-style-type: none"> - Critique du monétarisme - de la sphère monétaire et financière par rapport à la sphère réelle - Thèse de la souveraineté monétaire et financière de l'Etat 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité monétaire et financière - Processus marqué par la stagflation 	<ul style="list-style-type: none"> - Friedman (1973) - Gannagé (1969) - Kaldor (1962) - Mc Kinnon (1973)

2.2. L'économie standard en creux et à l'œuvre

On peut dater l'inflexion opérée dans le champ disciplinaire de la mise en œuvre au Maroc du Programme d'Ajustement structurel (PAS) en 1983, suite à la crise de la dette. Dans le contexte intellectuel et théorique de l'époque, l'adoption par le gouvernement des mesures préconisées par le FMI fut considérée par la «communauté» des économistes comme un virage à 180 degrés eu égard aux objectifs structurels de développement sans cesse réitérés dans la plupart des travaux académiques. Rappelons brièvement les principes essentiels du PAS qui fondent le «Consensus de Washington» autour des mots d'ordre de stabilisation et d'équilibre macro-économiques :

- une politique d'austérité et de maîtrise du déficit budgétaire;
- une discipline fiscale accrue;
- une politique de changes appropriée au lieu des restrictions des importations et des subventions aux exportations;
- libéralisation économique et restructuration des activités liées au marché et des secteurs d'exportation;
- privatisation, déréglementation et renforcement des droits de propriété;
- ouverture des marchés à l'investissement direct étranger.

Face aux «recommandations du FMI», la réaction est d'abord politique : l'opposition parlementaire (Union socialiste des Forces populaires, Parti du Progrès et du Socialisme, Organisation pour l'Action démocratique et populaire) met l'accent sur les «conséquences négatives et brutales» engendrées par les politiques d'austérité budgétaire et de réduction drastique des dépenses publiques dans le domaine social (chômage, exclusion, pauvreté, recul de la demande effective, atonie de la croissance, etc.). Dans la même optique critique des «effets pervers» du PAS, la rhétorique prévalente chez les économistes met en avant les causalités, objectives et supposées quasi-automatiques, entre équilibres financiers et déséquilibres économiques et sociaux. On peut s'attendre dès lors à une prise en compte par la recherche de cette nouvelle problématique et à une critique théorique des hypothèses qui sous-tendent le PAS. Il n'en est rien. Les travaux de thèse demeurent, dans l'ensemble, sans «qualité théorique», dédiés à une argumentation factuelle et *conséquentialiste* établissant des liens entre mise en œuvre du PAS et dégradation des indicateurs économiques en général et sociaux en particulier. Cette tendance à privilégier l'approche empirique et descriptive a pour corollaire un abandon de la théorie favorisé- on y reviendra - par un glissement opéré dans les années 1990 de l'économie vers la gestion. Toutefois, le dispositif théorique de l'économie standard, *en creux* dans l'approche du FMI et de la Banque mondiale, se trouve à l'œuvre dans la plupart des travaux de thèse et constitue subrepticement un référentiel presque exclusif pour les jeunes doctorants, dans un contexte- on l'a déjà souligné- de recul de l'encadrement des travaux de thèse au sein de l'université.

(i) Une recherche sans qualités. La prédominance de l'approche descriptive dans les travaux de thèse est, on l'a dit, justifiée par les finalités du PAS se déclinant en termes de politique économique dans les domaines budgétaire, monétaire, financier, de commerce extérieur, etc. L'évaluation empirique des résultats atteints et des effets induits par les

mesures mises en œuvre devient par conséquent un enjeu essentiel et le recours aux rapports produits par les organismes financiers internationaux (FMI et Banque mondiale) et par l'administration publique une source majeure, presque exclusive, d'information. Destinés et réservés aux seuls décideurs publics, mais circulant toutefois sous le manteau, ces données acquièrent aux yeux des chercheurs une valeur particulière fondée sur leur caractère «confidentiel». Il faudra attendre le rapport de la Banque mondiale en 1995 sur la *Stratégie d'assistance pour le Maroc* (Banque mondiale, 1995) dont le Roi Hassan II avait autorisé la diffusion au parlement et dans le public pour voir cette «littérature grise» sortir de la confidentialité.

La composante théorique se trouve dès lors réduite à la portion congrue et certains travaux de thèse semblent s'apparenter davantage à des rapports d'expertise privilégiant, à l'instar de ces derniers, une démarche en termes de diagnostic, d'évaluation et de propositions de solutions. La cohérence théorique et méthodologique propre à l'orthodoxie économique, *en creux* dans les rapports des institutions financières internationales, laisse ainsi la place à une recherche *sans qualités théoriques*, presque dépourvue de pertinence et sans effet de connaissance.

(ii) Une démarche inductive. Contrairement à la méthode déductive fondée sur l'intuition et la formulation d'hypothèses, qui va des principes aux conséquences, la démarche empirique procède de l'observation des faits pour remonter à l'élaboration théorique et repose par conséquent sur le principe, dû à Newton, de «Je ne fais pas d'hypothèses». De ce fait, la réplique par les doctorants du plan de thèse en deux parties «théorique» et «empirique» peut se traduire par une disjonction de l'analyse, la revue de littérature devenant dans certaines thèses une sorte d'inventaire «à la Prévert» des différentes théories sans cohérence entre ces dernières et la partie empirique et sans distance critique par rapport à leur pertinence.

L'analyse empirique prend trois formes dans les travaux de thèse : une description d'ordre général prenant appui sur les données statistiques disponibles; une étude de cas ayant pour objet soit une organisation (entreprise privée, établissement public, administration, etc.), soit un secteur, soit un territoire local ou régional; enfin une enquête qualitative par questionnaire ou entretien auprès d'un échantillon plus ou moins important. De fait dans un pays comme le Maroc où l'économie demeure largement «sous-statistique» et où les données factuelles, les indicateurs et les séries longues sont à la fois insuffisants et poreux, la production de données qualitatives à partir de l'investigation du terrain constitue une alternative et un passage obligé pour les chercheurs. Cependant, en l'absence - comme on le verra - de structures collectives de recherche et de moyens appropriés, le complément d'information qualitative que les chercheurs sont en mesure d'apporter ne peut être que limité, fragmentaire et par conséquent sans effet de connaissance recherché. Cette situation objective, ajoutée aux faibles incitations associées à la recherche, n'est évidemment pas sans incidences sur le contenu scientifique de l'investigation empirique, les résultats de l'enquête s'avérant dans la plupart des travaux peu significatifs et - ainsi qu'il sera précisé plus loin - peu probants en raison des déficiences méthodologiques inhérentes au dispositif d'enquête. De surcroît, les difficultés matérielles, qui ne sont pas moins réelles, engendrent une dispersion dans le temps de l'observation empirique débouchant sur un déphasage entre les questionnements de départ et les réponses apportées à l'issue du travail thèse.

(iii) Un double autisme. La durée moyenne d'une thèse (plus de dix ans) est en effet à l'origine du décalage à la fois épistémique et cognitif observé entre objet de recherche (sujets et thèmes) et cadre théorique mobilisé d'une part, questionnements de recherche et contexte économique national et international d'autre part, etc.

En effet, au moment où le «modèle standard étendu» (Favereau, 1989) a reconfiguré son logiciel théorique par rapport aux nouveaux enjeux économiques, au Maroc rares sont les travaux de thèse, soutenus au cours des années 1980-1995, qui font référence aux nouvelles élaborations d'obédience orthodoxe (coûts de transaction, relation d'agence, droits de propriété, asymétrie de l'information, etc.) ou s'apparentant à l'hétérodoxie (théorie de la régulation, économie des conventions).

Ce phénomène d'*autisme contextuel* de la recherche par rapport à son objet qui, à partir du milieu des années 1980, se double d'un *autisme fonctionnel* en termes de contenu de la formation par rapport aux débouchés, c'est-à-dire au marché du travail, autisme que traduit- on l'a déjà précisé- la montée du chômage des jeunes diplômés.

(iv) Une orientation éclectique et sectorielle. L'approche empirique et la méthode inductive correspondent à un recentrage thématique sur des sujets moins macro-économiques et plus sectoriels (tableau 4). Les politiques d'emploi, de logement, d'éducation et de formation, etc. sont désormais abordées notamment dans leur redéploiement territorial (régional et local). De même les problématiques à caractère théorique et général, comme le choix libéral, la mondialisation, la privatisation, l'endettement extérieur, etc. sont davantage traitées eu égard à leurs «implications» sectorielles commerciales ou financières.

L'analyse sectorielle (notamment l'industrie textile et l'agro-industrie) procède, explicitement ou implicitement, de l'approche en termes de modèle de promotion des exportations à l'œuvre dans la théorie standard et tente d'explorer, en relation avec les objectifs du Plan 1973-1977 d'abord et du PAS par la suite, les perspectives d'insertion de l'économie nationale dans le régime international. L'analyse descriptive met en jeu les performances sectorielles eues égard aux contraintes liées au système de protection douanière d'une part, aux enjeux du démantèlement tarifaire dans le cadre des accords de libre-échange d'autre part.

Les effets liés à la mise en œuvre du PAS, notamment sur l'emploi et le logement, vont faire l'objet de travaux mettant en évidence la détérioration en longue période des indicateurs sociaux et l'émergence de phénomènes nouveaux de chômage structurel (en particulier des jeunes diplômés à partir du milieu des années 80), d'économie informelle, d'habitat insalubre, de pauvreté rurale et urbaine, etc. Toutefois, force est de constater que la plupart des travaux concluant à un lien de causalité entre la dégradation ainsi observée des paramètres sociaux et l'application du PAS ne se fondent pas sur démarche économétrique en termes de régressions établissant de façon formelle de telles corrélations. Par inférence, les déséquilibres constatés dans le domaine social sont imputés au PAS et pris pour des effets négatifs des politiques de libéralisation économique. Ce même type d'inférence, on le retrouve dans les analyses qui, à l'inverse des précédentes, tentent de mettre en exergue l'impact positif du PAS et de l'ouverture sur les performances économiques.

Les travaux dédiés au secteur privé sont portés par le processus de privatisations enclenché à la fin des années 80. Comme sur les autres sujets, la problématique est abordée en termes descriptifs, c'est-à-dire en articulant les différentes données factuelles et statistiques aux objectifs de la politique de privatisation et aux indicateurs de performance des entreprises. La perspective micro-économique et la tendance à l'exploration de l'entreprise comme objet de recherche va prendre appui sur la politique de «mise à niveau» lancée par les pouvoirs publics au milieu des années 90 sous l'impulsion de l'Union européenne (programme MEDA). L'enjeu managérial et organisationnel de la «mise à niveau» fera l'objet de questionnements dont la multiplication au sein des facultés des sciences juridiques, économiques et sociales (facultés de droit) d'options, puis de filières de gestion va favoriser le traitement en se référant davantage aux techniques et outils de gestion qu'aux principes de la théorie économique. La bifurcation vers la gestion, opérée d'abord par les écoles supérieures de commerce et de management privées, va trouver dans le processus de privatisation et de mise à niveau des entreprises un principe de justification et de valorisation des modalités de formation spécialisée et professionnalisante correspondant au cycle Master au détriment du doctorat.

Tableau 3. Une trajectoire empirique articulant problématiques sectorielles et éclectisme analytique

Thème	Paradigme	Contexte	Références
<i>Choix libéral et mondialisation</i> - implications financières... - ... et commerciales	- Théorie des anticipations rationnelles - Nouvelle économie classique - Néo-institutionnalisme - Critique interne du <i>Consensus de Washington (Insiders)</i>	- Reaganisme et Thatcherisme - Programme d'ajustement structurel - Décennie perdue pour le développement - Crises financières et bulles spéculatives	- Friedman (1962) - Barro (1997) - Lucas (1972) - Solow (1963) - Williamson (1994) - North (2005) - Aoki (2001) - Stiglitz (2002)
<i>Secteur privé et entreprise</i> - stratégies - prise de décision - étude de cas	- Nouvelles théories des firmes : coûts de transaction, principal/agent, droits de propriété, asymétrie de l'information	- Capitalisme managérial... - ... puis actionnarial - Délocalisations et sous-traitance au sein des pays en développement	- Coase (1937); - Williamson (1994); - Commons (1934) - Berle et Means (1932) - Galbraith (1967) - Tirole (1995)
<i>Education-Formation-Emploi</i> - Coût, rendement et financement - Secteur informel	- Théorie du capital humain - Théorie du déséquilibre - Hystérésis du chômage	- Persistance du chômage de masse - Crise de la relation éducation-emploi - Informalisation économique au sein des PVD	- Becker (1964), - Benassy (1984) - Malinvaud (1980)
<i>Développement territorial</i> - Politique urbaine - lutte contre le logement insalubre - politiques de financement du logement social	- De l'approche en termes d'espace... - ... à l'économie des territoires (district industriel, systèmes productifs localisés, etc.)	- Crises urbaines dans les pays avancés - Extension des bidonvilles dans les pays en développement	- Marshall (1890) - Lipietz (1974, 1977) - Castells (1977) - Aydalot (1976) - Garofoli (1981) - Courlet, Pecqueur (1992)

2.3. Une bifurcation en termes de gestion

L'engouement des étudiants pour les formations de gestion remonte au début des années 80, avec la première crise structurelle de la relation éducation-formation-emploi au Maroc. Plus de 100 000 diplômés en chômage au total ont été recensés en 1991 par le Conseil National de la Jeunesse et de l'Avenir (CNJA), institution *ad hoc* créée précisément pour réfléchir sur les déterminants d'une telle inadéquation et faire des propositions de mesures en faveur de l'emploi des jeunes. Limitées par les politiques restrictives du PAS, les modalités classiques d'emploi dans l'administration publique doivent trouver un substitut au sein du secteur privé qui, dans un contexte d'ouverture et de libéralisation, doit bénéficier d'un environnement plus favorable et plus incitatif.

(i) L'employabilité par la gestion. Le diagnostic établi par le CNJA (1991, 1992) fait d'abord état d'un phénomène d'inadéquation entre d'une part le système éducatif et de formation et d'autre part le système productif. Le premier, trop général et trop théorique, offre des profils peu demandés par le marché de l'emploi en général et les entreprises privées en particulier. L'université est directement visée, les formations qu'elle dispense en particulier dans les sciences sociales et humaines (lettres, droit, économie) ne correspondent plus aux besoins du secteur privé, les diplômés ayant de faibles compétences sont désavantagés sur le marché du travail par les profils issus des écoles de gestion et de management dont l'employabilité est, par ailleurs, renforcée par une meilleure maîtrise des langues étrangères et de communication. Quant au second - le secteur productif - il est, selon l'analyse du CNJA, caractérisé par des structures organisationnelles trop traditionnelles et des formes de gestion trop archaïques sécrétant des rigidités en termes d'emploi des diplômés et déterminant une préférence pour la main-d'œuvre non qualifiée et bon marché.

(ii) L'attractivité de l'entreprise. Ce diagnostic est corroboré par une montée en puissance de l'entreprise dans l'économie nationale favorisée d'abord par le recentrage opéré par le PAS sur le secteur privé (années 80), puis renforcée par le programme de mise à niveau de l'entreprise (années 90). L'appel du marché de l'emploi dans le domaine de la comptabilité, du marketing, de la finance, de la communication, etc. s'est traduit par l'ouverture d'options «gestion» et «management» au sein des anciens programmes, à contenu généraliste, de licence en sciences économiques. Montées dans l'improvisation et sans recrutements spécifiques, l'enseignement de la gestion et du management dans les universités a été dès le départ défini dans une finalité «pratique» et «professionnalisante», comme une réponse immédiate aux besoins immédiats de l'entreprise marocaine, cette dernière devant subir une concurrence internationale sans précédent. De fait, la structure *domestique* et archaïque de l'entreprise nationale au niveau notamment de ses modes de gestion et de management (El Aoufi, 2002) met en évidence une demande importante et croissante de profils de diplômés en gestion que la réforme du troisième cycle en 1997 (DESA et DESS) d'abord, et le système LMD en 1999 ensuite vont s'efforcer de satisfaire en multipliant les filières et les enseignements dédiés à la gestion. Toutefois, il y a lieu de noter que, compte tenu des limites structurelles et organisationnelles des PME, les niveaux différentiels en termes de rémunération, de conditions de travail et de possibilités de carrière définissent un double marché de l'emploi : un marché *domestique* pour les diplômés Bac plus 2 et licence proposés par l'université nationale, régulé par l'ANAPEC (Agence nationale pour l'Emploi et les Compétences) et centré sur les postes intermédiaires

et à qualifications moyennes. Un second marché plus sélectif et plus incitatif réservant les postes de direction et de «top management» aux lauréats des grandes écoles de commerce et d'ingénieurs étrangers.

La pertinence de ces marchés « émergents », en termes de demande de formation, n'a pas eu cependant pour corollaire la définition d'un champ spécifique à la recherche en gestion.

(iii) Des recherches entre économie et management. Les formations en gestion mises en place au sein des universités à partir des années 90 ont été pour la plupart organisées et enseignées par des économistes qui, notamment à l'occasion du lancement des licences appliquées, se sont « convertis » en gestionnaires. De fait les premiers travaux de recherche (mémoires de DESA et thèses de doctorat) sont fortement marqués par une double ambivalence théorique et méthodologique, les problématiques comme les approches, les instruments d'analyse et les techniques d'investigation se situant dans un entre-deux champs (économie/gestion) ne pouvant déboucher que sur des résultats de recherche mitigés et peu rigoureux.

Dans une telle configuration, les liens épistémiques étroits qui existent entre le champ des sciences économiques et celui des sciences de gestion sont ignorés au profit de «bricolages» faibles, empiriques et qualitatifs, sur le terrain comme objet de recherche.

2.4. L'enquête qualitative ou la découverte du terrain

Les recherches, en économie et/ou en gestion, ont tendance à articuler les méthodes quantitatives et qualitatives. A l'opposé des premières -voir *infra*-, les secondes posent davantage un problème d'outils que de système d'information. En effet, bien plus que les difficultés d'accès au terrain, ce sont les dispositifs utilisés dans l'enquête qualitative qui semblent en limiter la portée et la pertinence.

(i) Le terrain à découvrir. Les approches macroéconomiques prédominantes dans les années 60 et 70 avaient tendance à privilégier - on l'a vu - à la fois les références théoriques et les sources documentaires. En revanche les inflexions thématiques observées à partir de la décennie 90 vers les niveaux microéconomiques (les organisations en général et les entreprises en particulier) mettent en jeu des méthodes d'investigation empiriques utilisant les techniques d'enquête. La découverte du terrain par les économistes constitue un pas vers le pluralisme méthodologique et vers la testabilité des hypothèses théoriques de recherche. En retour, la prise en compte de la «réalité concrète» implique le recours à des complémentarités entre les différentes approches et méthodes des sciences sociales. Toutefois, bien que l'enquête qualitative soit d'usage récent dans les travaux de thèse en économie, l'examen de quelques uns de ces derniers fait ressortir, outre les difficultés d'accès au terrain, des problèmes internes aux protocoles et dispositifs mis en œuvre.

(ii) Un dispositif d'enquête inadapté. L'accès au terrain et les phénomènes de rétention de l'information constituent certes un facteur de découragement pour les chercheurs universitaires, notamment pour les doctorants. En dépit d'un desserrement relatif constaté depuis quelques années, l'administration publique comme les entreprises privées demeurent largement fermées aux demandes d'enquête émanant des chercheurs. Deux raisons peuvent être avancées :

- La première a trait aux *dispositions* des organisations marocaines à gérer les demandes d'enquête (sélection en fonction des besoins, suivi, etc.). Si le recours régulier aux diagnostics organisationnels et aux audits stratégiques fait partie des outils de management moderne et contribue à définir les «bonnes pratiques» pour les grandes organisations (publiques et privées), les PME et les entreprises familiales en particulier ne sont guère en mesure ni de définir leurs besoins en termes d'enquêtes, ni de tirer profit des résultats de celles-ci en raison précisément de leurs limites organisationnelles.
- La seconde raison tient au *dispositif* d'enquête lui-même. En effet, parce qu'il procède souvent d'un modèle standard, le questionnaire s'avère, une fois mis en œuvre, en décalage avec le terrain. Dans certains travaux de DESA, le même questionnaire est administré aux entreprises de l'échantillon d'enquête sans prise en compte des différentiels de taille, de statut, de nature de l'activité. De même, le niveau de représentativité de l'échantillon peut être disqualifiant pour l'extrapolation et la généralisation des résultats obtenus. Même le choix méthodologique d'un «échantillon raisonné» peut déboucher dans certains travaux sur des conclusions pour le moins discutables, l'échantillon «raisonné» devenant au fil de l'enquête, sous la contrainte des moyens, un échantillon «contingent» et «casuel».

Les compétences de l'enquêteur constituent un autre facteur de limitation : en l'absence de formation dédiée aux techniques d'enquête, les doctorants, se «débrouillant» sur le tas, peuvent confondre questionnaire (fermé et ouvert) et guide d'entretien expliquant en partie les comportements de refus de la part des entreprises de remplir le questionnaire ou de se prêter au jeu de l'entretien.

Au total, ces problèmes de protocole méthodologique et de dispositif d'enquête ne sont sans se traduire par des biais analytiques et des insuffisances en termes de pertinence des résultats et des conclusions.

(iii) Enquête versus sondage. La technique d'enquête par questionnaire, de loin la plus utilisée dans les travaux de thèse, renvoie à la nature des questionnements et, au-delà, à l'*épreuve* de l'enquête et à la *posture* de l'enquêteur.

Les questionnements correspondent à des objectifs définis par rapport aux hypothèses de recherche et à la problématique de la thèse. Elles doivent subir dans le questionnaire un traitement en termes de dé-conceptualisation et de traduction dans le langage commun et professionnel des personnes enquêtées. Dans la même optique, les réponses recueillies ne sont pertinentes d'un point de vue analytique que dans la mesure où, en retour, elles ont fait l'objet d'une restitution en termes conceptuels et théoriques. Dans la plupart des travaux (notamment de DESA), les dissonances cognitives entre les *postures* respectives de l'enquêteur et de l'enquêté sont attribuées au mode d'administration sans médiations du questionnaire.

Il importe de souligner que l'enquête est irréductible au questionnaire binaire ou à réponses multiples qui peut s'avérer être un instrument approprié dans les sondages d'opinion et dans des applications propres aux marchés comme le marketing. L'*épreuve d'enquête* se définit par rapport à d'autres modalités complémentaires faisant usage de registres d'investigation plus complexes et permettant d'articuler les données et les informations, de les croiser, de les vérifier, bref d'organiser le champ de l'interprétation

et de l'analyse. C'est en effet une telle configuration de l'enquête, à la fois extensive et intensive, qui est susceptible d'apporter une valeur ajoutée qualitative, fine et subtile, à la démarche canonique de l'analyse économique fondée sur la quantification des grandeurs, la formalisation des relations et la modélisation économétrique.

2.5. L'usage marginal des mathématiques

L'analyse des « implications » (« effets », « incidences » et « impacts ») des politiques de stabilisation, d'ajustement, de privatisation ou de libéralisation est- on l'a dit- entachée d'un biais méthodologique : les relations ne sont guère explicitées et les causalités établies demeurent la plupart du temps hypothétiques, non démontrées formellement. Il faut dire que la part de la modélisation économétrique demeure le parent pauvre de la recherche en sciences économiques. Peut-on attribuer cela au contenu de la formation en sciences économiques qui serait dominé par la composante « littéraire » au détriment des mathématiques, des statistiques et de l'économétrie? Quel rapport avec les conditions de production de l'économie quantitative (ou de l'économie mathématique)? Quelle pertinence les modèles économétriques ont-ils eu égard à la réalité économique et quelle place prennent-ils dans le processus de décision publique?

(i) Une formation de base peu capitalisée. Le faible recours à la modélisation économétrique ne peut être attribué à la formation : avant la réforme comme depuis la mise en œuvre du système L/M/D, l'enseignement des matières quantitatives (statistiques, mathématiques, économétrie, etc.) offre aux étudiants le niveau d'exigence requis pour l'exercice de la modélisation économique. Si en revanche le nombre de thèses en économétrie demeure relativement peu significatif, il convient de s'interroger sur l'ensemble des conditions de production de la connaissance formalisée, ou sur les principes qui fondent ce qu'on définira plus loin comme un « régime de recherche », c'est-à-dire un processus cumulatif et créatif fondé sur les « compétences » existantes et sur la « convergence » et la « complémentarité » des travaux de recherche au sein d'une discipline.

En effet, les quelques spécialisations concentrées dans quelques établissements d'enseignement supérieurs (INSEA) et universitaires (quelques filières isolées de troisième cycle à Casablanca, Marrakech et Rabat), et ayant pour débouchés le Haut-Commissariat au Plan et le ministère des Finances, la part de la recherche doctorale, ne sont guère articulées entre elles et, en l'absence de revues spécialisées, leurs productions ne circulent pas et ne donnent pas lieu à des confrontations.

(ii) La porosité des données. Les limites de la modélisation tiennent en grande partie au système d'information. Les méthodes économétriques permettent de vérifier l'existence de relations supposées (prédiction) entre des phénomènes économiques, de les quantifier à partir de données réelles et de les confronter avec la réalité (spécification).

Les données observées (séries temporelles, données en coupe instantanée, données de panel) relatives aux relations fonctionnelles caractéristiques de l'économie nationale présentent des porosités rendant difficile toute quantification temporelle à intervalles réguliers des variables observées. De même la dimension individuelle des données en coupe instantanée renvoie à des problèmes complexes liés aux qualités spécifiques et singulières des individus. Ces difficultés ne sont guère moins insurmontables dès lors que la variable représente les valeurs prises par un échantillon d'individus à intervalles réguliers.

Outre la disponibilité des séries chronologiques longues, les variables mesurées en termes nominaux ou en termes réels posent dans le cas du Maroc le problème de l'indice de prix approprié et de la base de raccordement statistique (Billaudot, 2005). Les imperfections relatives aux types de données ne sont pas, dans ce contexte, sans effets sur la robustesse des spécifications et sur la fiabilité des résultats de la formalisation et de la modélisation comme peuvent en témoigner les quelques rares travaux réalisés, non exhaustifs, portant sur «la formalisation de la croissance et du développement économique»; «l'approche économétrique de l'offre de monnaie»; «l'analyse multivariée du marché du travail»; «le taux d'imposition marginal effectif»; «l'analyse coûts-bénéfices appliquée à l'éducation». Sur un autre plan, les limites de la modélisation tiennent à la prégnance de la rationalité au sein des comportements des agents.

(iii) La rationalité limitée des agents. De fait, dans un pays comme le Maroc où les comportements individuels et collectifs sont performés par la nature *composite* de l'économie et de la société (Pascon, 1967; El Aoufi, 2000) et où les intentions des agents sont rarement révélées, tout exercice d'appréhension des logiques d'action stratégique à partir d'une application de la théorie des jeux est vouée à la prédiction pure, en raison précisément des limites de la rationalité économique et des valeurs d'efficience et d'efficacité, limites imposées, non seulement par l'asymétrie de l'information, mais dans beaucoup de situations par des formes altruistes de coopération fondées sur les principes de don/contre-don (El Aoufi, Hollard, 2004; Guerrien, 2002).

Toutefois, si les défauts et les imperfections du marché constituent une donnée persistante, il n'est pas moins vrai que les choix publics sont indécidables sans l'apport de la modélisation macro-économique.

(iv) Des choix publics peu éclairés par les modèles. Si la décision publique est d'abord le résultat d'un processus délibératif et d'un compromis négocié entre les acteurs, elle doit être instruite et fondée sur une connaissance précise des fonctionnements institutionnels et réels de l'économie, de ses enjeux, de la configuration des acteurs, du contexte international, etc. Mais si une telle connaissance dépasse le cadre de l'expertise technique, il n'en demeure pas moins que l'usage de la formalisation et le recours à la modélisation sont pleinement justifiés dès lors que les choix et les arbitrages sont déterminés, en dernière instance, par les enjeux politiques, la hiérarchie des besoins et par la complémentarité des actions.

Au Maroc, la modélisation est peu présente dans la détermination des politiques publiques. Les multiples diagnostics établis, de façon récurrente, par les organismes financiers internationaux (Banque mondiale, FMI, PNUD, Union européenne) sur «les politiques et perspectives d'ajustement à moyen terme», les «priorités pour l'investissement du secteur public», «l'impact de la libéralisation sur l'ajustement commercial et industriel», «les enjeux du secteur privé», les «potentiels en emploi», «l'évaluation d'impacts de l'accord d'association Maroc-Union européenne sur l'économie marocaine», etc. sont le fruit de modélisations plus ou moins élaborées. Force est de constater, cependant, que la plupart des «préconisations» induites de ces exercices ainsi que les maintes tentatives de construction d'un modèle d'équilibre général calculable (départements du Plan et des Finances) ou de simulation de mécanismes d'enchères en économie expérimentale (Hollard *et ali.*, 2005) ont débouché sur des résultats pour le moins mitigés.

Références bibliographiques

- Althusser L. (1965), *Pour Marx*, Maspero, coll. «Théorie», Paris.
- Amin S. (1970), *L'accumulation à l'échelle mondiale*, Anthropos-Paris/Ifan-Dakar.
- Amin S. (1973), *Le développement inégal*, Editions de Minuit, Paris.
- Aoki M. (2001), *Fondements d'une analyse institutionnelle comparée*, A. Michel, Paris, 2007.
- Ayache A. (1956), *Le Maroc. Bilan d'une colonisation*, Editions sociales, Paris.
- Aydalot P. (1976), *Dynamique spatiale et développement inégal*, Economica, Paris.
- Banque mondiale (1995), *Stratégie d'assistance pour le Maroc. Education et formation au XXI^{ème} siècle. Questions relatives à l'administration marocaine*, Octobre.
- Barro R. (1997), *Determinants of Economic Growth: A Cross-Country Empirical Study*, Cambridge, Mass., MIT Press.
- Belal A. (1966), *L'investissement au Maroc (1912-1966) et ses enseignements en matière de développement*, Les Editions Maghrébines, Casablanca, 1980.
- Belal A. (1980), *Développement et facteurs non économiques*, Editions du BESM, Rabat.
- Benamour A. (1968), *Intermédiation financière et développement économique du Maroc*, Les Editions Maghrébines, Casablanca, 1971.
- Berle A. et Means G.C. (1932), *The Modern Corporation and Private Property*, Cmoorce Clearing House, New Y ork.
- Berrada M. G. (1968), *L'entrepreneur marocain, une élite de transition*, Thèse d'Etat, Université de Bordeaux, Faculté de Droit et de Sciences économiques.
- Billaudot B. (2005), «La dynamique macro-économique de l'économie marocaine (1986-2003)», *Critique économique*, n° 15, Hiver-printemps.
- Castells M. (1977), *La question urbaine*, Maspero, Paris.
- Cherkaoui M. (2009), *Rapport d'évaluation de la recherche en sciences sociales et humaines*, Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique, Rabat.
- CNJA (1991), *L'insertion des jeunes diplômés. Programme d'urgence*, Rabat.
- CNJA (1992), *Emploi des jeunes en milieu rural*, Rabat.
- Coase R. (1937), «La nature de la firme», *Revue française d'économie*, Paris, 1987.
- Commons J. R. (1934), *Institutional Economics. Its Place in Political Economy*, New Brunswick & London, Transaction Publishers, 1990, 2 vol.
- Courlet C., Pecqueur B. (1992), «Les systèmes industriels localisés en France : un nouveau modèle de développement», in Benko et Lipietz eds, *Les régions qui gagnent*, PUF, Paris.
- Debernis G.D. (1966), «Industries industrialisantes et contenu d'une politique d'intégration régionale», *Economie Appliquée*, Tome XIX.
- Debernis G.D. (1971), «Les industries industrialisantes et les options algériennes», *Revue Tiers-Monde*, n° 47.

- El Aoufi N. (2008), « Economie : un état des recherches » in M. Cherkaoui, *l'Enquête sur l'évaluation du système national de la recherche dans le domaine des sciences humaines et sociales*, Ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur, de la Formation des cadres et de la Recherche scientifique, 2009.
- El Aoufi N., herzenni A., Bensaid M. (2005), «Croissance économique et développement humain» (2005), *50 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025*
- El Aoufi N. éd. (2000), *L'entreprise côté usine. Les configurations sociales de l'entreprise marocaine*, Editions du GERRHE, Coll. «Enquêtes», Rabat.
- El Aoufi N. (1992), *La régulation du rapport salarial au Maroc*, Editions de la Faculté des sciences juridiques, économiques et sociales, Rabat, 2 vol.
- El Aoufi N. (1990), *La marocanisation*, Editions Toubkal, Casablanca.
- El Aoufi N. et Hollard M. (2004), “Les relations professionnelles au Maroc : violence et justification”, *Critique économique*, n° 12, Hiver- Printemps (en collaboration avec Michel Hollard)
- El Malki H. (1973), *Surplus économique et développement*, Cujas, Paris.
- Emmanuel A. (1969), *L'échange inégal. Essai sur les antagonismes dans les rapports économiques internationaux*, François Maspero, Paris.
- Favereau O. (1989), «Marchés internes, marchés externes», *Revue économique*, n° 2, Mars.
- Frank A. G. (1967), *Capitalisme et sous-développement en Amérique latine*, François Maspero, Paris, 1968.
- Freyssinet J. (1966), *Le concept de sous-développement*, Mouton, Paris
- Friedman M. (1973), *Money and Economic Development*, New York, Praeger Special Studies in International Economics and Development.
- Friedman M. (1962), *Prix et théorie économique*, Economica, Paris, 1983.
- Furtado C. (1961), *Développement et sous-développement*, PUF, Paris, 1966.
- Galbraith J. K. (1967), *Le nouvel Etat industriel*, Gallimard, Paris, 1968.
- Galissot R. (1964), *Le patronat européen au Maroc, 1931-1942*, Editions Techniques Nord-Africaines, Casablanca.
- Gannagé E. (1969), *Financement et développement*, PUF, Paris.
- Gannagé E. (1962), *Economie du développement*, PUF, Paris.
- Garofoli G. (1981), «Lo sviluppo delle aree periferiche nell'economia italiana degli anni 70», *L'industria II*, n 3, p. 391-404.
- Guerrien B. (2002), *La théorie des jeux*, Economica, Paris.
- Gutelman M. (1974), *Structures et réformes agraires*, Maspero, Paris.
- Hirschman A. O. (1958), *Stratégie du développement économique*, Editions ouvrières, Paris, 1964.
- Hirschman A. O. (1970), *Exit, Voice and Loyalty*, Cambridge Mass., Harvard University Press.

- Hollard Michel dir. (1994), *Génie industriel : les enjeux économiques*, PUG, Grenoble.
- Hollard M. *et ali.*, (2005), «L'impact de l'information *Made in Morocco* sur le consommateur. Un essai d'économie expérimentale», *Critique économique*, n° 15, Hiver-printemps, p. 51-69.
- Kaldor N. (1962), *the Role o Taxation in Economic Development*, Wien.
- Keynes J.M. (1936), *La Théorie générale de l'emploi, de l'intérêt et de la monnaie*, Payot, Paris.
- Kuhn T. (1970), *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris, 1972.
- Lambert B. (1970), *Les paysans dans la lutte des classes*, Seuil, Paris.
- Laroui A. (1974), *La crise des intellectuels arabes; Traditionalisme ou historicisme ?* Maspero, coll. «Textes à l'appui/philosophie», Paris.
- Laroui A. (1980), *Les origines sociales et culturelles du nationalisme marocain (1830-1912)*, Maspero, coll. «Textes à l'appui», Paris.
- Leontieff W. W. (1966), *Input-Output Economics*, New York, Oxford University Press.
- Lévy-Strauss C. (1955), *Tristes tropiques*, Plon, Paris.
- Lewis W. A. (1955), *La théorie de la croissance économique*, Payot, Paris, 1967.
- Lipietz A. (1974), *Le tribut foncier urbain*, Maspero, coll. «Economie et socialisme», Paris.
- Lipietz A. (1977), *Le capital et son espace*, Maspero, coll. «Economie et socialisme», Paris.
- Lucas R. (1972), «Econometric Testing of the Natural Rate Hypothesis», in Eckstein O. éd., *The Econometrics of Price Determination*, Washington D.C., Board of Governors of the Federal Reserve System.
- Mc Kinnon R.I. (1973), *Money and Capital in Economic Development*, Washington, Brookings Institution.
- Malinvaud E. (1980), *Réexamen de la théorie du chômage*, Calmann-Lévy, Paris.
- Malinvaud E. (1996), «Pourquoi les économistes ne font pas de découvertes», *Revue d'économie politique*, n°106 (6).
- Marshall A. (1890), *Principes d'économie politique*, Gramma, Paris, 1971.
- Marx K. (1867), *Le Capital*, Editions sociales, Paris, 1960.
- Mendras H. (1976), *Sociétés paysannes. Eléments pour une théorie de la paysannerie*, A. Colin, Paris.
- Miège L. (1961), *Le Maroc et l'Europe, 1930-1894*, PUF, Paris.
- Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur, de la Formation des Cadres et de la Recherche Scientifique, Direction des Sciences, *Rapport d'activités 2006-2007*.
- Myrdal G. (1957), *Théorie économique et pays sous-développés*, Présence Africaine, Paris.
- North Douglas C. (2005), *Le processus du développement économique*, Editions d'organisation, Paris.

- Nurkse R. (1967), *Les problèmes de la formation du capital dans les pays sous-développés*, suivi de *Structures du commerce international et développement économique*, Cujas, Paris, 1968.
- Oualalou F. (1969), *L'assistance étrangère face au développement*, Les Editions Maghrébines, Casablanca.
- Pascon P. (1977), *Le Haouz de Marrakech*, Rabat.
- Prebisch R. (1950), *The Economic Development of Latin America and its Principal Problems*, New York, Nations-unies.
- Rey P.-R. (1976), *Les alliances de classes*, Maspero, Coll. «Textes à l'appui», Paris.
- Rostow W. W. (1960), *Les étapes de la croissance économique*, Seuil, Paris, 1962.
- Salama P. (1973), *Un procès de sous-développement*, Maspero, Paris.
- Secrétariat d'Etat chargé de la recherche scientifique (2007), *Enquête nationale sur le potentiel scientifique et technique*
- Secrétariat d'Etat chargé de la recherche scientifique (2002), *Recherche scientifique. Bilan 1998-2002*.
- Secrétariat d'Etat chargé de la recherche scientifique, direction des sciences (2007), *Rapport d'activité 2006-2007*.
- Sen A. (1987), *Ethique et économie*, PUF, Paris, 1993.
- Schlenker J.-M. (2005), «De quoi manque la recherche fondamentale en France?», Notes, La République des Idées, Paris, Novembre.
- Singer H. W. (1975), *the Strategy of International Development. Essays in the Economic Backwardness*, Macmillan, London.
- Solow R. M. (1963), *Théorie du capital et taux de rendement*, Dunod, Paris, 1970.
- Stiglitz J. (2002), *La grande désillusion*, Fayard, Paris.
- Terrasse H. (1949), *Histoire du Maroc : des origines à l'établissement du Protectorat français*, Editions Atlantide, Casablanca.
- Terrasse H. (1949), *Histoire du Maroc des origines à l'établissement du Protectorat français*, Éditions Atlantides, Casablanca; réédition Éditions Frontispice, Casablanca, 2005.
- Tirole J. (1995), *Théorie de l'organisation industrielle*, Economica, Paris, 2 vol.
- Waast R. (2002), *Evaluation du système de recherche scientifique et technique au Maroc* (à paraître aux éditions Publisud, Paris, 2008).

L'évolution de la science géographique au Maroc : de la connaissance scientifique de l'espace et de la société à l'engagement dans l'effort de développement

Mohamed BERRIANE
Membre correspondant
Académie Hassan II des Sciences et Techniques

La géographie en tant que discipline scientifique universitaire relevant du large champ des sciences humaines et sous sa forme moderne a commencé à se mettre en place au Maroc dès le début du siècle dernier puisque les premières recherches géographiques publiées dans la Revue de Géographie du Maroc remontent à 1916. De cette date à nos jours, la Géographie est passée au Maroc par différentes phases et a répondu à différents objectifs.

Science auxiliaire de la pénétration coloniale, elle a préparé celle-ci et l'a accompagné grâce à un travail d'exploration et de reconnaissance systématique des grands ensembles de reliefs et des territoires occupés par les différentes tribus. Des noms comme G. Hardy et J. Célerier (1933) ont marqué cette époque et des analyses détaillées ont été consacrées à cette Géographie du début du siècle (Naciri, 1989). Méthode d'analyse des relations de l'homme avec son espace, elle est utilisée dès les premières années de l'indépendance pour préparer des actions de développement. Il faut, en effet, rappeler ici, que dès 1957, des géographes comme Couleau (1957) ou Joly (1960) étaient sollicités par le Ministère de l'Economie Nationale de l'époque pour proposer des découpages du Maroc permettant à l'administration d'alors de mener des enquêtes socio-économiques en bonne et due forme. Discipline d'éveil, elle occupe une place de choix dans le cursus de l'enseignement primaire et secondaire en accompagnant le processus d'identification de l'élève à son pays et à sa société.

Mais, outre sa capacité à générer un savoir scientifique académique et à participer à la connaissance du pays et de la société, la Géographie à l'état pur ou associée à l'Aménagement du territoire a également des retombées indéniables sur le développement. Elle s'impose comme tel à travers ses questionnements et thématiques se rapportant aux rapports qu'entretient l'homme avec son environnement à différentes échelles (le local, le régional et le national) et par ses méthodes d'approche faisant largement appel à un travail de terrain qui descend à la plus petite échelle, obligé qu'elle est de créer de l'information originale à petite échelle car l'information statistique n'est disponible qu'agrégée au niveau des grandes unités administratives. Elle l'est également par ses investigations qui combinent de plus en plus le quantitatif et le qualitatif et qui font appel et de façon systématique aux Nouvelles Technologies de l'Information et ses analyses où le travail empirique se conjugue de plus en plus à des approches relevant du systémique.

Par tous ces aspects la science géographique se focalise aujourd'hui sur la notion d'espace et de ses dynamiques. Or, qui dit espace et distribution spatiale des faits de nos jours, pense à environnement, aménagement, développement, gestion de l'espace, territorialisation qui sont toutes des questions d'actualité et des notions qui renvoient aux préoccupations actuelles du Maroc et des Marocains. Préoccupations tournant autour de mots d'ordres tel que maîtrise et gestion de l'environnement, gestion et développement au niveau local, développement durable, aménagement du territoire, aménagement et gestion de la ville, etc.

Elle a de tout temps entretenu des relations étroites avec des disciplines voisines, notamment les Sciences Humaines et Sociales et parfois les limites entre la Géographie et ces Sciences sont peu nettes. Ceci s'explique entre autre par le glissement de la recherche géographique vers le paradigme du changement. Or, on le sait les questions du changement et du développement ne sont pas spécifiques à la Géographie et se trouvent au carrefour des disciplines des SHS.

L'importance de cette position peut être illustrée de façon remarquable par les rapports qu'entretient la Géographie avec l'**Aménagement du Territoire** ou la problématique de l'Environnement. Aujourd'hui, Géographie et Aménagement du Territoire se confondent aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau de la pratique quotidienne et les études, recherches et expertises commandées par l'Administration à propos de l'Aménagement du Territoire ne peuvent plus se faire sans la participation des géographes.

Faire un état des lieux des avancées récentes des sciences géographiques et de l'aménagement du territoire au Maroc, passe obligatoirement par un rappel des thématiques classiques pour ensuite saisir les pistes de renouvellement de la discipline. A cette fin, nous avons dépouillé et analysé les thématiques traitées par un corpus de 900 thèses soutenues dans les universités française et marocaines, 350 mémoires soutenus à l'Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme et 500 articles de fond publiés par la Revue de Géographie du Maroc entre 1962 et 2006 ainsi que 21 projets de recherche soutenus financièrement par le CNRST.

1. Les thématiques relevant des champs classiques et le sensible renouvellement de ces thématiques

A l'examen des thématiques abordées par cette recherche académique on relève une certaine diversification des thèmes, en relation étroite avec l'évolution générale du pays. Nous suivons ici les classifications classiques de la discipline en trois grandes spécialités : la Géographie physique (Géomorphologie, Climatologie - Hydrologie et Biogéographie), la Géographie humaine (Population, Géographie rurale, Géographie urbaine, Géographie régionale, Migrations et relations villes - campagnes) et la Géographie économique (différents secteurs économiques) en leur ajoutant un quatrième ensemble que nous pouvons appeler «nouvelles thématiques» et qui regroupe tout ce qui se rapporte à l'aménagement, l'urbanisme et la planification spatiale, mais aussi l'environnement, l'eau et l'assainissement, le patrimoine, la santé, la télédétection et les SIG.

Avant d'analyser les principaux apports par grandes thématiques abordées par cette recherche, soulignons la sensible évolution dans les thématiques.

1.1 Les thèmes classiques

Au cours d'une période qui va en gros de 1941 à 1999, nous relevons la prédominance des thèmes classiques de la Géographie académique.

- Notons tout d'abord l'importance accordée au milieu naturel avec une dominance de la géomorphologie classique. Dès le départ cette spécialité s'impose à l'époque coloniale et ce qui s'en suit comme travaux d'exploration et de reconnaissance du territoire. Celui-ci va être couvert d'une série de thèses (surtout des Thèses d'Etat) par grandes régions naturelles. Ces grandes thèses portant sur des régions délimitées selon des critères naturelles étaient toutes accompagnées d'un lourd matériel cartographique de qualité. Aujourd'hui, même si sa part relative a sensiblement baissé, la géomorphologie est encore fortement présente avec toutefois des mutations profondes dans ses thèmes. La climatologie et la biogéographie accompagnaient la géomorphologie à la fois pour comprendre le modelé des reliefs et mettre en évidence les rapports entre les fluctuations climatiques et la production agricole et la vie en milieu rural.
- La Géographie humaine occupait la tête du classement et ce pour des raisons évidentes. Les études consacrées au milieu rural se sont développées avec une grande cadence traduisant les problèmes que vivaient les campagnes marocaines au cours des années 1980. En corrélation avec les transformations du milieu rural, le Maroc connaît, comme on le sait, une explosion urbaine qui se traduit par la multiplication des études urbaines. Les thèmes les plus souvent abordés révèlent la récurrence des préoccupations de l'époque. Mécanismes de la croissance urbaine, habitat non régulier, économie urbaine, périphéries, entités socio-spatiales, problèmes du foncier sont les thèmes qui reviennent le plus souvent. Le phénomène migratoire occupe une place de choix en raison de ses implications socio-spatiales.
- Arrivent ensuite des thèmes sectoriels tel que l'industrie y compris l'industrie minière, et l'artisanat, le tertiaire en général tel que le commerce, les services et surtout le tourisme. L'apparition de ces thèmes au fil des années traduisait l'accélération des transformations que connaissaient espace, société et économie. Mais on relève une faiblesse manifeste des travaux abordant la problématique des transports malgré les problèmes que pose ce secteur.
- Ce que nous avons appelé «thématiques sectorielles nouvelles» ne représente au cours de cette première phase que 16,8% de tous les thèmes abordés contre 46% pour la Géographie humaine au sens large (Géographie humaine plus Géographie économique) et 23,7 pour la Géographie physique. A par l'Aménagement du Territoire, l'Urbanisme et la Planification territoriale qui représentent 8,4%, tous les autres sous-thèmes identifiés sont faiblement représentés. Nous sommes toujours à la phase de la connaissance du pays selon les grands thèmes de la Géographie générale. Des préoccupations plus fines, qui collent aux nouveaux problèmes du pays, ne sont pas encore bien représentées. Pour cela il faudra attendre la seconde phase.

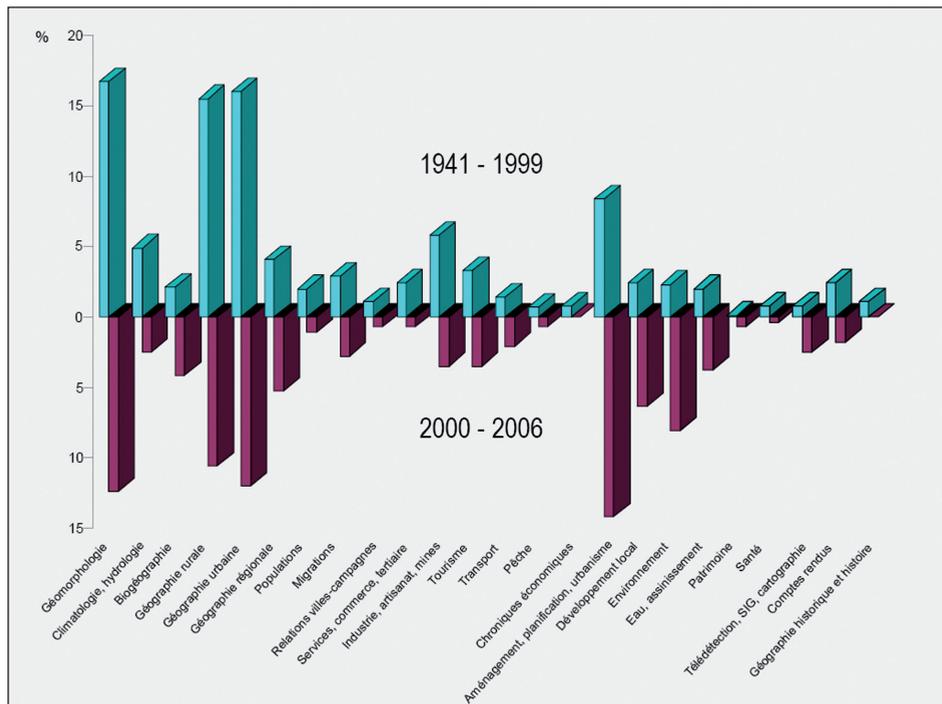


Figure 1 - Principaux thèmes abordés par la recherche en Géographie et en Aménagement (Comparaison entre les périodes de 1941 à 1999 et de 2000 à 2006)

1.2 Le renouvellement des thématiques

A partir de 2000, nous rentrons dans une seconde phase au cours de laquelle les thèmes classiques de la Géographie académique font progressivement place à de nouvelles approches et à des sujets qui accompagnent les préoccupations des décideurs.

- La part de la Géographie physique passe de 23,7 % à 19,1 %. Elle dépasse le niveau de la reconnaissance de l'espace pour adapter ses thèmes mais aussi ses outils d'analyse aux problèmes récurrents du pays.
- C'est le cas également de la Géographie humaine et de la Géographie économique, qui, prises ensemble, voient leurs parts passer de 56 % à 43 %. La Géographie urbaine et les migrations se maintiennent et les études régionales augmentent même.
- Cette baisse de la part relative des branches classiques de la Géographie se fait au profit des thématiques de l'aménagement, l'urbanisme, le développement local, l'eau et l'assainissement, etc. Seule la Géographie de la santé et les études sur le patrimoine ne connaissent pas une augmentation remarquable.

Mais le renouvellement thématique n'apparaît pas suffisamment à travers notre base de données. En effet, la recherche géographique moderne ce n'est pas seulement les thèses, les travaux académiques classiques, les mémoires de l'INAU et les articles de la RGM. Cette recherche se décline également à travers les études commandées, les projets de

recherche menés dans le cadre de la coopération internationale et les programmes de soutien inaugurés récemment par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

Si on se limite aux travaux de recherche menés dans le cadre du PARS et du PROTARS, l'inventaire des thèmes ayant reçu un financement permet de tirer quelques enseignements.

Relevons tout d'abord que le fait que ces programmes de recherche ne relèvent pas de la recherche académique devant déboucher sur un diplôme ouvre de grandes perspectives quant à la diversification des thématiques. Ceci est tout à fait évident dans la mesure où le choix du sujet d'une thèse passe obligatoirement par la nécessité de son insertion dans un des domaines de spécialisation académique. Lorsque cette thèse est inscrite dans un laboratoire d'une Université française, le sujet doit s'inscrire dans le projet de recherche de ce laboratoire. Un projet de recherche libre mais soutenu financièrement peut aborder des thématiques qui se libèrent de cette contrainte mais qui traduisent les préoccupations du moment. C'est ainsi que les 21 projets retenus pour financement offrent un éventail de thématiques plus large et des sujets plus pointus (Tableau 1). On note :

Tableau 1 - Principaux thèmes de la recherche financée par le CNRST en Géographie et en Aménagement

Thématique	Nombre de projets	Part en %	Financement total	Financement moyen par projet
Environnement	5	23,8	581.000	116.200
Téledétection - SIG - Cartographie	4	19,0	734.500	183.625
Aménagement - Gestion territoriale et gouvernance	3	14,3	444.112	148.037
Tourisme - Loisirs	3	14,3	804.600	268.200
Migrations	2	9,5	201.000	100.500
Développement local	2	9,5	471.500	235.750
Transport - mobilités	2	9,5	415.450	204.725
Total	21	100,0	3.652.162	173.912

Source : CNRST

- L'importance des études que l'on peut classer dans la rubrique environnement et développement durable;
- Elles sont suivies par celles qui relèvent de la cartographie avec une importance particulière accordée à la cartographie automatique et aux Systèmes d'Information Géographique;
- Suivent ensuite les thématiques traitant de l'aménagement, du tourisme, des migrations, développement local et du transport.

Cela démontre donc l'importance de l'appui financier à la recherche. Ce dernier lui permet de se libérer des contraintes académiques, de coller davantage aux problèmes de l'heure et partant d'accompagner les efforts de développement. Cependant, on ne peut que souligner la faiblesse numérique de ces recherches soutenues. L'effort à accomplir dans ce sens est encore considérable, surtout si on compare ce bilan à celui des sciences exactes largement avantagées par ces programmes de soutien. Ceci ne devrait pas poser des problèmes financiers insurmontables dans la mesure où le financement de ces projets relevant de ces disciplines ne mobilise pas des sommes considérables. Le budget moyen par projet de deux à trois ans tourne autour de 174.000 DH, ce qui n'est pas excessif.

Le renouvellement des thématiques passe aussi par les études commandées qui font émerger une géographie appliquée et une recherche - action. De par ses préoccupations spatiales, la géographie a toujours été sollicitée - et elle l'est de plus en plus - dans le cadre des études commandées. Ses interventions sont spécialement recherchées dans tout ce qui relève de la production des outils d'aménagement à toutes les échelles, des études d'impact et d'environnement, et généralement les études socio-économiques. Là aussi, il est aujourd'hui impossible de se faire une idée sur toutes les interventions des géographes dans ces types d'études. Mais on peut dire sans risque d'erreur qu'aujourd'hui il n'y a pas un SDAU, un SDAR, un SNAT ou une étude d'aménagement en général pour lesquels l'équipe ne comporte pas de géographes et de cartographes.

Ces derniers sont sollicités soit du fait de leur spécialisation poussée sur tel ou tel espace, objet de l'intervention, et ce suite à une longue pratique du terrain et la connaissance intime qui s'en suit, ce qui est un grand atout, soit du fait de la maîtrise de telle ou telle technique comme la cartographie par exemple. Mais le plus souvent c'est la pratique courante des enquêtes socio-économiques qui les rend incontournables. Il y a là un lien étroit et indéniable entre la recherche d'un côté et le développement de l'autre.

Ce qu'on peut cependant déplorer c'est que ces liens entre la recherche géographique et le développement ne soient pas organisés et institutionnalisés. En effet, les chercheurs de l'université sont sollicités à titre individuel et personnel sans que cela ne se fasse dans le cadre des équipes en place ou des universités. Il est de ce fait urgent, que responsables et commanditaires des études d'un côté et autorités universitaires de l'autre mettent en place des mécanismes pour intégrer ce travail de consultation et de prestation de services dans le cadre des missions de l'université. Il serait notamment souhaitable que d'un côté les bureaux d'études recrutent de jeunes chercheurs à plein temps et que de l'autre l'intervention des universitaires se fasse également à travers l'Université en tant qu'organisme prestataire de services. Ceci profiterait à la fois à la recherche en général qui se donnerait ainsi les moyens dont elle a besoin et à la formation et ce grâce à l'insertion des étudiants avancés et des jeunes chercheurs dans les études et la recherche appliquée et contribuerait à l'enracinement de l'université dans son milieu.

Cette descente de la Géographie dans la sphère publique, qui a quitté l'Université pour aller à la rencontre des besoins de développement a connu son apothéose lors du débat national sur l'aménagement du territoire au cours duquel des géographes universitaires, souvent jeunes chercheurs, on pu se mobiliser pour organiser et animer pour le compte du Ministère de l'Aménagement du territoire, des ateliers locaux et des forums régionaux.

1.3. Une couverture incomplète du territoire

Afin de cerner le taux de couverture du territoire national par les travaux de recherche en Géographie et en Aménagement, nous avons relevé de façon systématique lors du dépouillement de la littérature produite, les régions étudiées. A cette fin, le Maroc a été découpé en grandes régions géographiques selon des critères classiques mais utilisés le plus souvent par la majorité des géographes¹. Par ailleurs et pour des analyses fines, nous avons également noté pour chaque étude le lieu précis (ville, ou région de la ville). Ceci nous permettra d'indiquer avec précision les lieux les plus étudiés, mais surtout de cerner les espaces peu ou pas investis par la recherche dans un but de formuler des propositions pour l'orientation des futures recherches.

Une intéressante évolution dans le temps dans le choix des terrains d'étude

La confrontation de la figure 2 qui détaille la répartition géographique des études et recherches menées entre 1941 et 1979 et la figure 3 qui traite de la même variable mais pour la période 1980 à 2006, permet de souligner tout d'abord une intéressante évolution dans le choix des terrains d'étude². Les priorités spatiales ont semble-t-il changé au cours du temps.

• Au cours de la première période (1941 - 1979) : une répartition des travaux dans l'espace relativement équilibrée

Au cours de cette période, 32 % des travaux sont consacrés au Maroc dans son ensemble sans localisation géographique. Le reste, soit 68%, concerne pratiquement toutes les régions du Maroc Nord avec une répartition assez équilibrée. La part des régions les plus étudiées tourne entre 7 et 8%. Seul certaines régions marginales (Haut Atlas oriental, Anti Atlas, Souss) sont sous représentées. Nous sommes au cours de cette période dans la phase de la reconnaissance et l'exploration du pays. Les thèses et les recherches essaient de couvrir l'ensemble du territoire (figure 2).

• Au cours de la seconde phase (1980 - 2006) : une concentration des travaux sur certaines régions et sites

A partir de 1980 et en rapport avec la marocanisation généralisée de la recherche, on remarque une forte tendance à la concentration sur certaines régions (figure 3). La part du Maroc atlantique grimpe de 8,7% à 24,0%, celle des plaines du Gharb et du Saïs de 7,2% à 10,2%. En même temps apparaissent de nouvelles régions qui n'étaient pas étudiées auparavant comme les oasis ou le Sahara. Mais dans l'ensemble la tendance est à la focalisation des recherches sur les sites les plus dynamiques. Après la phase de la reconnaissance la recherche effectue des zooms sur les espaces du Maroc occidental pour y déceler les structures fines de son organisation.

1. La problématique des découpages régionaux est l'un des points forts de la recherche en Géographie et nous y reviendrons plus loin. Au lieu de travailler sur un découpage basé sur des critères sophistiqués, nous avons préféré retenir un découpage très classique, même si nous n'adhérons pas à ce découpage.

2. Pour affiner l'analyse, nous avons scindé la longue période 1941-2006 en deux, en plaçant la limite entre les deux périodes en 1980. Le choix de cette date se justifie par un point de rupture correspondant à 1980, année à partir de laquelle la production du savoir géographique sur le Maroc sera le fait avant tout des Marocains.

Il faut cependant souligner que ce changement d'échelle ne se fait pas sans déséquilibres, avec d'un côté des espaces sur étudiés et de l'autre des zones d'ombres. Le bilan qui se dégage de cette évolution et en tenant compte de la totalité de la production se présente comme suit :

- L'essentiel de la production, soit 79 %, est régionalisée et traite de différents espaces. Le Maroc est pratiquement couvert dans sa totalité par les résultats des recherches disponibles. Seules sont encore pas ou peu couvertes les provinces sahariennes, les revers sud des Atlas et le Haut Atlas oriental;
- Mais cette couverture est très inégale. Le Maroc atlantique concentre à lui seul presque le $\frac{1}{4}$ des investigations. Cela peut s'expliquer aisément car ce centre économique-politique du système spatial marocain est le siège des mutations les plus profondes et les plus accélérées. Il est évident qu'il polarise l'intérêt des chercheurs. Il est suivi, mais de loin, par l'ensemble Rharb - Saïss et ce, nous semble-t-il, pour les mêmes raisons. Arrivent ensuite les plaines intérieures, le Maroc nord (Péninsule tingitane), l'Oriental et le Moyen Atlas;
- On note également une très forte concentration des études sur quelques régions. Les six premières régions indiquées plus haut, concentrent à elles seules pratiquement 60 % des thèses, mémoires et articles. Les 40 % restants se dispersent dans le reste du Maroc.
- En descendant à une échelle d'analyse plus fine, on remarque que les études réservées aux villes arrivent en tête. Pratiquement toutes les catégories de villes (petites villes, villes moyennes et grandes agglomérations) sont couvertes et ce sur tout le territoire national. Cependant, il y a là aussi une très forte concentration des études sur les grandes villes ainsi que sur l'axe urbain atlantique. Des agglomérations comme Casablanca ou Rabat-Salé se taillent la part du lion dans cette répartition. L'axe atlantique entre Kénitra et Casablanca concentre à lui seul 48,2 % des thèses, mémoires et articles consacrés au Maroc atlantique, alors que les deux agglomérations de Rabat-Salé et du Grand Casablanca sont accréditées de 39 % de cette masse d'informations.

Cette tendance à travailler sur les mêmes régions, si elle se justifie par le poids socio-économique des régions les plus étudiées relevant du centre, aboutit à deux effets pervers.

- Le premier renvoie à la redondance dans le choix des sujets, redondance qui devient inévitable en raison de la multiplication des recherches sur les mêmes sites. En nous limitant aux seules thèses de l'Université, on constate que le nombre de thèses consacrées respectivement aux principales villes et régions suivantes se présente ainsi : 53 thèses pour Casablanca et sa banlieue, 44 pour Rabat et sa région, 36 pour Fès, 25 pour le Tadla et son périmètre irrigué, 22 pour Marrakech, 17 pour Meknès et 14 pour le Rharb. Quelle que soit la richesse des problématiques et des évolutions accélérées nécessitant des renouvellements des approches sur le même site, le nombre de thèses est tellement élevé qu'on ne peut éviter les répétitions. La dispersion des lieux de soutenance des thèses et l'absence totale d'un minimum de coordination entre les universités françaises et les universités marocaines, expliquent les répétitions de sujets déjà étudiés, voire des plagia et des reprises sans aucun contrôle. Ces pratiques relevées dans plusieurs cas réduisent de façon

sensible l'intérêt scientifique de cette masse de thèses produites jusqu'à maintenant. Aujourd'hui, si la baisse considérable du nombre des thèses soutenues en France peut annoncer la disparition de ces pratiques, la généralisation des soutenances de thèses aux différentes universités marocaines nécessite la mise en place de façon urgente d'un fichier des thèses centralisé pour éviter les répétitions et d'une procédure de coordination entre les différentes universités.

- Le second concerne les espaces périphériques, qui, s'ils sont menacés par une marginalisation certaine, notamment suite à la mondialisation qui favorise les métropoles, présentent aussi un très fort intérêt scientifique, parce qu'ils sont le siège de mutations insoupçonnables, du fait même de cette mondialisation qui les connecte directement aux métropoles internationales sans relais national (effets des migrations et tourisme international) et sont aussi le siège d'un retour du local très intéressant à observer. C'est le cas notamment de la montagne qui, malgré son poids et son importance géographiques n'a attiré qu'une infime partie des chercheurs (le Haut Atlas ne représente que 4,3% de cette production et l'Anti Atlas 1,3%) et des oasis (Draa et Tafilalet ensembles) qui ne bénéficient que de 3,2% ce qui est loin de traduire leurs intérêt socioculturel. Ces espaces en marge du Maroc moderne méritent de ce fait toute l'attention des chercheurs.

Dans l'ensemble et compte tenu du fait que la discipline géographique et de l'aménagement est fortement spatialisée, il serait souhaitable de tracer une stratégie nationale, soit au niveau de l'instance étatique qui gère la recherche, soit au niveau des instances de coordination des Universités, qui, entre autres, devrait orienter la recherche en Géographie et en Aménagement vers les espaces et sites non encore étudiés ou faiblement étudiés.

A cet effet et en s'appuyant sur les cartes précédentes qui analysent la répartition géographique actuelle des travaux de recherche, on peut proposer quelques pistes. Une grande partie du Maroc nord allant de la péninsule de Tanger au Nord jusqu'aux pieds des Atlas vers le Sud et à la frontière algérienne vers l'Est est étudiée de façon satisfaisante car elle a bénéficié d'un grand nombre de thèses et de publications. Au nord, cette région prend en écharpe un îlot moyennement étudié et qui correspond au Rif central et oriental ainsi qu'au Pré Rif. Vers le Sud on rencontre une seconde zone moyennement étudiée et qui correspond au Haut atlas occidental et central et à la plaine du Souss et ses bordures. Les zones d'ombres peu ou pas étudiées couvrent les provinces sahariennes, tout l'Anti Atlas, le Haut Atlas oriental, les oasis du Draa et du Tafilalet. Ici un effort particulier doit être fourni car ces zones sont extrêmement intéressantes à étudiées mais posent l'inconvénient d'être difficilement accessibles.

2. Essai de bilan : les grands thèmes porteurs

Revenons maintenant aux sujets les plus abordés dans un souci de dégager les grands thèmes porteurs, les questionnements majeurs et les évolutions. De l'analyse des thèmes qui ont été le plus abordés au cours des décennies précédentes par la recherche en Géographie et en Aménagement, on peut tirer les enseignements suivants.

2.1 Les points faibles

Reste que des sous-thèmes qui renvoient à ces grands thèmes sont encore négligés ou timidement abordés. Ils sont cependant d'une grande importance pour le développement économique et social. Il s'agit de tous les domaines qui relèvent de ce que l'on appelle la géographie sociale et culturelle, la géographie économique et l'aménagement. Plusieurs thèmes sont encore insuffisamment prospectés. Citons en quelques uns :

- La géographie de la santé que ce soit en milieu urbain ou rural ne représente dans l'ensemble de cette production scientifique que 0,8% des références retenues et sa part a même baissé au cours de la seconde phase à partir de 2000. Seules 7 thèses ont traité des rapports entre santé et espace ; elles se répartissent à part presque égale entre la France (4 thèses) et le Maroc (3 thèses). C'est là un sérieux manque dans la mesure où l'étude épidémiologique est intimement liée à l'environnement et aux interactions avec l'espace et la société.
- Les problèmes de transport, notamment intra urbain interpellent de plus en plus gestionnaires et aménagistes et la plupart des études commandées par les collectivités locales ou les administrations centrales se font sans spécialistes marocains. Or, sous d'autres cieux, la Géographie du transport, et les études d'aménagement et de gestion des flux et réseaux participent activement aux débats que suscitent ces activités. Manifestement, les transformations accélérées que connaît le Maroc dans ces domaines avec notamment la densification des réseaux autoroutier et ferroviaire, l'étalement considérable que connaissent les villes, d'où les problèmes de transport, les grands projets d'implantation de systèmes de transport moderne, le développement des ports de nouvelles générations, le développement du tourisme de masse et son corollaire le transport aérien de masse, n'inspirent pas les chercheurs alors que le besoin est pressent. Un effort considérable et urgent est à fournir en encourageant des recherches dans ce domaine.
- Les études portant sur le patrimoine occupent la dernière place et se limitent à quelques inventaires d'un patrimoine pris dans son sens le plus étroit. Or, on le sait le processus de patrimonialisation occupe une place primordiale dans l'évolution du Maroc d'aujourd'hui. Rappelons que patrimonialiser un bien ou un savoir c'est lui donner du sens. Une construction quelconque (ou une pratique culturelle ou artisanale) ne peut être considérée en soi comme un élément patrimonial. Elle ne peut revêtir un caractère patrimonial que par rapport à sa valeur esthétique dans un paysage, sa technique de construction ou son lien avec l'histoire locale. Ce bien particulier une fois patrimonialisé, devient un bien commun avec une valeur collective d'où la nécessité de l'adoption d'une démarche participative dans ce processus. Or, aujourd'hui et par le biais du tourisme, de la mondialisation et le mouvement d'acquisition de vieilles demeures par des résidents étrangers, le processus de patrimonialisation et le patrimoine en général méritent une attention particulière.
- Les problèmes relevant de la gouvernance et de la gestion des territoires reviennent de temps en temps en filigrane dans différentes études et thèses. Mais on manque cependant de travaux systématiques et dédiés à ces thèmes. Une Géographie électorale, par exemple, est totalement absente au Maroc. La gestion des collectivités locales et la gouvernance (notamment l'épineux problème de la gestion des déchets urbains)

sont encore sous-étudiées. De même que le processus d'invention des territoires ou de re-territorialisation et son rôle essentiel dans le développement. L'analyse du rôle des élites et des acteurs locaux et l'identification de leurs logiques et stratégie d'action, bien que présente, ne sont pas suffisantes.

- L'analyse des entités socio-spatiales, des territoires en gestation et des remodelages régionaux avec notamment la question d'actualité des découpages des régions institutionnelles est quasi absente sauf au niveau de quelques réflexions de synthèses.
- Se sont là des axes qui ont des retombées directes sur le développement, si on admet que l'homme reste au centre de toute action de développement. La connaissance de la réalité socio-culturelle des populations concernées est désormais indispensable pour toute intervention visant un développement quelconque.

2.2 Les thèmes porteurs et leurs évolutions

Arrivé à ce stade de l'analyse, il est temps de dégager les principaux apports des 65 années de recherche en Géographie et en Aménagement à travers les principaux thèmes porteurs de cette géographie marocaine. Ici nous ne nous limitons pas aux seules thèses, articles de la RGM et mémoires de l'INAU, mais nous tiendrons compte également des résultats de quelques projets de recherche soutenus par le CNRS et par le partenariat international, ainsi que de quelques ouvrages phares dans le domaine (voir liste en annexe).

La Géographie physique et les dynamiques environnementales

Passée la phase de la reconnaissance et de la connaissance des grands ensembles physique, la Géographie physique, et plus particulièrement la Géomorphologie, est progressivement passé de la description des faits à la quantification pour comprendre les processus en faisant appel, outre à l'observation du terrain, méthode classique, aux techniques les plus poussées d'inventaire et d'analyse, bousculant même parfois des chercheurs d'autres disciplines qui pensent détenir la démarche scientifique. Par moment ses relations avec des disciplines proches comme les sciences du sol deviennent tellement étroites qu'il y a chevauchement des domaines d'intérêt.

Elle s'est donc orientée progressivement vers la dynamique environnementale à travers l'analyse des formations superficielles et des sols. Actuellement la tendance de la recherche est à l'interprétation dynamique des phénomènes, grâce aux progrès dans l'expérimentation, l'instrumentation des petits bassins versants, pour le suivi dans le temps et l'espace de la dynamique du ruissellement et de l'érosion. De gros efforts de recherche ont été fournis dans la connaissance des processus et des mécanismes de leur déclenchement (Laouina, 2002). Ces travaux ont permis de cerner avec précision les effets du défrichement et du développement de cultures diverses, du surpâturage et des prélèvements du bois et des autres ressources végétales et de manière générale les effets de la pression anthropique. Face à des incertitudes qui persistent, d'autres travaux sont en cours de lancement.

Ce souci environnemental qui donne à la Géographie physique un nouveau souffle, ne se limite pas uniquement aux ressources naturelles et au milieu rural. Il se projette

aussi, bien que timidement vers la ville, suite aux risques naturels qui touchent de plus en plus certaines agglomérations urbaines. Glissements de terrains, effondrements des habitations, dynamiques des ravins urbanisés, actions sismiques, pollutions hydrique et hydrogéologique et atmosphérique sont des phénomènes qui interpellent de plus en plus média et gestionnaires de nos villes. La Géographie physique s'y intéresse en tirant partie de ses méthodes d'analyse globales synthétisant tous les paramètres physiques et anthropiques des processus et ce à différentes échelles. Des inventaires exhaustifs des différents types de risques naturels, leurs processus et facteurs génétiques sont confrontés aux analyses des différentes interventions en termes d'aménagement et des perceptions que la population se fait de ces interventions. Ils permettent d'imaginer des actions s'inscrivant dans le cadre d'aménagement et de gestion des risques.

D'autres sous-thèmes porteurs se déclinent ici et là : la désertification, les dynamiques des littoraux, les ressources en eaux, etc.

Au-delà de la production d'un savoir qui doit se renouveler en fonction des mutations des espaces et des sociétés, la Géographie physique marocaine contribue désormais aux efforts nationaux pour engager un développement durable effectif.

La connaissance des sociétés rurales : le paradigme du changement et le déterminisme culturel

Les études rurales ont également dépassé le stade de la connaissance et de la compréhension du milieu rural, ses conditions et genres de vie pour passer à des paradigmes plus subtils. Le changement paradigmatique décisif a été le passage des approches essayant de saisir l'objet de l'étude, conçu comme étant du domaine du statique, à des approches orientées vers les phénomènes dynamiques inscrits dans une logique du changement constant. De ce fait la pratique de la recherche en milieu rural a de plus en plus porté sur la description et le diagnostic du changement, l'analyse des processus du changement et éventuellement la prédiction du changement (Bencherifa, 2002). La question du développement, découlant de celle du changement a imposé des questions relatives à l'utilisation des ressources et à la durabilité de cet usage, au rapport au développement humain, etc. Les systèmes explicatifs, enfin, ont tendance à privilégier les liens entre le développement et la culture des populations qui le conduisent et qu'il affecte. Bien que polémique, voire politiquement incorrecte, la question du déterminisme culturel dans le développement rural a été posée de façon frontale et pour comprendre les évolutions observées dans différents milieux tel que les montagnes ou les oasis.

La connaissance de la ville et des sociétés citadines

La recherche sur les villes marocaines est déjà riche d'une longue tradition qui remonte à l'étude des processus d'urbanisation sous l'administration coloniale. Mais c'est à propos des politiques urbaines du Maroc indépendant que la recherche a donné une abondante production. Le domaine est assez largement dominé par les géographes (67 % des thèses soutenues sur la question urbaine sont le fait de géographes³), alors que les

3. A. Rachik, (2005), Bilan des études et recherches urbaines au Maroc : 1980 - 2004.

approches transdisciplinaires sont rares. Les nombreuses et multiples interventions de l'État dans le champ urbain depuis la deuxième moitié de la décennie 1970 (notamment en multipliant la réalisation des outils de planification urbaine) et l'augmentation rapide du taux d'urbanisation avec notamment l'urbanisation non réglementaire des périphéries expliquent l'augmentation du nombre de thèses et de travaux de recherche consacrés à la question urbaine.

Deux grands chantiers ont mobilisé la recherche dans un premier temps : les politiques de réhabilitation de l'habitat et de résorption des bidonvilles et la décentralisation opérée depuis la charte communale de 1976 donnant aux collectivités locales des prérogatives en matière de gestion urbaine. De ce fait, les travaux de cette époque sont plus descriptifs qu'analytiques et traitent de thèmes découlant des deux grands chantiers indiqués plus haut : explosion démographique, processus d'urbanisation, mécanismes et formes de croissance des villes, habitat non réglementaire, densifications et évolutions fonctionnelles des médinas, petites villes, etc. On s'arrête ensuite sur les activités à la fois formelles (industrie, commerce, tourisme) ou informelles et sur les acteurs de cette urbanisation en privilégiant cette fois l'analyse et la problématisation.

Si pendant cette période le travail était plutôt individuel et n'impliquait pas des équipes, depuis l'an 2000, et grâce notamment à des programmes de recherche financés par les programmes internationaux (PRUD - FSP), la situation change progressivement. S'inscrivant dans des appels d'offres qui s'adressent à un travail collectif, des équipes se mettent en place et s'ouvrent à un échange avec des chercheurs des pays du nord, le tout accompagné d'une dimension comparative avec ce qui se passe dans d'autres pays du Sud. Les thématiques se diversifient et cadrent de plus en plus avec les évolutions sociales, politiques et économiques du pays. Organisé autour du thème «Gouvernement urbain, acteurs et pouvoirs locaux», le PRUD, par exemple, mobilise 250 chercheurs appartenant à 20 pays et développe 11 projets de recherche au Maroc. Ainsi une production de connaissances nouvelles sur la ville marocaine commence portant sur les configurations d'acteurs associés aux nouvelles logiques d'intervention sur les villes. On y parle de gouvernance urbaine, d'acteurs privés, de l'évolution du «local», des rapports des habitants aux territoires urbains, de la délégation au privé des services de base, d'espaces urbains fragmentés, autant de termes qui attestent d'un renouvellement des problématiques⁴.

La recherche action : Géographie appliquée - Aménagement et gestion des territoires

Comme indiqué en introduction, Géographie et Aménagement ont de tout temps été liés. Cependant, avant même que l'Aménagement du territoire n'apparaisse comme discipline à part entière, la recherche en Géographie était portée vers l'action et s'investissait à répondre à des commandes émanant des décideurs. Dès le début des années 1960, une réflexion avait été engagée autour de ce qu'on appelait à l'époque «la Géographie appliquée» et en 1962, un colloque dédié à la Géographie appliquée est organisé à Rabat. Les deux premiers numéros de la RGM, ancienne série, rendirent compte des travaux de ce colloque. Les thèmes qui furent abordés étaient en avance sur leur temps : expériences

4. De Miras C. (coordination), (2003) - Intégration à la ville et services urbains au Maroc, Pub. INAU

de géographie appliquée, géomorphologie appliquée à la pédologie, au reboisement, à la stabilisation des versants et à l'hydraulique agricole, présentations d'expériences de géographie appliquée, découpage du Maroc en régions homogènes, recherches géographiques appliquées à la planification régionale, géographie et planification urbaine, cartographie appliquée, etc.

En fait, dès le départ et jusqu'à nos jours, il est pratiquement impossible de faire une séparation nette entre une recherche géographique fondamentale et une recherche géographique appliquée. Outre le fait que les résultats de la recherche fondamentale sur espaces et sociétés trouvent des applications immédiates et sont souvent mis à profit par des stratégies pour lesquels ils n'étaient pas destinés⁵, la géographie a très tôt eu à répondre à des commandes émanant de différents donneurs d'ordre. Dès les premiers mois de l'Indépendance, le Ministère de l'Economie Nationale marocain a mis à contribution les géographes français du protectorat qui n'avaient pas encore quitté le Maroc.

Par la suite et depuis le milieu des années 1970, les géographes sont constamment impliqués dans la production des outils d'aménagement et de planification (SDAU, SDAR, SNAT, etc.). Il faut cependant souligner que cette implication se fait en dehors de l'Université puisque les géographes sont recrutés en tant que consultants et ce à titre individuel.

Il reste que ces interventions se basent essentiellement sur une exploitation des données produites et des méthodes mises en œuvre par la recherche fondamentale, sans que ne se dégage une géographie appliquée à part entière avec ses questionnements propres et ses méthodes appropriées. Cela commence à s'esquisser depuis la fin des années 1990, suite à la mise en place du gouvernement de l'alternance et la création qu'un ministère de l'aménagement du territoire qui a intégré parmi ses cadres de nombreux géographes ayant fait leurs preuves dans la recherche fondamentale. A la faveur du débat national sur l'aménagement du territoire (2000) et du lancement de nombreux chantiers de réflexion et de production d'outils d'aménagement, notamment le SNAT, la Direction de l'Aménagement du Territoire a associé des géographes à des économistes et à des professionnels internationaux de l'aménagement du territoire, le but de ce chantier étant l'élaboration d'une politique d'aménagement où géographie, aménagement du territoire et économie spatiale sont mis à contribution. Les axes de cette recherche opérationnelle et pluridisciplinaires sont nombreux et attestent de l'importance des questionnements en jeu. Ils tournent autour des schémas régionaux d'aménagement et de développement, de la compétitivité des territoires, les aires métropolitaines, certains milieux spécifiques comme les oasis ou le littoral et les Agendas 21. Autant de thèmes où Géographie et Aménagement s'entrecroisent, s'interpénètrent pour qu'enfin de compte ne faire qu'une seule et unique matière.

Les mouvements de la population : de l'étude de la migration internationale à l'étude de la mobilité transnationale

44 thèses en Géographie ont été consacrées au thème de la population dont 29 à l'émigration internationale. Mais en plus des thèses académiques, plusieurs travaux, notamment des

5. La formule d'un ouvrage de Yves Lacoste «La géographie ça sert à faire la guerre», prend ici tout son sens.

projets de recherche internationaux ont été dédiés à ce phénomène. En effet, l'émigration internationale est l'un des thèmes qui intéresse le plus les pays européens, et ce pour des raisons évidentes, il se prête donc au partenariat international dans le montage de projets de recherche et la coopération avec des pays comme l'Allemagne, la France, l'Italie et de plus en plus l'Espagne est très présente. Dans le traitement de ce thème, la recherche géographique a été intimement liée à l'évolution du phénomène.

Pendant longtemps l'essentiel des recherches portait sur les effets des migrations internationales sur les régions de départ avec en premier lieu, le milieu rural, premier foyer des départs, puis la ville, suite à la diffusion du phénomène sur tout le territoire national. Concernant les retombées sur les régions d'origine de la migration, l'intérêt des chercheurs s'est dès le départ focalisé sur les transferts et leurs utilisations, les effets sur la croissance urbaine et notamment la micro-urbanisation, la production du logement, l'animation du marché foncier et immobilier, la distribution de revenus non négligeables venant s'injecter dans les économies locales et dynamiser quelque peu les activités économiques par le biais de la demande des familles d'émigrés et les conséquences sur les comportements de consommation.

S'il y a unanimité autour des effets dynamisants de l'émigration sur le milieu urbain, il y a désaccord sur leurs impacts en milieu rural et les inter-relations entre la migration et les processus de changements agricoles dans les zones de départ. Deux thèses s'opposent. La première conclue aux effets négatifs ou peu innovants en milieu rural. Selon cette thèse la migration internationale entraîne le dépeuplement de certaines campagnes qui se vident de leurs forces vives, ce qui se traduit par un abandon des terres qui étaient autrefois bien exploitées ; par ailleurs les remises d'argent suffisent juste aux familles restées sur place à survivre et lorsqu'elles sont importantes, elles ne s'investissent que dans des secteurs peu productifs. On peut en effet relever ces effets de l'émigration sur de nombreuses régions comme le Rif central et oriental. La seconde thèse insiste, par contre, sur l'effet contraire. Dans ce cas l'émigration permet à des populations rurales de se maintenir dans des milieux peu favorables, grâce justement aux remises des émigrés. Ceci est l'élément explicatif principal pour comprendre le maintien de fortes densités rurales dans des régions au potentiel limité comme le Rif oriental, le Haut et Anti Atlas occidental au Maroc. Dans d'autres cas l'émigré peut jouer le rôle d'un vrai agent d'innovation et de développement agricole dans sa région d'origine. Il peut entreprendre d'importants investissements comme l'acquisition de terres, l'équipement des exploitations en moto pompes et autres moyens modernes et l'introduction de nouvelles cultures.

Avec la fermeture des pays européens et l'arrêt du mouvement migratoire, le processus du regroupement familial se traduit par de profondes mutations des structures démographiques et socio-professionnelles de la communauté marocaine en Europe dont le projet migratoire, temporaire au départ devient permanent. En rapport avec ces changements, les thèmes du retour ou non retour prennent de l'importance. Cependant, très vite on se rend compte que la circulation des personnes entre le Maroc et l'Europe, au lieu de se ralentir, a plutôt tendance à s'accroître et à se complexifier. Chercheurs et analystes n'hésitent plus à employer le terme de *diaspora marocain*. Cette dispersion géographique traduit également une nouvelle réalité qui renvoie à ce que l'on appelle désormais les réseaux transnationaux et la circulation migratoire. Du coup la recherche

géographique s'oriente vers des migrants qui majoritairement ouvriers au départ sont de plus en plus des commerçants et des entrepreneurs de l'import-export maîtrisant un espace économique euro méditerranéen. Actuellement les recherches les plus pointues traitent des réseaux transnationaux, des territoires nomades et de migrants qui se déplacent indifféremment d'un lieu à un autre comme alternative à l'intégration ou à l'assimilation. Le paradigme migratoire est de plus en plus délaissé pour le paradigme mobilitaire. Venant complexifier le phénomène migratoire, l'arrivée de la migration subsaharienne s'est invitée dans les débats qui s'interrogent sur le devenir du Maroc comme pays de transit ou d'immigration.

Le tourisme ou les effets d'une nouvelle activité économique

Parmi les thèmes relativement récents qui fascinent les géographes aussi bien au Maroc qu'ailleurs, figure le tourisme. Activité nouvelle et moderne, venant se greffer parfois sur des espaces à fonctionnement traditionnel, activité ayant des répercussions spatiales fortes et impliquant des mouvements de populations dans le temps et l'espace, elle ne pouvait laisser les géographes indifférents. Comme pour la question urbaine, il y a également une prédominance des géographes dans ce domaine. Cette recherche est passée par 4 grandes phases :

- La phase exploratoire du milieu de la décennie soixante au milieu de la décennie soixante-dix : encore à ses débuts, le tourisme était, comme en France, considéré comme un thème peu sérieux et a fait l'objet de quelques notes.
- Au cours de la seconde phase qui se prolonge jusqu'au milieu des années quatre-vingt, les recherches sur le tourisme augmentent au niveau des thèses surtout dans les universités françaises. D'abord limitée au balnéaire, aux effets du tourisme sur le développement local et à son inscription dans les rapports nord-sud, la thématique va être élargie à la fin de la période aux autres destinations touristiques non balnéaires et aux problèmes de l'organisation de l'espace en général. Mais dans tous les cas ne sera prise en compte que la demande du tourisme international ; la demande intérieure est considérée comme inexistante ou inintéressante.
- Au cours de la troisième phase émerge la dimension interne du tourisme. Cette nouvelle approche consistait tout d'abord à soutenir, face aux affirmations et positions de recherche occultant l'existence d'un tourisme interne au Maroc, l'idée d'une ascension spectaculaire du tourisme national. Cette nouvelle démarche supposait la mise au point de toute une batterie d'indicateurs pour évaluer cette demande qui ne figure sur aucune statistique officielle. Elle supposait également un effort explicatif qui ne se limite pas au seul phénomène de mimétisme de modèles importés de l'extérieur selon divers canaux, mais renvoie à des comportements authentiques. Enfin, l'étude du tourisme des nationaux fut considérée comme un éclairage des mutations économiques, sociales et culturelles de la société citadine marocaine (Berriane, 1992).
- La quatrième et dernière phase se continue de nos jours et connaît l'émergence de nouvelles thématiques. Après avoir traversé une véritable crise depuis la fin de la décennie quatre-vingt, le tourisme marocain connaît actuellement une reprise remarquable. Responsables et professionnels du tourisme ont appuyé cette reprise par une politique volontariste basée certes sur la relance du produit balnéaire, mais

aussi sur des essais de diversification du produit. De nouveaux produits sont lancés et la Géographie trouve un terrain fertile dans les tentatives de montage de produit de tourisme rural ou dit alternatif. La démarche et la logique n'étant plus la même que celle du développement du tourisme classique, de nouveaux travaux dans le cadre de thèses universitaires ou de projet financés, prospectent dans un domaine qui rejoint les sous-thèmes déjà mis en évidence comme le développement local, le rôle des acteurs locaux, la gouvernance et les projets de territoires.

Le remodelage territorial

Exercice géographique par excellence, la délimitation de régions à l'intérieur d'un pays a commencé avec la naissance de la géographie moderne au Maroc et depuis le début du siècle dernier, différentes propositions de découpage du pays en espaces homogènes sont régulièrement proposées. Démarche de la recherche fondamentale, le découpage régional est devenu aujourd'hui un outil de développement. Région et régionalisation sont en effet des concepts que gestionnaires, politiques, décideurs et administrateurs utilisent quotidiennement. L'apport du géographe se situe au niveau de la définition des critères de délimitation. Au niveau du Maroc les critères ont changé progressivement en même temps que la progression scientifique et les changements de paradigmes.

Dès 1922 les géographes français du protectorat vont délimiter le Maroc en se basant sur les régions naturelles. Ce critère va résister longtemps : en 1964 un ouvrage de géographie du Maroc propose une division du pays en 12 régions en s'appuyant sur les critères physiques⁶.

Les critères relevant des activités humaines seront également pris en compte. En 1952 le Maroc est à nouveau découpé selon les genres de vie des montagnards sédentaires, des plaines à économie céréalières, etc. D'autres critères relevant de la dimension humaine furent également retenus comme la région agricole ou la région tribale.

Mais les recherches récentes ont axé leurs efforts sur la délimitation de régions géographiques plus fonctionnelles, polarisées et relationnelles. Elles se basent sur des critères tel que la polarisation de l'espace par les villes, le rôle des armatures urbaines, les réseaux des villes, le potentiel économique des divers territoires, le poids démographique, les mobilités, l'encadrement administratif, les flux de circulation, etc. Sur cette base des découpages récents ont été proposés et soumis à discussion⁷. Ils sont malheureusement peu pris en compte par les techniciens et les politiques qui façonnent les découpages administratifs. Ces derniers ne retiennent pas le critère de la région géographique homogène et procèdent de différentes échelles allant de la plus petite qui est la commune à la plus grandes qui est la région institutionnelle. De ce fait, le remodelage territorial officiel ne tire aucun profit de la recherche universitaire et un grand hiatus subsiste entre la région légale et la région réelle.

6. Martin J. et aliii, (1964), *Géographie du Maroc*, Hatier, Paris et Librairie Nationale, Casablanca

7. Troin J.-F. (édit), (2002) (collaboration de Berriane M, Guittouni A., Laouina A., et Kaioua A.) - *Maroc : régions, pays, territoires*, Maisonneuve et Larose, Paris, Tariq, Rabat et sa version arabe publiée en 2006 «Le Maroc, nouvelle approche de la géographie régionale», Edition Tarik

Les outils : cartographie, SIG et télédétection

La recherche dans le domaine des sciences géographiques en particulier et des sciences de l'espace en général a hérité au Maroc d'une tradition cartographique non négligeable. Dans le domaine de la Géographie, tout d'abord, les grandes thèses des années 60 et 70 sont considérées comme des classiques en la matière et ont imposé un standard que vont suivre et améliorer celles soutenues par la suite et jusqu'à nos jours. L'Atlas du Maroc, publié par le Comité National de Géographie du Maroc, a toujours été une référence du genre. Dans les autres sciences qui traitent également de l'espace (Géologie, Aménagement, Urbanisme, etc.) la représentation cartographique occupe une place de choix.

Cette tradition sous-tend également le lancement régulier d'atlas plus ou moins spécialisés comme l'Atlas du Sebou réalisé au cours des années soixante, l'Atlas des Potentialités Touristiques établi au cours des années soixante-dix, mais malheureusement jamais publié, l'Atlas des Ressources Naturelles publié à la fin des années quatre-vingt, celui de la Médina de Fès et celui du Grand Casablanca au cours des années quatre-vingt et enfin celui d'Agadir. Au cours des dernières années, des projets d'Atlas urbains ont été menés à leurs termes, grâce à l'appui du programme PARS, mais malheureusement jamais publiés, car le soutien financier ne prévoyait pas l'édition⁸. Par ailleurs et à l'occasion d'études commandées par l'administration ou les collectivités locales, des documents cartographiques de différentes échelles et thématiques sont réalisés comme support aux analyses spatiales. Les documents réalisés par la DAT ont continué cette tradition en veillant à une cartographie de qualité.

Les chercheurs de l'Université furent toujours associés à cette production cartographique et ce selon différents cas de figures. Lorsque des travaux cartographiques sont conçus et commandés par des organismes hors de l'Université, les chercheurs universitaires sont étroitement associés à cette production, jouant parfois le rôle de coordinateurs et de pilotes et établissant l'essentiel des cartes⁹. Lorsque ces travaux participent à des réflexions relatives à l'aménagement du territoire comme les SDAU ou les SDAR, les universitaires pilotent souvent cette partie de l'étude. Dans le reste des cas cette production a été le fait des universitaires eux-mêmes, suite à des actions de coopération (Action intégrée entre l'Université de Fès et l'Université de Toulouse pour l'Atlas de la Médina de Fès et Action intégrée entre l'Université de Casablanca et l'Université de Tours pour l'Atlas du Grand Casablanca).

Quelle que soit la spécialité de la Géographie, la carte est aujourd'hui présente soit comme moyen d'illustration, soit comme outil de recherche. En Géographie physique la carte d'inventaire est un précieux outil pour l'analyse des dynamiques des milieux. Concernant les milieux urbain et rural, les cartes jouent un rôle essentiel comme outils de connaissance, de conception de plans d'aménagement ou de gestion de l'espace. Couvrant tout l'espace d'une unité géographique et traitant cet espace selon différents paramètres, elles permettent les comparaisons entre les différents lieux et leur analyse est souvent le point de départ de questionnements se rapportant aux enjeux et stratégies des acteurs du développement local. Longtemps réalisées de façon manuelle, les cartes produites par la recherche marocaine, font aujourd'hui largement appel à l'informatique et aux nouvelles techniques de l'information. C'est à partir du milieu des années 90 que ces techniques sont introduites d'abord à la

8. Atlas de Meknès, FLSH de Meknès et Atlas du Grand Rabat-Salé, FLSH de Rabat

9. Atlas des potentialités touristiques, pour le compte du Ministère du Tourisme et Atlas des Ressources Naturelles pour le compte de la DAT

FLSH de Rabat, à la faveur de projets de recherche et de formation internationaux, puis progressivement dans les autres départements. Le retard enregistré, pour des raisons essentiellement financières, est entrain d'être comblé progressivement et aujourd'hui, après la maîtrise de la cartographie assistée par ordinateur, des équipes s'investissent dans le montage des SIG. Outils précieux de prévision, d'analyse, d'anticipation et d'aide à la prise de décision, des SIG sont désormais montés par des équipes de géographes (notamment à la FLSH de Mohammedia) à la demande de collectivités locales. Cependant l'outil est loin d'être généralisé à toutes les Universités et ce pour trois raisons essentielles : aux problèmes du coût, s'ajoutent celui du personnel technique inexistant et celui de la formation continue des enseignants chercheurs. Ce sont les mêmes raisons qui expliquent le fait que la télédétection soit aujourd'hui encore peu développée.

Conclusion

Au terme de ce survol de la production scientifique dans les domaines des sciences géographiques, on peut conclure que nous sommes en présence d'un champ disciplinaire à la fois actif et productif d'un savoir qui est directement valorisé dans diverses actions de développement. Les préoccupations des chercheurs ont évolué en relation étroite avec les préoccupations du pays et ses priorités. Axant ses investigations sur l'analyse et la compréhension de la société dans ses relations avec son milieu, la recherche a focalisé ses approches sur les milieux physique, urbain et rural. Aujourd'hui et après ce travail de reconnaissance et de connaissance, elle semble affiner ses thématiques et les axes de recherche portant sur l'environnement, le développement durable, le développement local, la gestion des territoires, les analyses régionales, la télédétection, la cartographie numérique et les SIG etc., sont privilégiés, mais encore insuffisamment couverts. Or, ce sont justement ces axes de recherche qui ont le plus d'impact sur le développement. Il faut donc les renforcer et les encourager.

Mais en même temps ces chercheurs, tout en étant conscients de l'importance de leur discipline et tout en se démarquant des autres communautés des Sciences Humaines par leur volontarisme et leurs activités, n'ont pas conscience de constituer une communauté scientifique. En effet, la conscience de l'existence de cette communauté et ses frontières est peu perceptible. Est peu perceptible également l'existence d'un consensus autour des règles et valeurs propres à cette communauté ainsi que des mécanismes de contrôle qui lui sont propres et qui sont destinés à imposer des critères d'excellence. Par ailleurs il faut insister sur le caractère individuel de nombreux travaux et du taux très élevé de mortalité dans cette production : nombre d'auteurs relevés produisent une thèse, un ou deux articles ou un ouvrage puis disparaissent.

L'augmentation spectaculaire du nombre des chercheurs de ces disciplines, leur éparpillement aux quatre coins du pays, la jeunesse relative de leur majorité, l'absence de mécanismes d'auto évaluation de la discipline et le manque de moyens pour maintenir des contacts et développer une communication dense et régulière expliquent en partie ce paradoxe.

Vu la productivité de cette recherche et son intérêt pour le pays, il serait souhaitable de pallier à cette principale insuffisance en créant une instance destinée à cet effet.

Références bibliographiques

- Bencherifa A. (2002), Recherche géographique et développement rural: l'inévitable débat sur le déterminisme culturel, RGM, Vol. 20, Nouvelle série.
- Berriane M. (1999), La géographie du tourisme au Maroc : essai de synthèse sur l'état de la recherche, in *Le tourisme dans les pays du Maghreb : diversification et effets sur le développement local* (édit. Par M. Berriane et H. Popp), Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Rabat, Série colloques et séminaires, Vol. 77, pp. 15-28
- Berriane M. (2003), Recherches cartographiques sur les espaces urbains : l'Atlas urbain du Grand Rabat-Salé, RGM, Vol. 21, Nouvelle série, pp117-124
- Berriane M (2003), Le réseau national d'étude et de recherche sur le local et le régional ou pôle de compétence Relor, RGM, Vol. 21, Nouvelle série, pp. 145-154
- Brulé J.-C. et SIGNOLES P. (1986), Liste des thèses de géographie soutenues en France sur le Maroc, RGM, Vol 10, Nouvelle Série, n° 1 et 2 ; pp. 271-287
- Couleau J.F (1975), Essai de découpage du Maroc en ses diverses «régions naturelles», rapport ronéotypé, inédit, Rabat, Ministère de l'Economie Nationale, 1 carte h.t.
- De Miras C. (coordination), (2003) - Intégration à la ville et services urbains au Maroc, Pub. INAU
- Hardy G Célerier et J. (1933), Les grandes lignes de la géographie du Maroc, Paris, Larose, 3^{ème} éd., 1 vol., 211 p., 74 fig.
- IURS/CNGM (1996), Répertoire des géographes universitaires marocains, ronéotypé
- Joly F. (1960), Une carte au 1:1.000.000 de l'utilisation du sol au Maroc, Application de la méthode cartographique à la recherche des régions géographiques, Notes et documents pour l'Atlas du Maroc, Comité National de Géographie, Institut Scientifique, 115 p. et cartes h.t. en plusieurs feuilles
- Laouina A. (1993), Geomorphology in Morocco, in *The Evolution of Geomorphology*, J. Walker and E. Grabau Editors, Wiley, pp. 291-298
- Laouina A. (2002), La géographie, la gestion des formations superficielles et des sols et la dynamique environnementale, RGM, Vol. 20, Nouvelle série, pp 35-46
- Martin J. et al (1964), Géographie du Maroc, Hatier, Paris et Librairie Nationale, Casablanca
- Naciri M. (1989), Déterminants et contextes de la production du savoir géographique au Maroc, de la fin du XIX^{ème} au milieu du XX^{ème} siècle in *La recherche géographique sur le Maroc, évaluation préliminaire*, Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines - rabat, Série colloques et Séminaires, n° 12, pp. 11-29
- Rachik A. (2005), Bilan des études et recherches urbaines au Maroc : 1980 - 2004.
- Troin J.-F. (dir), Berriane M., Guittouni A., Laouina A., et Kaioua A. - Maroc : régions, pays, territoires, Maisonneuve et Larose, Paris, Tariq, Rabat et sa version arabe publiée en 2006 «Le Maroc, nouvelle approche de géographie régionale», Edition Tarik

Nouveaux Matériaux : Structure, Propriétés et Applications

Préambule

Derrière presque chaque développement technologique, il y a un développement important des matériaux avec des propriétés plus ou moins complexes. Jadis, l'homme avait à sa disposition un certain nombre de matériaux comme le bois, le verre, le cuivre et autres métaux et matériaux naturels et le défi était pour les scientifiques de caractériser leurs propriétés et pour les ingénieurs de trouver des niches d'applications pour ces propriétés. Avec les récents développements de la science des matériaux et des nouvelles techniques à la fois de synthèse, de mise en œuvre et d'analyse, la démarche est inversée ; nous définissons un certain nombre de propriétés requises pour une application donnée et l'exercice consiste à structurer la matière à différentes échelles et en combinant différents matériaux pour répondre aux exigences techniques préalablement spécifiées. A cette démarche féconde s'ajoute une compréhension de plus en plus profonde de la structure de la matière qui a abouti à la découverte de nouveaux matériaux qui élargissent le spectre des propriétés et donc des applications.

Ces nouvelles propriétés issues des matériaux composites, matériaux multifonctionnels et des nanomatériaux trouvent des applications dans des domaines variés comme l'énergie, l'eau, les transports, les communications, l'aérospatial, les capteurs, la santé et l'environnement.

Dans cet article, nous nous limiterons à trois types de matériaux : **i)** les matériaux "intelligents" en particulier les matériaux à mémoire de forme, **ii)** les matériaux pour l'électronique de spin et **iii)** les nanomatériaux à base de carbone comme le graphène et les fullerènes. Nous exposerons leurs propriétés, leur mode de fabrication, et leurs applications actuelles et potentielles.

Nouveaux Matériaux pour l'Électronique de Spin

Mohammed BELAICHE, Abdelilah BENYOUSSEF

Collège des Sciences Physiques et Chimiques

Académie Hassan II des Sciences et Techniques

1. Introduction

La découverte de la magnétorésistance géante (GMR), en 1988 par Albert Fert et Peter Grünberg (Prix Nobel 2007) [1,2], a donné naissance à l'électronique de spin. Une nouvelle branche de l'électronique qui, en plus de la charge de l'électron, est basée sur les états de son spin quantique (moment magnétique). La magnétorésistance géante a été observée dans des films minces formés d'une alternance de couches ferromagnétiques et non magnétiques (multicouches de Fer sur Chrome par Albert Fert et tri couches Fer-Chrome-Fer par Peter Grünberg).

Les dispositifs électroniques basés sur l'électronique de spin nécessitent la possibilité de créer un courant d'électrons polarisés en spins et un système capable de détecter cette polarisation. En général, dans ces dispositifs le courant d'électrons dépend des états de spin. La façon la plus simple pour générer ces courants d'électrons polarisés en spin est d'injecter un courant électrique dans une substance ferromagnétique. Un dispositif de la magnétorésistance géante est constitué d'au moins deux couches ferromagnétiques séparées par une couche non magnétique. La résistance électrique de ce film est grande lorsque les vecteurs des aimantations des deux couches magnétiques sont antiparallèles et elle est plus petite lorsqu'ils sont parallèles. Les dispositifs basés sur l'électronique de spin sont de plus en plus nombreux ; par exemple on les trouve comme : dispositifs de stockage de l'information, têtes de lecture des disques durs des ordinateurs, transistors à base de spin, les mémoires magnétiques non volatiles à accès aléatoires (MRAM) et les ordinateurs quantiques.

Une seconde génération d'électronique de spin utilise la cohérence de spin, dans laquelle le maintien de l'orientation d'un spin transverse à un champ magnétique ou à l'aimantation d'un domaine magnétique ou à l'orientation d'une autre population de spins, est important dans la dynamique globale ou dans les propriétés du matériau. Parmi les phénomènes utilisés dans les dispositifs de la spintronique cohérente, on cite la précession de l'aimantation d'un matériau magnétique, induite par un courant électrique et l'effet Hall de spin. L'utilisation de la cohérence de spin a permis de dépasser les limites de manipulation de l'information qu'on pensait être infranchissables.

De nouvelles voies se dessinent pour exploiter l'interaction spin-orbite pour générer et manipuler des porteurs de spins polarisés dans les semiconducteurs. La richesse des données expérimentales recueillies ces dernières années a clairement identifié des phénomènes, tels que l'effet Hall de spin et la polarisation de spin induite par un courant [3], qui pourraient bien constituer les fondements de la «spintronique sans magnétisme». La spintronique à base de molécules est aussi une perspective vers une technologie très attrayante [4]. Durant la dernière décennie, les molécules aimants et les chaînes aimants, souvent appelées édifices moléculaires ou clusters moléculaires, ont constitué un domaine de recherche actif en plein essor. Ceci a donné lieu à la mise en œuvre de nanoclusters magnétiques caractérisés par une anisotropie magnétique importante et aussi un cycle d'hystérésis de l'aimantation, présentant des propriétés similaires à celles des matériaux magnétiques monodomains. Depuis leur découverte, les molécules aimants,

ou bien les molécules individuelles (SMM), ont fait l'objet d'études approfondies et leur développement n'a pas cessé d'augmenter. Ces systèmes magnétiques présentent un intérêt particulier en sciences des matériaux, en raison de nouvelles propriétés fondamentales combinant à la fois les effets quantiques (effets de taille et effet tunnel) et les propriétés classiques des aimants, ainsi que leurs applications possibles dans des dispositifs magnétiques (unités moléculaires pour le stockage de l'information ou l'ordinateur quantique dans un proche avenir). Comblé le fossé entre la compréhension fondamentale et une technologie viable reste un défi important, mais offre également des opportunités scientifiques stimulantes pour l'ingénierie quantique qui est aux frontières même de la physique de la matière condensée.

2. Electronique de spin des semiconducteurs

Ces dernières années ont connu l'émergence de nouveaux concepts et réalisations dans le domaine de l'électronique de spin des semiconducteurs. Le développement de ce domaine a été possible grâce aux progrès des techniques d'élaboration de nouveaux matériaux et de structures de basse dimension, qui sont essentiels pour l'obtention de dispositifs spintroniques fonctionnels. Actuellement, il y a plusieurs dispositifs qui fonctionnent sur la base des principes de la magnétorésistance géante et tunnel (TMR). Cependant, dans les dispositifs à base de métaux, on ne peut obtenir de grandes valeurs de GMR et TMR que lorsque l'épaisseur de la couche non magnétique est de quelques nanomètres, ceci limite la valeur de la résistance à quelques fractions d'Ohm, ce qui n'est pas compatible avec la technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) existante. Plus encore, avec ces faibles dimensions, il est très difficile de trouver des outils pour manipuler les spins. Cependant, malgré quelques réalisations pratiques dans le domaine de la spintronique des métaux, la transition aux matériaux à base de semiconducteurs pose problème. En effet, en 1990 Datta et Das [5] ont découvert un nouveau concept pour la fabrication d'un dispositif semiconducteur pour la manipulation du spin. Dans ce dispositif on peut moduler un courant polarisé à travers un semiconducteur par une grille électrostatique via le couplage spin-orbite. Ce dispositif est connu sous le nom de transistor de Datta. Le courant polarisé en spin peut être obtenu par l'utilisation de la géométrie GMR avec un contact ferromagnétique métallique sur un semiconducteur. L'article de Datta et Das a suscité un très grand nombre de travaux expérimentaux et théoriques cherchant à réaliser des fonctions dépendant du spin dans des semiconducteurs ou dans des structures hybrides (métal-semiconducteur). Cependant, malgré ces efforts considérables, il n'y a pas eu de développement majeur.

Face à cette situation le grand défi posé à la physique du solide est de trouver de nouveaux concepts et principes dans l'architecture des dispositifs électroniques. Parmi les voies explorées dernièrement, on cite, la bioélectronique, l'électronique des polymères, l'électronique moléculaire en plus du spintronique. Cette dernière est l'une des approches les plus prometteuses pour les raisons suivantes : manipulation plus rapide des données, faible consommation d'énergie, facilité d'obtention de dispositifs intégrés, en plus du fait qu'elles seront basées sur les concepts de magnétorésistance géante et tunnel. Actuellement, les travaux de recherche sont orientés vers la fabrication de semiconducteurs ferromagnétiques à température ambiante avec des propriétés de spin contrôlées par des techniques électriques, magnétiques et optiques. Ces efforts de fabrication sont accompagnés par des études expérimentales et théoriques pour analyser les paramètres des matériaux dépendant de spin. Il y a deux raisons essentielles à ce choix: (i) les spintroniques semiconducteurs pourraient combiner le stockage, les opérations logiques et les communications sur la même puce, (ii) les semiconducteurs offrent un

grand nombre de possibilités de manipulations des spins hors équilibre par des méthodes de transport, optique et de résonance.

Il y a quatre exigences essentielles pour implémenter un spintronique semiconducteur dans des dispositifs : (i) injections efficaces de courant polarisé en spin dans des semiconducteurs, (ii) longueur de diffusion et durée de vie de spin adéquates pour le transport dans les dispositifs, (iii) contrôle et manipulation effectifs du système de spin, (iv) détection efficace du système de spin.

Ainsi, la physique des dispositifs spintroniques semiconducteurs offre la possibilité de développer des dispositifs hybrides capables d'assurer les trois fonctions; logique, communication et stockage de l'information avec la même technologie. En effet, l'injection des spins dans un semiconducteur à partir d'un matériau polarisé en spin et le transport cohérent de spin dans les semiconducteurs non-magnétiques est très efficace. La détection optique du spin dans les semiconducteurs a facilité l'observation du phénomène de cohérence dans le transport de spin, comme la précession de spin dans un champ magnétique cristallin interne, le déplacement électrique des parois de domaine et l'effet Hall de spin [3].

L'un des thèmes de recherche les plus actifs actuellement dans ce domaine est la recherche de matériaux pour dispositifs spintroniques semiconducteurs à température de Curie supérieure à l'ambiante [6-10]. Avec la possibilité de contrôler la température de transition et le champ coercitif électriquement. Ceci nécessite le contrôle de la concentration des porteurs de charge, chose difficile dans les métaux ferromagnétiques. Le couplage spin-orbite fortement présent dans ces systèmes donne une possibilité supplémentaire de manipuler la cohérence de spin par un champ électrique au lieu d'un champ magnétique.

Des expériences récentes montrent que lorsqu'un semi-conducteur est traversé par un courant, la polarisation en spin résulte de deux effets complémentaires, qui souvent coexistent: l'effet Hall de spin et la polarisation en spin induite par le courant. Ces deux phénomènes ont été observés dans une multitude de cristaux semi-conducteurs standards, allant des matériaux tridimensionnels aux gaz d'électrons à deux dimensions (2DEGs).

Une fois qu'un courant polarisé en spin est généré dans un semi-conducteur, on peut utiliser l'interaction spin-orbite pour moduler cette polarisation de spin en tirant profit des facteurs de brisure de symétrie tels que les interfaces, les champs électriques et les directions cristallines. Les techniques pour y parvenir sont maintenant bien comprises et sont fondées sur des idées clés fournies par les travaux pionniers de Dresselhaus, Rashba, et d'autres [11-13]. En effet, la proposition de Datta et Das [5] d'un dispositif spintronique à semi-conducteurs tire sa fonctionnalité essentielle du champ électrique contrôlé par la précession des spins des électrons injectés (l'effet Rashba).

3. Électronique de spin à base de molécules

Actuellement, la recherche dans le domaine d'électronique de spin s'oriente aussi vers l'élaboration de dispositifs à base de molécules. En effet, les molécules aimants et les chaînes aimants, appelées aussi édifices moléculaires ou amas moléculaires, sont de bons candidats pour une nouvelle génération d'électronique de spin.

Molécule individuelle-aimant (SMM) :

L'étude structurale de Mn_{12} -acétate ($\text{Mn}_{12}\text{O}_{12}(\text{CH}_3\text{COO})_{16}(\text{H}_2\text{O})_4$) a été établie pour la première fois par Lis en 1980 [14]. C'est un composé de type cœur-enveloppe (core-shell), le cœur est un tétraèdre cubique constitué de $\text{Mn(IV)}_4\text{O}_4$ ($S = 3/2$) et une enveloppe externe constituée de 8 ions Mn(III) ($S = 2$), ces ions sont connectés par des ponts de O-x-O. 16 groupements acétates et 4 ligands d'eau stabilisent l'édifice. Dans l'aimant Mn_{12} , l'état du macrospin vaut $S = 10$ car il implique 20 électrons non appariés dans l'état fondamental.

La figure 1 représente la structure cristalline de la molécule Mn_{12} -acétate, la projection est suivant l'axe c. Le couplage inter-édifice est assuré par le biais de molécules d'acide acétique et d'eau (formant le complexe moléculaire) ce qui rend l'effet des interactions dipolaires très faible. L'ordre magnétique à longue distance ne se manifeste qu'à basse température de l'ordre de quelques mK. Le couplage entre les ions Mn est assuré par des ponts O-x-O et acétate. Les 8 spins Mn^{3+} ($S = 2$) sont orientés antiparallèlement aux 4 spins Mn^{4+} ($S = 3/2$). Il en résulte que les interactions d'échange antiferromagnétiques (AFM) et ferromagnétiques (FM) sont, a priori, présents dans la molécule. Dans l'approximation tétragonale, il y a trois sites différents de Mn et quatre couplages d'échange différents. La compétition entre ces deux types d'interactions donne lieu à une compétition entre deux sous réseaux, due à la valence mixte du manganèse, d'où un comportement globale ferrimagnétique stabilisant un état fondamental $S = 10$ [15, 16], confirmée par de nombreuses expériences [17, 18].

L'anisotropie axiale magnétocristalline résultant principalement de la distorsion Jahn-Teller des octaèdres MnO_6 des ions Mn^{3+} situés sur l'enveloppe, génère une barrière d'énergie entre les états $M_s = \pm 10$ et $M_s = 0$. Cette barrière bloque la relaxation thermique de l'aimantation [15, 19].

Parmi les recherches développées dans ce domaine ces dernières années, on peut citer l'investigation de nouvelles méthodes permettant de modifier la famille d'acétate Mn_{12} des nanoaimants moléculaires (SMM), en utilisant une variété de techniques contrôlables [20]. Dans ces molécules, le cœur inorganique Mn/O est placé dans une coquille de ligands organiques, le but est la modification de cette périphérie organique (shell) via des réactions de substitution des ligands. Cela a permis, entre autres, de régler la solubilité, le redox et les propriétés magnétiques des molécules. Une autre façon plus subtile, concerne la modification des molécules pour induire une croissance cristalline par la variation des solvants, qui peut conduire à des variations du groupe d'espace, ce qui peut induire à des variations de la symétrie locale des sites [21]. Toutes ces modifications contrôlées, ont considérablement fait progresser nos connaissances et notre compréhension des propriétés de ces nanoaimants d'acétate Mn_{12} , ce qui a poussé les physico-chimistes à développer de nouvelles méthodes de synthèse pour élaborer de nouveaux types de structure en augmentant le nombre de métaux Mn qui pourraient conduire à des propriétés structurales et / ou magnétiques intéressantes [22].

Une nouvelle approche a permis la synthèse d'une molécule géante dont la taille peut atteindre celle des molécules existantes dans la nature [$\text{Mn}_{84}\text{O}_{72}(\text{O}_2\text{CMe})_{78}(\text{OME})_{24}(\text{MeOH})_{12}(\text{H}_2\text{O})_{42}(\text{OH})_6$] (Mn84) à partir de la réaction de Mn_{12}Ac avec $\text{NnBu}_4\text{MnO}_4$ dans le MeOH. La structure est donnée à la figure 2 et elle présente un tore géant avec un diamètre $a > 4$ nm, composé d'une alternance quasi-linéaire d'entités [Mn_3O_4] et des unités cubiques [Mn_4]. Tous les ions Mn sont Mn^{III} . Le complexe Mn84 présente un cycle d'hystérésis et une aimantation à effet tunnel quantique (QTM); c'est la plus

grande molécule individuelle-aimant (SMM) préparée à ce jour [23]. L'empilement des molécules Mn_{84} dans le cristal donne lieu à des nanotubes parallèles à l'axe c du cristal et à leurs voisins. On obtient ainsi un empilement hexagonal compact.

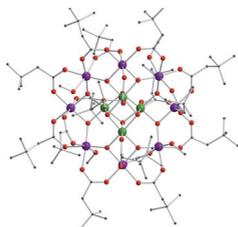


Figure 1
La structure de Mn_{12} [26]

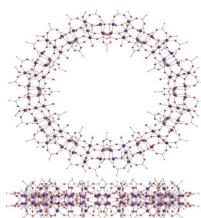


Figure 2
La structure de Mn_{84} [27]

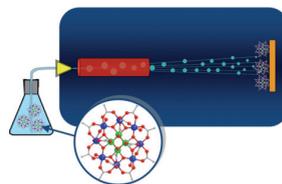


Figure 3
Déposition par la technique
spray de Mn_{12} [26].

Chaînes aimants (SCM) :

Comme les matériaux magnétiques classiques, les chaînes aimants sont composées de chaînes d'atomes magnétiquement isolés, les mesures magnétiques obtenues pour ces systèmes ont essentiellement révélé des comportements spécifiques intrinsèques de chaînes dues aux phénomènes coopératifs, c'est à dire d'un système unidimensionnel 1D. Plusieurs modèles théoriques ont été proposés au cours des dernières décennies [24]. En outre, de nombreux systèmes quasi-monodimensionnels ont été expérimentalement synthétisés et leurs propriétés ont été comparées avec succès à la théorie. Une des principales conclusions, est que dans ces systèmes les interactions d'échanges ne se manifestent qu'à courte distance (c. à. d. l'échange magnétique est généralement limité aux premiers proches voisins), ce qui laisse prédire que les interactions à longue distance ne peuvent se manifester qu'à très basse température (quelques mK).

Ces systèmes unidimensionnels présentent une bistabilité magnétique et ils sont communément appelés chaînes aimants (MSC : single magnets chaînes). Ils présentent un très grand intérêt en raison de leurs propriétés physiques inhabituelles et la possibilité de les utiliser pour le stockage de données à haute densité et pour des applications en électroniques quantiques [25]. Contrairement aux molécules individuelles aimants, la relaxation lente de l'aimantation dans ces chaînes aimants est due uniquement aux interactions d'échanges. Les études théoriques, pour la description du comportement de ces chaînes aimants (SCM), ont été établies au moyen d'une approche stochastique par Glauber qui a prédit la présence de relaxation lente de l'aimantation dans une chaîne ferromagnétique où les interactions spin-spin sont décrites par l'hamiltonien d'Ising. Une chaîne de spin d'Ising peut se comporter comme une chaîne aimant (SMC), si les ions magnétiques sont couplés de telle sorte que leurs moments magnétiques ne s'annulent pas. Dans la majorité des chaînes, cette condition est satisfaite surtout dans le cas où les interactions entre spins sont de nature ferromagnétique ou bien lorsque la chaîne présente une alternance de spins différents couplés antiferromagnétiquement.

4. Spintronique à base de molécules aimants (SMM)

Les sections précédentes ont mis en évidence les limites de l'approche actuelle du nanomagnétisme moléculaire, principalement liés aux basses températures. Toutefois, l'impact de SMM sur la compréhension de la dynamique de l'aimantation à l'échelle

nanométrique a été important. Quelque chose de similaire est prévue dans le nouveau domaine de magnéto-transport, en particulier dans les effets tunnels quantiques, la magnétorésistance et les valves de spin. La spintronique à base de molécules est aussi une perspective vers une technologie très attrayante [4].

Parmi les méthodes utilisées pour la fabrication de ces systèmes on cite la méthode de pulvérisation sous vide d'une solution de clusters Mn_{12} sur une cible (figure 3). Cette technique permet de fabriquer des films minces d'agrégats de Mn_{12} sans aucune altération des propriétés des molécules aimants (SMM). Dans ce cas, l'interaction avec le substrat ne joue aucun rôle. Le résultat est cependant très prometteur pour d'autres développements, en particulier pour la compatibilité sous vide de la technique [26].

Le nanomagnétisme moléculaire peut également être utilisé dans les ordinateurs quantiques. Dans un ordinateur quantique, l'information n'est pas stockée selon l'orientation de l'aimantation (up ou down), mais plutôt dans les coefficients qui décrivent la fonction d'onde du système dans la base. Cependant, pour qu'un qubit soit utilisable, il doit être suffisamment isolé de l'environnement. Des résultats prometteurs ont été obtenus pour des ions isolés des terres rares, ainsi que pour des atomes d'azote paramagnétique $C60$ [27-29]. L'influence de la nature MultiSpins de qu-bits basée sur des clusters moléculaires mérite d'être étudiée plus profondément, ainsi que la possibilité de contrôler la décohérence à travers une approche synthétique.

5. Le stockage de l'information

La mise en œuvre technologique du stockage non volatile se fait à travers l'orientation magnétique de médias, comme sur les plateaux des disques durs. La MRAM (Magnetic Random Access Memory) est une mémoire vive non volatile, sans partie mobile, qui utilise le magnétisme au lieu de la charge électrique, pour stocker l'information. On pense que ce type de mémoires sera dominant dans le futur proche vu ses propriétés : grande vitesse d'écriture et de lecture comparable à la SRAM, forte densité de stockage de même ordre que la DRAM et une faible consommation d'énergie. La structure de la cellule MRAM est composée de matériaux à anisotropie perpendiculaire pour enregistrer l'information. La lecture de l'information se fait par la mesure de la résistance électrique de la cellule. Le choix de la cellule à lire se fait par un transistor qui commute le courant, à travers la cellule, d'une ligne d'alimentation à la masse. Plusieurs façons sont possibles pour écrire sur une cellule ; la plus simple est d'utiliser un champ magnétique induit, le mode de basculement pour une écriture à plusieurs étapes ou une nouvelle technique appelée transfert de moment.

En général, les matériaux dans les MRAM sont des métaux et isolants magnétiques, et non des semiconducteurs. Cependant, si la recherche de MRAM, à température ambiante, dans les semiconducteurs aboutit, il serait possible d'intégrer le stockage non volatile directement dans les processeurs logiques. La seconde génération des MRAM s'appuie sur la réorientation de l'aimantation du matériau magnétique par un courant électrique polarisé en spin. La faisabilité de ce concept a été démontrée dans le semiconducteur magnétique $GaMnAs$. Ce qui est encore plus prometteur, c'est l'idée de fabriquer des transistors magnétiques, comme le transistor de spin unipolaire ou le transistor de spin bipolaire qui fusionnent la non volatilité ou la reprogrammabilité avec les propriétés du transistor.

Parmi les grands défis à surmonter pour utiliser les semiconducteurs magnétiques dans les nouvelles générations de dispositifs spintroniques, c'est le haut niveau de dopage par des porteurs de charge. En effet, dans plusieurs matériaux semiconducteurs ferromagnétiques la concentration des porteurs de charge est très élevée, ce qui rend le contrôle de l'interface de ces matériaux très difficile. Actuellement, la recherche est orientée vers des matériaux semiconducteurs qui sont ferromagnétiques à faible dopage. Parmi les découvertes récentes dans ce domaine, une diode p-n fabriquée avec des matériaux ferromagnétiques et la démonstration de l'anisotropie d'échange dans les semiconducteurs magnétiques [30, 31]. L'anisotropie d'échange qui est l'élément central des MRAM métalliques sera l'élément clé de la technologie du stockage des spintroniques semiconducteurs.

Ordinateurs quantiques :

L'évolution rapide de la technologie des ordinateurs laisse penser que l'ordinateur du futur ne contiendrait ni transistors ni puces. L'ordinateur quantique pourrait être cette nouvelle génération d'ordinateurs. Théoriquement, il serait des milliards de fois plus rapide que l'ordinateur actuel et ne consommerait presque pas d'énergie. Si la miniaturisation des transistors continue au rythme actuel, dans dix ans l'épaisseur des fils dans les puces d'ordinateur serait de la taille d'un atome. A cette taille les lois de la physique classique ne s'appliquent plus. La technologie des ordinateurs quantique est très différente de la technologie actuelle. Ils utilisent les bits quantiques « qubits » au lieu des bits. Un qubit a une nature quaternaire, il ne se trouve pas seulement dans les états 0 et 1 mais il peut aussi se trouver dans l'état de superposition de 0 et 1. Donc l'ordinateur quantique peut utiliser simultanément 0 et 1. Un qubyte est formé de huit qubits et peut donc utiliser simultanément tous les chiffres de zéro à 255. Ainsi les propriétés de superposition et d'intrication permettront un taux exponentiel de parallélisme. Les ordinateurs quantiques combinent la mécanique quantique, la théorie de l'information et certains aspects de la science des matériaux et l'ingénierie des ordinateurs. Ce domaine est nouveau et très prometteur pour sécuriser le transfert des données, une augmentation colossale de la vitesse de calcul et permettrait d'atteindre la limite fondamentale de la miniaturisation.

La conception des ordinateurs quantiques basée sur des approches de l'état solide liées au spin, offre la possibilité de fixer des degrés de liberté quantiques isolés dans l'espace. On place des boîtes quantiques ou des ions dans une matrice solide, puis on fait l'adressage de ces degrés de liberté avec des contacts électriques. Des progrès dans la compréhension du couplage entre des degrés de liberté de spin et des champs électriques, principalement grâce à l'interaction spin-orbite, mais aussi à travers la fabrication nanomagnétique, permettent d'éviter certains problèmes avec la production de champ magnétique fortement localisé. Des temps de cohérence de spin extrêmement longs, à la température ambiante, et des temps de grille très courts, donnent des rapports du temps de cohérence de spin sur le temps de grille de l'ordre de 10^3 . Grâce au couplage du degré de liberté de spin d'un électron à des champs optiques, il y a une méthode claire de couplage de photons à l'intérieur et à l'extérieur d'un ordinateur quantique à base de spin, et ces photons peuvent avoir des longueurs d'onde compatibles avec les formes actuelles de communication.

La réalisation du traitement de l'information quantique à grande échelle dans n'importe quel système physique sera un énorme succès. Parmi les avancées expérimentales récentes dans les ordinateurs quantiques à base d'électronique de spin des semiconducteurs, on cite; la démonstration des longs temps de cohérence dans les boîtes quantiques, et plusieurs exemples de manipulations de grilles en agissant sur un ensemble de spins [32, 33].

6. Conclusion et perspectives de l'électronique de spin

La Spintronique reste l'un des domaines les plus actifs de la recherche dans les nanotechnologies avec le développement des semi-conducteurs magnétiques comme GaMnAs connaît un très grand intérêt. Par exemple, la découverte du couplage antiferromagnétique inter plans dans les multicouches GaMnAs / GaAs [34] ouvre la voie à de nouvelles applications car auparavant, seul l'ordre ferromagnétique avait été observé [35]. Les idées de la spintronique à semi-conducteurs sont également explorées avec des semi-conducteurs organiques, et il ya eu récemment un bon progrès dans la fabrication des dispositifs avec ces matériaux [36]. De tels systèmes ont aussi été récemment étudiés à l'aide des muons [37].

Des matériaux multiferroïques peuvent être utilisés comme des barrières tunnel pour filtrer les spins de type jonctions tunnel magnétiques. Ils génèrent quatre états de résistance plutôt que deux habituellement lorsque le ferromagnétisme est présent, en manipulant les deux paramètres d'ordre ferroïques séparément [38], ou en utilisant l'anisotropie d'échange et le couplage magnétoélectrique en présence d'un ordre antiferromagnétique pour contrôler le magnétisme avec des tensions [39]. Enfin, il a été montré récemment que des matrices de nano aimants sont des systèmes modèles pour étudier le magnétisme frustré dans des spin-ices artificielles [40].

Graphène et Fullerènes : Matériaux d'Avenir

Mostapha BOUSMINA, El Hassan SAÏDI
Collège des Sciences Physiques et Chimiques
Académie Hassan II des Sciences et Techniques

1. Introduction

Jadis, il fallait jouer sur les conditions de la synthèse chimique ou celles des traitements physiques pour changer les propriétés de la matière. Aujourd'hui en plus des ces possibilités classiques, des propriétés tout à fait nouvelles peuvent être obtenues en jouant uniquement sur la disposition des atomes et sur la taille et la géométrie de leur assemblage. Les matériaux carbonés sont une parfaite illustration de cette nouvelle façon d'obtenir des propriétés inédites en structurant la matière à l'échelle à la fois atomique et moléculaire. Ces manipulations permettent de générer des structures comme le graphite, le diamant, le graphène et les fullerènes tubulaires et sphériques à partir d'un seul atome : le Carbone. Le sujet est vaste et multidisciplinaire et donc il est impossible de couvrir de manière exhaustive en quelques pages tous les aspects scientifiques et techniques et par conséquent nous nous limiterons ici à passer en revue de manière brève et concise leurs structures, leurs modes de fabrication ainsi que certaines de leurs propriétés et de leurs applications potentielles.

2. Les différentes structures du carbone

Le carbone occupe une place privilégiée dans la nature, puisqu'il est l'un des constituants principaux de tout être vivant. Il est le sixième élément du tableau périodique et il a six électrons, deux sur la couche interne et quatre sur la couche externe avec la configuration électronique de l'état fondamental $1s^2 2s^2 2p^2$, codant l'essentiel de ses propriétés physiques et chimiques. Les atomes de carbone se combinent entre eux et/ou avec d'autres types d'atomes pour former une myriade de molécules ayant des propriétés de gaz, de liquides, de solides ou encore de cristaux liquides. Lorsque les atomes de carbone s'associent entre eux, il y a une flexibilité de combinaison (hybridation) entre les orbitales 2s et 2p donnant lieu sur le plan structural à deux formes tridimensionnelles allotropes du carbone pur : une lâche, dite "graphite" avec une hybridation sp^2 où chaque atome de carbone est lié à trois autres et l'autre compacte, dite "diamant" avec une hybridation sp^3 où chaque atome de carbone est lié à quatre autres.

Graphite :

Le graphite, matière avec laquelle est constituée un crayon à papier, est la forme la plus stable à pression normale ou modérée avec des atomes de carbone s'associant en hybridation sp^2 pour former une structure hexagonale ayant six atomes de carbone et où chaque hexagone est lié à son tour à six autres pour former un feuillet percée de trous hexagonaux et plans ayant une structure de type nid-d'abeilles (Figure 4). Les feuillets se superposent les uns sur les autres pour former une structure sandwich à l'image d'un "mille-feuilles", où les feuillets, séparés par une distance d'environ 0.34 nm, sont liés verticalement par des liaisons faibles impliquant un chevauchement des orbitales "Pi"

qui peuvent être facilement vaincues par simple clivage. C'est cette opération qui permet d'écrire avec un crayon en déposant quelques couches de graphite par la pointe du crayon en la faisant glisser sur la surface du papier.

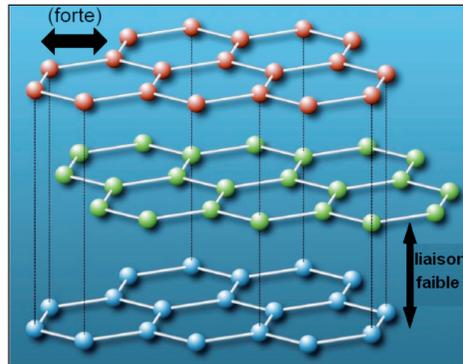


Figure 4 : Structure du graphite formée par la superposition des feuilles de graphène.

Comme le carbone est tétravalent possédant quatre électrons sur la couche externe et comme seuls trois électrons sont impliqués dans des liaisons fortes dans le plan (liaisons sigma), il reste un électron non lié qui sort du plan (électron délocalisé) qui confère au graphite la propriété de conducteur électronique. La conductivité en question est uniquement dans la direction parallèle au plan des feuillets et non dans la direction perpendiculaire. C'est aussi cette structure qui rend le graphite friable et cassant [41].

Diamant :

A l'opposé, le diamant se forme sous des conditions de pressions et des températures extrêmement élevées (environ 10^5 atm et 1500 °C) où les atomes de carbone s'organisent dans une maille cubique faces centrées, avec chaque atome de carbone lié à quatre autres selon une hybridation sp^3 .

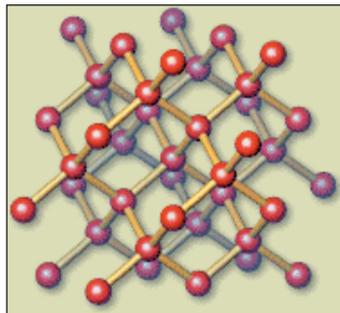


Figure 5 : Structure du diamant avec des atomes de carbone en hybridation sp^3 .

Cette structure confère au diamant une grande résistance mécanique avec une rigidité surpassant celle de tous les autres matériaux connus (à l'exception des nanotubes de carbone), et il est aussi isolant (diélectrique), car tous les électrons sont impliqués dans des liaisons covalentes fortes. Même si les enthalpies standard de formation du diamant

et du graphite diffèrent que de très peu ($93 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), une grande barrière d'énergie sépare les deux phases, rendant extrêmement difficile leur inter conversion. C'est cette barrière d'énergie qui fait du diamant un élément rare et une fois formé, il ne peut spontanément être converti en graphite à température ambiante. C'est pour cela que la phase diamant est qualifiée de métastable, car elle est cinétiquement stable et thermodynamiquement instable. A part l'état massif, le diamant peut aussi être formé au laboratoire par des techniques thermiques sous forme de film mince.

Un mélange, avec des proportions variées, des deux formes sp^2 et sp^3 donne d'autres structures de carbone incluant le charbon actif, du noir de carbone ou encore du carbone amorphe. Ainsi les propriétés des matériaux 100% carbonés changent selon le pourcentage de ces deux formes; mais dans tous les cas une seule forme cristalline est présente et elle est tridimensionnelle impliquant trois ou quatre liaisons carbone-carbone (graphite ou diamant).

Récemment les propriétés du carbone ont encore été propulsées à un stade supérieur, jamais atteint dans le domaine des matériaux, par deux découvertes majeures : i) la première concerne la cristallisation du carbone dans une structure sp^2 bidimensionnelle stable appelée "graphène" et ii) l'autre est d'ordre topologique où les propriétés peuvent être changées de façon importante en jouant sur la manière d'enrouler des feuilles du graphène pour obtenir différentes formes 1, 2 ou 3D (Figure 6). En plus de ces deux possibilités, on peut aussi changer les propriétés en changeant la taille de ces objets.

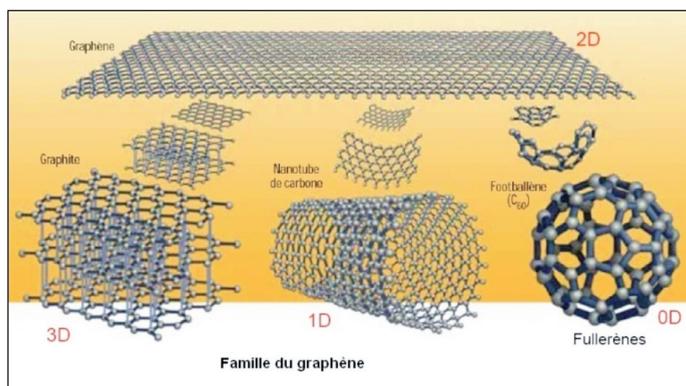


Figure 6 : Différentes topologies et dimensions des structures carbonées.

Graphène :

Le graphène fut isolé en 2004 par simple pelage du graphite à l'aide d'un ruban adhésif. Cette découverte a bouleversé le monde des matériaux, car elle va à l'encontre des théories qui stipulaient qu'un cristal en deux dimensions ne peut exister à cause des instabilités engendrées par les fluctuations thermiques (Théorème de Mermin-Wagner sur les brisures de symétrie). Depuis, les recherches sur le graphène se sont multipliées et intensifiées, car ce matériau montre des propriétés exceptionnelles et inédites. Il possède, entre autres, des propriétés mécaniques et thermiques dépassant de loin les matériaux classiques : 200 fois plus dur et six fois plus léger que l'acier (module élevée dans la direction parallèle au plan) et 3 fois plus conducteur thermique que le diamant à température ambiante, matériaux qui détenait jusqu'à date le record de conductivité thermique. Il a des propriétés de semi-conducteur avec une mobilité électronique 30 fois supérieure à celle du silicium.

Ceci ouvre la voie à des applications importantes dans plusieurs domaines, notamment dans le domaine des cellules photovoltaïques et aussi en électronique pour la fabrication de nouvelles puces plus performantes que celles fabriquées à partir du silicium dont la capacité de miniaturisation arrive actuellement presque à sa limite technologique[42].

Ces propriétés sont dues à la fois à la structure plane et à la présence d'un électron presque-libre non impliqué dans les liaisons fortes dans le plan (liaisons sigma). Cet électron Pi délocalisé possède une orbitale qui s'étend suivant l'axe normal au plan, comme si nous avions une feuille avec des électrons situés de part et d'autre à une distance donnée de la feuille. Ceci confère au graphène des propriétés uniques et inédites. La différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction est nulle. Ainsi les deux bandes sont situées sur le même point sur l'échelle de l'énergie (énergie de Fermi nulle) (Figure 7b).

Cette propriété est unique dans le cas des semi-conducteurs. Il faut rappeler que pour les isolants, la bande de conduction ne contient aucun électron au zéro absolu et la différence d'énergie entre la bande de valence qui contient les électrons et la bande de conduction, connue sous le nom de bande interdite ou "Band Gap", est très grande (environ 5-10 eV), pour les semi-conducteurs, elle est d'environ 0.1-2.5 eV, alors que pour les conducteurs, il y a un chevauchement entre les deux bandes. Pour le graphène le Band Gap est tout simplement nul. Ceci est dû au fait que les bandes Pi occupées et les bandes Pi non occupées se touchent en un seul point. Les électrons et les trous se rencontrent aux points (K,K') de Dirac. Cela veut dire qu'un faible apport énergétique comme par exemple une faible augmentation de la température, un faible champ magnétique ou encore un faible rayon lumineux est capable de donner une mobilité à ces électrons sur le réseau (sur la surface de la feuille du graphène). Ceci a deux conséquences : i) une vitesse d'électrons énorme avoisinant 10^6 m/s (comportement quasi relativiste) qui est le centième de la vitesse de la lumière et qui est 30 fois supérieur à la vitesse des électrons dans le silicium et ii) la mobilité électronique qui se produit selon un mécanisme un peu différent que dans le cas des conducteurs ou semi-conducteurs classiques. L'électron saute d'un atome à un atome voisin, prenant la place de l'électron délocalisé sur le deuxième atome, qui à son tour saute au troisième atome pour prendre la place du troisième électron délocalisé et ainsi de suite.

La circulation des électrons se fait par un mécanisme d'avalanche de proche en proche avec une vitesse approchant celle de la lumière. L'autre particularité est que les électrons se comportent comme des objets chargés, mais sans masse comme des particules connues sous le nom de fermions de Dirac. La mobilité des électrons dans le graphène est extrêmement élevée et vaut environ $15\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ et sa résistivité et de l'ordre de $10^{-6}\ \Omega\cdot\text{cm}$, inférieure à celle de l'argent connu comme ayant la plus basse résistivité à température ambiante [43-48]. Ces propriétés électroniques qui sont à cheval entre la physique des hautes énergies et la science des matériaux à basse dimension font du graphène matériau unique pour le transport électronique.

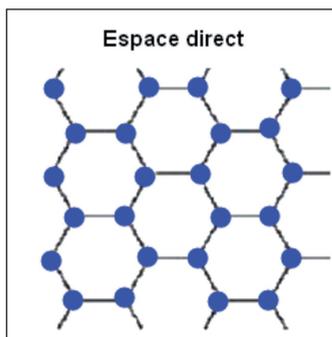


Figure 7a

Une feuille de graphène représenté dans l'espace réel. Les points bleus désignent les atomes de carbone liés entre eux par trois liaisons type sigma.

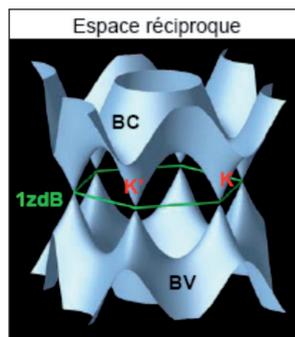


Figure 7b

Les vecteurs d'ondes des électrons Pi dans l'espace réciproque. La première zone de Brillouin 1zdB est à l'intersection de la bande de valence (BV) et de conduction (BC).

L'intérêt porté au graphène a été accru en 2005 par l'observation de l'effet Hall quantique entier (Integer Quantum Hall Effect : IQHE) d'abord sur une feuille de graphène [46] et puis en 2006 sur une bi-couche de graphène [47]. Rappelons que l'effet Hall quantique concerne la dépendance de la conductivité transverse du champ magnétique appliqué perpendiculairement. La conductivité Hall $\sigma_{xy} = ne^2/h$ (où e est la charge de l'électron, h est la constante de Planck et n est un entier) est observée uniquement à de très faibles températures autour de 3K et sous champ magnétique intense (supérieur à 15 Tesla) dans des matériaux solides purs comme le silicium ou l'arséniure de galium, GaAs, mais dans le graphène cette propriété est observée à température ambiante avec une anomalie concernant la conductivité Hall qui devient $\sigma_{xy} = 4(n+1/2) e^2/h$. Cette anomalie est liée à la particularité des électrons dans le graphène qui se comportent comme des particules de Dirac sans masse.

Fullerène :

Une feuille de graphène enroulée sur elle-même donne une autre forme allotrope appelée "fullerène" qui peut prendre plusieurs géométries: sphère, ellipsoïde, tube ou anneau. Le mot fullerène est pour rendre hommage à Buckminster Fuller, un architecte américain connu pour la construction des dômes géodésiques. Les fullerènes furent découverts en 1985 par Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley, ce qui leur valut le prix Nobel de Chimie en 1996. Du graphène enroulé sur lui-même selon l'axe du plan donne des nanotubes de carbone à simple ou multiple parois, un enroulement dans les trois dimensions donne une structure plus ou moins sphérique impliquant N atomes de carbone et elle est notée C_{2N} , dont la plus connue est le C60 où soixante atomes de carbone forment une sphère (à l'image d'un ballon de football) contenant 12 pentagones et 20 hexagones conférant de nouveau au carbone d'autres propriétés uniques et quantiques. Les C60 sont diamagnétiques dû à la présence d'un courant annulaire [41].

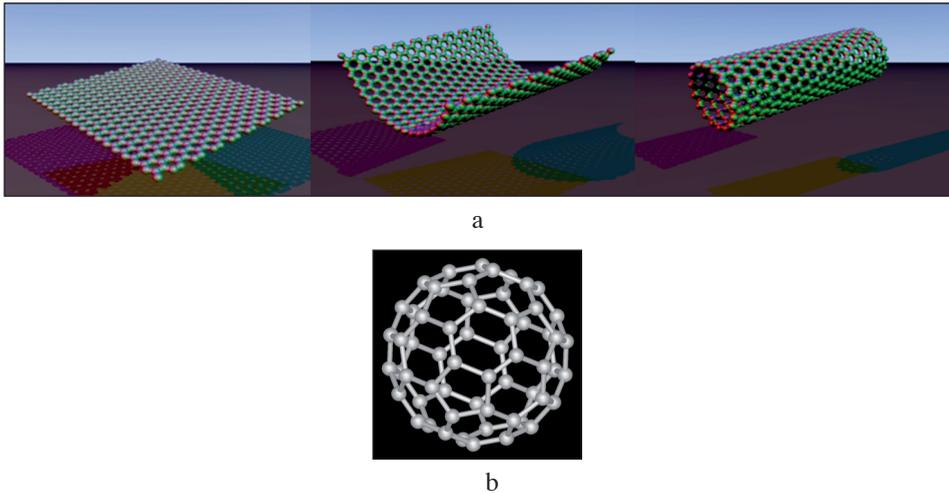


Figure 8 : a : formation des nanotubes de carbone, b : structure du C₆₀.

Les nanotubes de carbone ont une conductivité électrique bien supérieure à celle du cuivre et elle est d'environ 70 fois celle du silicium. Ils possèdent une mobilité électronique extrêmement élevée ($10^5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ à température ambiante). Ceci ouvre des niches d'applications importantes pour la fabrication des transistors (application déjà prouvée par l'équipe d'IBM), des sources froides d'émission d'électrons, des émetteurs de champs et des superconducteurs.

3. Méthodes de fabrication

Les méthodes de fabrication des différentes formes du carbone comme les nanotubes de carbone sont nombreuses et incluent la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition : CVD), la méthode électrochimique, la méthode couplée du CVD avec le plasma (Plasma enhanced CVD : PECVD), la méthode d'arc électrique, méthode d'ablation laser, etc. La méthode la plus utilisée est la CVD. Elle consiste à déposer des nanoparticules sphériques d'un catalyseur comme le fer, le cobalt ou le nickel sur une surface plane. On purge sur le support-catalyseur un flux gazeux d'une source de carbone comme le méthane CH₄ ou l'acétylène, C₂H₂.

Au contact avec la surface du catalyseur, le gaz carboné se décompose en carbone et en hydrogène. L'hydrogène étant volatil et il est évacué du réacteur via un gaz vecteur inerte comme l'hélium ou l'azote et les atomes de carbone se déposent sur la surface des particules sphériques et s'assemblent pour faire croître des nanotubes de carbone autour de chaque particule sphérique. Le diamètre des nanotubes ainsi obtenus est alors fixé par le diamètre des nanoparticules du catalyseur. Une autre méthode consiste à faire croître les nanotubes à partir de trous cylindriques d'un mésoporeux ayant des amas de catalyseur sur les parois internes. Dépendamment des conditions expérimentales, cette technique permet en plus d'avoir des nanoressorts et des nanosolénoïdes de carbone (Figure 9).

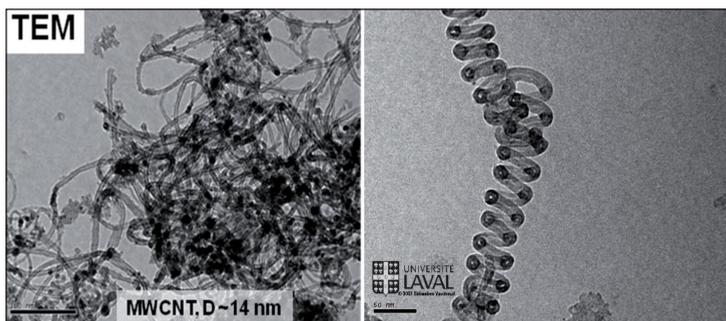


Figure 9 : à gauche les nanotubes de carbone et à droite les nanoressorts de carbone [49]

La première technique découverte pour isoler le graphène du graphite est le pelage par un ruban adhésif. Cette technique a pu démontrer qu'il est possible d'exfolier le graphite, mais il n'est certainement pas viable au niveau industriel. Les techniques récentes utilisent plutôt les techniques de CVD et de croissance épitaxiale en transformant le carbure de silicium et d'autres composés carbonés en graphène ou encore des techniques chimiques combinées à la CVD. Une des techniques encore moins coûteuse est l'exfoliation mécanique du graphite seul ou du graphite incorporé dans des matrices comme les polymères.

4. Applications

Les matériaux carbonés sont d'ores et déjà utilisés dans de nombreuses applications pour la fabrication des composantes électroniques, des articles de sports comme les raquettes de tennis, les clubs de golf, les vélos, les skis et les planches à voiles et les articles entrant dans l'aérospatiale, les télécommunications, les capteurs, et les instruments médicaux.

Les applications potentielles des différentes nouvelles formes du carbone sont nombreuses et diversifiées et incluent des applications électriques, électroniques, thermiques, mécaniques, optiques, chimiques et biologiques. Leurs propriétés uniques leur confèrent un fort potentiel d'application pour la fabrication des nouvelles générations de cellules photovoltaïques à partir notamment du graphite, des nanotubes de carbone, du graphène et des C_{2N} . Ils ont aussi des applications dans la fabrication des batteries à lithium, des modules pour le stockage d'hydrogène dans les fibres et les nanotubes de carbone pour les piles à combustibles. La nouvelle électronique incluant les super-condensateurs, les transistors, les diodes, les écrans de télévision et les écrans d'ordinateurs aussi bien minces que flexibles sont actuellement en développement en combinant plusieurs matériaux, notamment des polymères conducteurs (basés essentiellement sur des chaînes conjuguées de carbone) et les nanotubes de carbone bien alignés, le graphène et les C_{2N} . Les FED (Field Emission Display) est un nouveau type d'écran plat qui surpasse les performances des écrans à base des cristaux liquides avec une brillance supérieure, une meilleure vision à différents angles, une qualité de couleurs, un temps de réponse et une plage de température de fonctionnement bien meilleurs. Les nanotubes de carbone et les films minces de diamant ont un grand potentiel pour la fabrication d'une nouvelle génération d'émetteurs d'électrons sous faible champ à basses températures. Les nanotubes de carbone ont été aussi utilisés comme pointe robuste dans les microscopes à force atomique (AFM) et les microscopes à effet tunnel et aussi comme pointe des capteurs à

gaz, des capteurs de liquides, et des capteurs biologiques. Le graphite est largement utilisé pour la fabrication d'électrodes électrochimiques, des lubrifiants, des absorbants d'huiles et des carburants. Des travaux récents ont aussi démontré la possibilité de fabriquer des wafers de 100mm à partir du graphène ce qui ouvre la voie à une nouvelle électronique encore bien meilleure que celle obtenue à partir du silicium.

5. Conclusion et défis

Les structures carbonées montrent des propriétés électriques, électroniques, thermiques et optiques inédites avec des opportunités d'applications variées. Malgré que ces structures sont formées par un seul atome, le Carbone, une kyrielle de propriétés exceptionnelles peuvent être obtenues en jouant uniquement sur la disposition des atomes, sur la taille et la topologie des molécules obtenues par leur association. Ainsi on obtient du graphite, du diamant, du graphène et des fullerènes avec différentes formes de 1, 2 ou 3 dimensions.

Les C_{2N} , les nanotubes de carbone et le graphène forment la nouvelle génération de ces structures carbonées avec des propriétés mécaniques et de conductivité thermique et électrique inégalées. Ceci ouvre la voie à une nouvelle électronique avec des circuits intégrés plus puissants et une capacité de stockage et de rapidité d'acquisition et de transmission des données surpassant de loin les possibilités offertes par le silicium qui arrive à ses limites. L'un des défis majeurs est d'améliorer les techniques de fabrication pour baisser les coûts et pouvoir utiliser ces nouveaux matériaux dans le domaine de l'énergie solaire, de l'aérospatial, de l'automobile, des télécommunications, des articles de sports et dans le domaine de la santé. On peut aussi envisager de combiner ces structures carbonées avec d'autres matériaux soit à l'échelle atomique et moléculaire soit à l'échelle supramoléculaire pour élargir le spectre de leurs propriétés et donc de leurs applications. Il faut cependant prendre toutes les précautions requises lors de leur manipulation. Un autre défi important est celui de comprendre leurs propriétés et de découvrir d'autres car ces matériaux nouveaux n'ont pas encore été caractérisés de façon exhaustive comme les matériaux classiques.

Conclusion Générale :

Grâce au développement de nouvelles méthodes de fabrication, de nouvelles techniques d'analyse et grâce surtout à une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui régissent la matière, une nouvelle catégorie de matériaux avec des propriétés exceptionnelles et inédites a été développée et elle est actuellement en cours de développement. Ces matériaux couvrent les matériaux dits 'Intelligents', les matériaux spintroniques et les nouveaux matériaux carbonés comme le graphène et les fullerènes. Ces matériaux ont des applications dans des domaines aussi variés que l'électronique, l'optique-photonique, l'aérospatial, l'automobile, l'énergie, l'environnement et la santé. Ils entrent par exemple dans la fabrication des capteurs, des actionneurs, des processeurs, des dispositifs de stockage et de traitement de l'information, des transistors, des mémoires, des ordinateurs quantiques, des superconducteurs, des émetteurs d'électrons, des écrans plats et flexibles, des cellules photovoltaïques, des articles de loisirs et des dispositifs et appareils pour la santé.

Cette panoplie de propriétés et d'applications est obtenue grâce à une nouvelle approche en science des matériaux qui consiste à structurer la matière à différentes échelles : atomiques, moléculaires et supramoléculaire et aussi en combinant différents matériaux pour obtenir des propriétés nouvelles. Cette approche permet aussi de cibler à l'avance un certain nombre de propriétés dictées par une application donnée et l'exercice consiste à structurer la matière à différentes échelles pour obtenir les propriétés visées. Il faut aussi rappeler que la modélisation et les simulations numériques jouent ici un rôle crucial, car bien souvent elles permettent de trouver à l'avance les meilleures structures à fabriquer et elles prédisent aussi leurs propriétés. Ceci n'est malheureusement pas toujours possible, car les nouveaux matériaux montrent souvent des propriétés qui sortent du cadre de la physique classique et de nouvelles théories sont alors nécessaires pour comprendre les nouvelles propriétés de ces matériaux. Ces matériaux ont aussi permis de rendre les frontières entre les grandes branches de la science moins franches et on assiste de plus en plus à un travail multidisciplinaire où physiciens, chimistes et biologistes, expérimentateurs et théoriciens travaillent de concert pour comprendre, synthétiser et fabriquer et tirer profit des diverses propriétés obtenues ou escomptées.

Matériaux Intelligents : Cas des Alliages à Mémoire de Forme

Mohammed Ouadie BENSALAH ¹, Omar FASSI-FEHRI ², Yahia BOUGHALEB

¹ *Faculté des Sciences, Université Mohammed V - Agdal*

² *Collège des Sciences Physiques et Chimiques
Académie Hassan II des Sciences et Techniques*

1. Introduction

Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Il possède des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur, un actionneur ou parfois comme un processeur. Ce matériau est capable de modifier spontanément ses propriétés physiques (forme, connectivité, viscoélasticité...) en réponse à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau (variation de température, des contraintes mécaniques, de champs électrique ou magnétique). Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certains cas, provoquer une action de correction. Il devient ainsi possible de détecter des faiblesses de structures dans le revêtement d'un avion, des fissures apparaissant dans un bâtiment ou un barrage en béton (ciment intelligent), réduire les vibrations de pales d'hélicoptère, ou insérer dans les artères des filtres qui se déploieront pour réduire le risque de dispersion de caillots sanguins.

On peut grouper les matériaux intelligents selon les catégories suivants :

- Piézoélectriques : soumis à une charge électrique ou une variation de tension, ces matériaux subissent des transformations mécaniques et vice versa.
- Magnétostrictifs : lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique ils subiront des déformations mécaniques induites et vice versa.
- Fibres optiques : ce sont de bons capteurs qui utilisent l'intensité, la fréquence ou la polarisation pour mesurer la déformation, la température les champs électrique et magnétique.
- Alliages à mémoire de forme : soumis à un champ thermique ces matériaux subiront des transformations de phase qui entraîneront des déformations.

2. Alliages à mémoire de forme

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des alliages possédant plusieurs propriétés inédites parmi les matériaux métalliques : la capacité de «garder en mémoire» une forme initiale et d'y retourner même après une déformation, la possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque leur température varie autour d'une température critique, et un comportement super élastique permettant des allongements sans déformation permanente supérieurs à ceux des autres métaux. Parmi les principaux alliages à mémoire de forme, on retrouve les alliages Nickel Titane (NiTi), les alliages à base de cuivre (CuZn, CuAl, CuZnAl, CuAlBe...) et les alliages à base de Fe (FeNiTi). Tous ces alliages ont des structures et des comportements proches. Les alliages NiTi (Nitinol)

sont les plus utilisés car ils présentent des propriétés plus intéressantes (contrainte à la rupture de 1GPa, bonne résistance à la fatigue 100000 cycles à 4% de déformation, bonne résistivité et bonne tenue à la corrosion) [50, 51, 52].

La structure atomique des alliages est à l'origine de ce changement de forme en fonction de la température ou par application d'une contrainte mécanique. Ces types de matériaux préalablement modifiés à froid (phase martensitique) sont capables de retrouver, après chauffage, leurs formes initiales (phase austénitique). Les alliages à mémoire de forme (AMF) regroupent diverses propriétés :

- La super élasticité : l'alliage sous l'effet d'une contrainte est capable de se déformer jusqu'à 10% de manière réversible;
- L'effet mémoire simple sens : l'alliage est capable de retrouver par chauffage sa forme initiale après une déformation mécanique;
- L'effet mémoire double sens : l'alliage est capable après "éducation" d'avoir deux positions stables au dessus et au dessous d'une température critique T_c ;
- L'effet caoutchoutique : l'alliage dans son état martensitique subissant une déformation conserve au relâchement une déformation résiduelle ; si le matériau est à nouveau contraint puis déchargé, cette déformation résiduelle augmente;
- L'effet amortissant : l'alliage est capable d'amortir des chocs ou d'atténuer des vibrations mécaniques. En effet, l'élasticité de la phase martensitique présente un phénomène d'hystérésis qui entraîne une dissipation de l'énergie responsable de l'amortissement.

En revanche, la transformation assistée par un champ de contrainte externe met en jeu l'effet du pseudo élasticité. Il est très important de signaler que les caractéristiques intrinsèques du matériau comme le module de Young et la résistivité changent brutalement au cours de la transformation. Il est à noter que la propriété de transition de phase confère aux alliages à mémoire de forme une variété de comportements thermomécaniques. Ces comportements sont associés aux différents mécanismes de déformation par exemples : la croissance orientée des variantes de la martensite sous l'effet d'une contrainte appliquée (pseudo élasticité), mobilité des interfaces inter variantes (effet de mémoire de forme) et influence des contraintes internes (effet de mémoire double sens).

Les modélisations du comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme s'inscrivent soit dans le cadre de la thermodynamique macroscopique (approche phénoménologique) soit dans une description micromécanique qui se base sur une méthode de transition d'échelle (approche micro-macro).

En effet, l'approche phénoménologique est basée sur le calcul du potentiel thermodynamique tel que [53,54] :

$$\Delta G = W_{potentielle} - W_{élastique} - W_{chimique} - W_{interface}$$

A partir de ce potentiel, on peut calculer les forces thermodynamiques F^f sous la forme :

$$F^f = \frac{\partial \Delta G}{\partial f}(\Sigma_{ij}, T, \bar{\epsilon}_{ij}^T, f) = -B(T - T_0) + \Sigma_{ij} \bar{\epsilon}_{ij}^T - H \bar{\epsilon}_{ij}^T \bar{\epsilon}_{ij}^T f - Af$$

Avec : Σ_{ij} , T , $\bar{\epsilon}_{ij}^T$ et f sont respectivement la contrainte, la température, la déformation moyenne de transformation et la fraction volumique de martensite formée.

B , T_0 , H et A sont des constantes propres au matériau.

L'équilibre thermodynamique ($F^f = 0$) permet d'obtenir la loi de comportement des matériaux à mémoire de forme.

L'approche micromécanique est basée sur une transition d'échelle (micro- macro). En effet, à partir d'une description de la physique de transformation à l'échelle du grain on remonte pour formuler des lois constitutives de comportement des matériaux à mémoire de forme poly cristallins.

A l'échelle du monocristal la loi de comportement s'écrit [54,55,56,57] :

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= l_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} - m_{ij} \dot{T} \\ \text{Avec } l_{ijkl} &= C_{ijkl} - C_{ijrs} \sum_{m,n} \epsilon_{rs}^m (H^{*mn})^l \epsilon_{pq}^n C_{pqkl} & m_{ij} &= \alpha C_{ijkl} \delta_{kl} - C_{ijkl} \sum_{m,n} \epsilon_{kl}^m (H^{*mn})^l (B + \alpha \epsilon_{pq}^n C_{pqrs} \delta_{rs}) \\ \text{Et } H^{*mn} &= H^{nm} + \epsilon_{pq}^n C_{pqrs} \epsilon_{rs}^m \end{aligned}$$

$\dot{\sigma}_{ij}$, $\dot{\epsilon}_{kl}$ et \dot{T} sont respectivement les vitesses de la contrainte, déformation et température locales.

l_{ijkl} et m_{ij} sont des tenseurs de localisations à l'échelle du grain, C_{ijkl} , ϵ_{ij}^n et H^{nm} sont respectivement tenseur d'élasticité, tenseur déformation de transformation de la variante n et la matrice d'interaction entre les variantes. B et α sont des constantes propres au matériau. En procédant par des techniques d'homogénéisations (opérations de moyenne) on peut établir les lois de comportements macroscopiques.

En effet, les tenseurs de localisation s'écrivent :

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= B_{ijkl} \dot{\Sigma}_{kl} + b_{ij} \dot{T} \\ \dot{\epsilon}_{ij} &= A_{ijkl} \dot{E}_{kl} + a_{ij} \dot{T} \end{aligned}$$

Le comportement macroscopique se traduit par :

$$\begin{aligned} \dot{\Sigma}_{ij} &= L_{ijkl} \dot{E}_{kl} - M_{ij} \dot{T} \\ \text{Avec : } \begin{cases} L_{ijkl} = \sum_{\gamma} f^{\gamma} (l_{ijmn}^{\gamma} A_{mnkl}^{\gamma}) \\ M_{ij} = \sum_{\gamma} f^{\gamma} (m_{ij}^{\gamma} - l_{ijkl}^{\gamma} a_{kl}^{\gamma}) \end{cases} \end{aligned}$$

$\dot{\Sigma}_{ij}$, \dot{E}_{kl} et \dot{T} sont respectivement les vitesses de la contrainte, déformation et température macroscopiques

L_{ijkl} , M_{ij} , A_{mnl}^I et B_{ijkl} sont des tenseurs de localisations macroscopiques. a_j , b_j sont des tenseurs de localisations locaux. La résolution des équations se fait moyennant des techniques numériques (code éléments finis abaqus, ou autres).

3. Applications des alliages à mémoire de forme

Les domaines d'applications des alliages à mémoire de forme sont nombreux. Pour le grand public, il existe déjà des montures de lunettes, des fils dentaires en orthodontie, des thermostats, des carburateurs, des agrafes pour la réduction de fractures en chirurgie, etc.

En plus, beaucoup de mécanismes reposant sur le contrôle de la température peuvent être assurés par des alliages à mémoire. Par exemple, l'élévation de la température au-dessus d'un seuil déterminé provoque la transformation de l'alliage constituant le dispositif d'ouverture des panneaux d'une serre.

Les applications d'amortissements sont également développées en se basant sur la grande capacité d'amortissement des alliages à mémoire de forme. L'hystérisis pseudo élastique semble être très intéressant pour l'amortissement des sollicitations mécaniques provoquées par les secousses sismiques dans les constructions. Cette propriété peut être, également, utilisée dans les amortisseurs des véhicules pour mieux préserver l'état optimal des pièces mécaniques.

Un nouveau domaine d'application s'est ouvert aux alliages à mémoire de forme il s'agit des systèmes miniaturisés (dimensions de l'ordre du millimètre) incorporant des capteurs, des actionneurs et des dispositifs de traitement de l'information appelés microsystèmes. Par exemple, les micropinces qui permettent de saisir des objets biologiques de la taille des cellules. Toutefois, le procédé de mémorisation de ces alliages accuse quelques faiblesses. En effet, au bout de cent mille changements spontanés de forme, certains alliages perdent la mémoire et ne parviennent plus à retrouver exactement leur configuration initiale : effet de fatigue des alliages à mémoire de forme.

Les progrès techniques de la recherche dans ce domaine sont de comprendre et de contrôler la composition et la microstructure de ces nouveaux matériaux. Une alternative intéressante serait de combiner plusieurs matériaux à mémoire de forme (composite intelligent) pour utiliser de façon synergétique les meilleures propriétés de chacun. Les connaissances acquises en recueillant des données sur le comportement de la structure interne du cristal permettront d'accélérer le développement de nouveaux matériaux qui seront utilisés à divers fins.

4. Conclusion

Les matériaux à mémoire de forme ont des applications diverses pour la fabrication notamment de capteurs, d'actuateurs et de processeurs. Dans la catégorie des matériaux intelligents, un développement important concerne également d'autres types de matériaux comme les matériaux piézoélectriques et électroactifs. Par exemple les piézoélectriques, de type polymères, céramiques ou monocristaux, ont la propriété remarquable de convertir une contrainte mécanique en énergie électrique (effet direct) et réciproquement une excitation électrique en déformation mécanique (effet inverse). Leur domaine d'application est très vaste, car il est possible d'exploiter l'effet direct pour la fabrication

par exemple des capteurs et l'effet inverse pour la mise au point des transducteurs ou les deux alternativement.

De par la nouveauté de la technologie à base de matériaux intelligents, les perspectives d'application sont multiples et prometteuses. La réalisation de dispositifs miniaturisés électriquement autonome s'affranchissant de toute source de tension extérieure constituerait un pas important dans le développement technologique. L'intégration de polymères électro-actifs au sein des vêtements permettrait également de récupérer suffisamment d'énergie pour alimenter des capteurs à basse consommation et pourrait avoir des applications novatrices notamment dans la conception des sièges de voitures, des voiles de bateaux, des drapeaux entre autres. De nouvelles propriétés pourraient également être envisagées en combinant différents matériaux soit sous forme d'alliages et composites soit sous forme matériaux dopés pour avoir des effets synergétiques de mémoire de forme, de conductivité électrique et thermique, de propriétés magnétiques et autres propriétés combinées.

Références

- [1] Baibich, M. N. et al. *Phys. Rev. Lett.* 61, 2472–2475 (1988).
- [2] Binasch, G., Grunberg, P., et al *W. Phys. Rev. B* 39, 4828–4830 (1989).
- [3] Hirsch, J. E., *Phys. Rev. Lett.* 83, 1834 (1999) J. D. Koralek, et al., *Nature* 458, 610 (2009).
- [4] N. Mahé, et al. *Inorg. Chem.* 44, 7743 (2005).
- [5] S. Datta and B. Das, *Appl. Phys. Lett.* 56, 665 (1990).
- [6] O.Mounkachi, A.Benyoussef, A.El Kenz, H.Saidi, E.K.Hlil, *Physica A* 388, 3433 (2009)
- [7] O.Mounkachi, A.Benyoussef, A.El Kenz, E.H.Saidi, *JMMM*, (16), 2402–2406 (2009)
- [8] O.Mounkachi, A.Benyoussef, A.El Kenz, H.Saidi, E.K.Hlil, *JAP*, 106, 093905 (2009)
- [9] A.Fakhim, M.Belaiche, A.Benyoussef, A.El Kenz, E.H.Saidi, *JMMM*, 322 (2010) 454
- [10] O.Mounkachi, A.Benyoussef, A.El Kenz, H.Saidi, E.K.Hlil, *JMMM*, 320, 2760 (2008).
- [11] G. Dresselhaus, *Phys. Rev.* 100, 580 (1955).
- [12] Y. A. Bychkov and E. Rashba, *J. Phys. C* 17, 6039 (1984).
- [13] A. G. Aronov, Yu. B. Lyanda-Geller, and G. E. Pikus, *Sov. Phys. JETP* 73, 537 (1991).
- [14] T. Lis, *Acta Crystallog. Sec. B* 36, 2042 (1980).
- [15] R. Sessoli, et al, *Nature* 365, 141 (1993).
- [16] R. Sessoli, et al, *J. Am. Chem. Soc.* 115, 1804 (1993).
- [17] L. Thomas, et al. *Nature*, 383, 145 (1996).
- [18] S. Hill et al. *Phys. Rev. Lett.* 80, 2453 (1998).
- [19] Y.C. Zhong, Sarachik MP, Friedman JR, et al, *J. Appl. Phys.* 85, 5636 (1999).
- [20] O. Kahn, *Molecular Magnetism*, VCH, New York, (1993); (b) D. Gatteschi, J. Villain, R. Sessoli, *Molecular Nanomagnets*, Oxford University Press, Oxford, UK, (2006)
- [21] A. Bencini et al. *J. Am. Chem. Soc.* 107, 8128 (1985)
- [22] K. Nakatani, et al. *J. Am. Chem. Soc.* 111, 5739 (1989).
- [23] M.-L. Kahn, C. Mathonière, O. Kahn, *Inorg. Chem.* 38, 3692 (1999)
- [24] O. Guillou et al. *Inorg. Chim. Acta* 119, 198 (1992)
- [25] M. Eddaoudi et al. *Science* 295, 469 (2002)

- [26] Z. Zak, P. Unfried, G. Giester, J. Alloy Compd. 205 (1994) 235; G. Giester, P. Unfried, Z. Zak, J. Alloy Compd. 257, 175 (1997).
- [27] P. King, W. Wernsdorfer, K.A. Abboud, G. Christou, Inorg. Chem. 43, 7315 (2004).
- [28] A.J. Tassiopoulos, A. Vinslave, W. Wernsdorfer, K.A. Abboud, G. Christou, Angew. Chem. Int. Ed. 43, 2117 (2004).
- [29] A.J. Tassiopoulos et al. Chem. Int. Ed. 43, 6338 (2004).
- [30] Chen, P. et al. Preprint at <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0608453> (2006).
- [31] Fabian, J., Žutić, I. & Sarma, S. D. Phys. Rev. B 66, 165301 (2002).
- [32] Gruber et al. Science 276, 2012–2014 (1997).
- [33] Hanson, R., Gywat, O. & Awschalom, D. D Phys. Rev. B 74, 161203(R) (2006).
- [34] Chung, J. -H., et al. Phys. Rev. Lett. 101, 237202 (2008)
- [35] Kirby, B. J., et al., Phys. Rev. B , 76 205316 (2007)
- [36] Dediu, V., et al., Phys. Rev. B , 78 115203 (2008)
- [37] Drew, A. J., et al., Nature Materials 8 109, (2009)
- [38] Gajek, M. et al., Nature Materials, 6 296 (2007)
- [39] Chu, Y. -H., et al., Nature Materials, 7 478 (2008)
- [40] Wang, R. F., et al., Nature, 439 303 (2006)
- [41] Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 1. Ed. American Sci. Pub. California, USA, (2004); D.L. Miller et al. Science, 324 924, (2009)
- [42] J.M.B Lopes dos Santos, Physical Review Letters 99, 256802, (2007)
- [43] A.K Geim, K.S Novoselov, Nature Materials 6, 183, (2007)
- [44] Novoselov et al Science 306, 666, (2004)
- [45] A. K. Geim, Science, 324, 1530-1534, (2009)
- [46] Y. Zhang, YW. Tan, HL. Stormer, P. Kim, Nature 438, 201, (2005), Nature Phys, 2, 620, (2006)
- [47] E. McCann, V.I. Falko, Phys. Rev. Lett. 96, 086805, (2006)
- [48] LB. Drissi, EH. Saidi and M. Bousmina, Nuclear Physics B, 829, 523-533, (2010)
- [49] S. Vaudreuil & M. Bousmina, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 9, 488-4885, (2009).
- [50] Guenin, P.F. Gobin “Les alliages à mémoire de forme”, Matériaux et Techniques, oct-nov. 1980
- [51] G. Guenin, Alliages à mémoire de forme, Techniques de l’ingénieur, oct. 1986
- [52] E. Patoor, M. Berveiller «Les alliages à mémoire de forme”, chez Hermes, mai 1990
- [53] E. Patoor “Contribution à l’étude de la plasticité de transformation” (thèse)
- [54] M.O. Bensalah “Comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme” (Thèse d’Etat - 1992)
- [55] O. Fassi-Fehri, A. Hihi, M. Berveiller “A hardening theory in pseudo-elastic single crystals” in Int. Conf. on Martensitic Transformations, Nara, Japan 1986
- [56] A. Alhamany, M.O. Bensalah, O. Fassi-Fehri “Modelisation of the cyclic behaviour in the shape memory alloys” in Phys. Chem. News, vol. 18 (2004)
- [57] A. Alhamany, M.O. Bensalah, O. Fassi-Fehri “Thermomechanical approach in the shape memory alloys” Journal de mécanique et d’industrie (janvier 2005).

Impact de l'amélioration génétique sur la productivité des blés au Maroc

Mohammed JLIBENE ¹, Nasserlehaq NSARELLAH ¹, Mohamed BESRI ^{2,3},
Mohamed BADRAOUI ¹, Mohamed SADIKI ²

¹ Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, Maroc

² Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

³ Membre correspondant de l'Académie Hassan II des sciences et techniques.

RESUME

Les blés tendre (*Triticum aestivum*) et dur (*Triticum durum*) constituent les principaux piliers de la sécurité alimentaire au Maroc. Cultivés annuellement sur trois millions d'hectares, ils contribuent au tiers du volume consommé et aux trois quarts des besoins énergétiques de la population marocaine. Le blé tendre est principalement utilisé sous forme de pain et biscuits à une dose de 135 kg/habitant/an, et le blé dur de pâtes et semoules, à une dose de 65 kg/habitant/an. La population marocaine, estimée à 30 millions d'habitants, a un besoin annuel de 67 millions de quintaux (q), dont le tiers est importé. Pour couvrir ces besoins en blé, les rendements doivent atteindre une moyenne de 22 q/ha, moyenne qui n'est actuellement que de 14 q/ha. Dès 1921, le Maroc a mis en place un programme de sélection variétale qui a permis d'augmenter significativement les rendements potentiels de ces deux cultures (10 fois). Les améliorations génétiques apportées aux variétés incluent une meilleure résistance aux stress biotiques (maladies et ravageurs) et abiotiques (chaleur et sécheresse), une meilleure adaptation aux changements technologiques (mécanisation, fertilisation, irrigation, etc.) et une meilleure qualité. Cet article fait le point sur les différentes stratégies adoptées par les différents programmes d'amélioration et sur la contribution de l'amélioration génétique à l'augmentation de la productivité des blés. Les stratégies et les avancées obtenues sont présentées pour les périodes 1921-1979 et 1980-2009.

Mots clés : Maroc, blé, progrès génétique, résistance, stress biotique, stress abiotique

SUMMARY

Bread wheat (*Triticum aestivum*) and durum wheat (*Triticum durum*) are the main crops contributing to food security in Morocco. Grown on three millions hectares, they provide 75% of total population needs in energy, and one third of the diet. Bread wheat is mainly used for making bread and biscuits and durum wheat for pasta and semolina, consumed at a rate of 135 kg/person per year and 65 kg/person per year, respectively. The estimated 30 millions people of Morocco need 67 millions quintals of wheat grain, among which one third has to be imported. To produce this amount, an average yield of 22 quintals per hectare is needed, while the actual yield is only 14 q/ha. Starting 1921, Morocco has developed a wheat breeding program which allowed significant increase in yield potential

(ten fold). Major varietals improvements include greater resistance to biotic (diseases and insects) and abiotic stresses (heat and drought), higher adaptation to technological changes (mechanization, fertilization, irrigation, etc.), and better end use quality. The present article provides an insight on the different strategies used to develop these varieties and the contribution of wheat breeding to wheat productivity in Morocco. These strategies and advances made are presented for two periods, 1921-1979 and 1980-2009.

Key words : Morocco, wheat, genetic progress, biotic stress, abiotic stress.

I- INTRODUCTION

La population marocaine du début du 20^{ème} siècle consommait principalement de l'orge (Miège, 1924). Le blé dur était utilisé en ville et dans de rares occasions en campagne, alors que le blé tendre était surtout connu par la population des oasis avant d'être introduit d'une façon massive à l'intérieur du pays par les colons français à partir de 1912 (Grillot, 1942, Grillot, 1948). A la fin des années 80, le blé tendre est devenu le principal blé consommé (135 kg/habitant/an), suivi du blé dur (65 kg/habitant/an), et de l'orge (20 kg/habitant/an). Au début du 20^{ème} siècle, la population marocaine comptait moins de cinq millions d'habitants vivant en majorité (87%) en milieu rural. Actuellement, elle dépasse les trente millions partagés entre le milieu rural (42%) et urbain (58%) (Anonymes).

Au cours des deux dernières décennies, les blés tendre (*Triticum aestivum*) et dur (*Triticum durum*) ont couvert le tiers de la consommation totale et 75 % des besoins en glucides de la population (Anonymes, CIMMYT, 1996). Ces cultures jouent aussi un rôle non négligeable dans la trésorerie des exploitations agricoles (Fadlaoui et al. 1994). Le blé tendre est principalement consommé sous forme de pain et biscuits alors que le blé dur est consommé sous forme de pâtes et semoules.

Le Maroc, dont la population est estimée à 30 millions d'habitants, a besoin annuellement de 67 millions de quintaux (q), 40 de blé tendre, et 27 de blé dur. Afin de couvrir ces besoins, les rendements du blé tendre et du blé dur doivent atteindre les 22 q/ha, alors que les rendements moyens actuels ne sont que de 13 et 14 q/ha respectivement pour le blé dur et le blé tendre. Le déficit de rendement, de 8 à 9 q/ha est comblé par des importations qui coûtent près de cinq milliards de dirhams par an en devises (Anonymes).

Selon les campagnes, les superficies emblavées varient entre 1 et 1,2 millions d'hectares (ha) pour le blé dur et entre 1,7 et 2,0 millions d'ha pour le blé tendre. Ces superficies sont réparties sur tous les étages climatiques (montagne, aride, semi aride, subhumide, humide, oasis, zones irriguées), toutes les latitudes, longitudes et altitudes du pays. Les superficies irrigables ne représentent que 8% de la superficie totale. Conduites essentiellement sous régime pluvial, ces cultures sont sujettes à l'influence des stress abiotiques (sécheresse, froid, chaleur) et biotiques, principalement la cécidomyie (*Mayetiola destructor*), la septoriose (*Septoria tritici*), les rouilles (*Puccinia spp.*), l'helminthosporiose (*Pyrenophora tritici repentis*), et les maladies racinaires (nématodes, champignons) (Anonymes; Jlibene, 2009a; Sayoud et al. 1996).

Pour accompagner le développement de la culture du blé, un programme de sélection variétale a été mis en place en 1921, d'abord pour valoriser l'environnement naturel caractérisé par des sécheresses printanières, des coups de chergui et des attaques de

maladies foliaires (Grillot, 1942) jusqu'à la fin des années 1950, puis pour valoriser les technologies nouvelles introduites telles que la mécanisation et la fertilisation minérale, durant les années 1960 et 1970, et ensuite pour tolérer les conditions de sécheresse des décennies 1980, 1990 et 2000 (Jlibene, 2009a).

Au cours de la période 1930 - 1970, le climat a été relativement stable (Figure 1). A partir des années 80, il a connu un changement brutal, caractérisé par une réduction de la pluviométrie de 25% et une augmentation, en fréquence et en intensité, des épisodes de sécheresse (Jlibene, 2009a).

L'objectif du présent article est de faire le point sur la contribution de l'amélioration génétique à l'augmentation de la productivité des blés pour les périodes 1921-1979 et 1980-2009.

II- AMELIORATION GENETIQUE DU DES BLES AVANT 1980

Contexte bioclimatique durant la période 1930-1979

Entre 1930 et 1979, la pluviométrie annuelle, en général supérieure à 500 mm, était largement favorable à la culture du blé (Figure 1); la décennie 1930 ayant été humide avec une pluviométrie supérieure à 400 mm pour toutes les campagnes agricoles. La décennie 1940 a connu une seule année de sécheresse sévère (1944-1945) qui a provoqué une famine générale au niveau du pays. La pluviométrie annuelle des autres années était moyenne mais supérieure à 400 mm. Les décennies de 1950 à 1970, ont été marquées par une abondance de la pluviométrie, dont la moyenne fluctuait autour de 600 mm, soit 41 mm de plus que la période précédente. Durant toute la période 1950-1979, il n'y a eu que deux campagnes (1950 et 1957) où la pluviométrie est descendue légèrement en dessous de 400 mm (Figure 1).

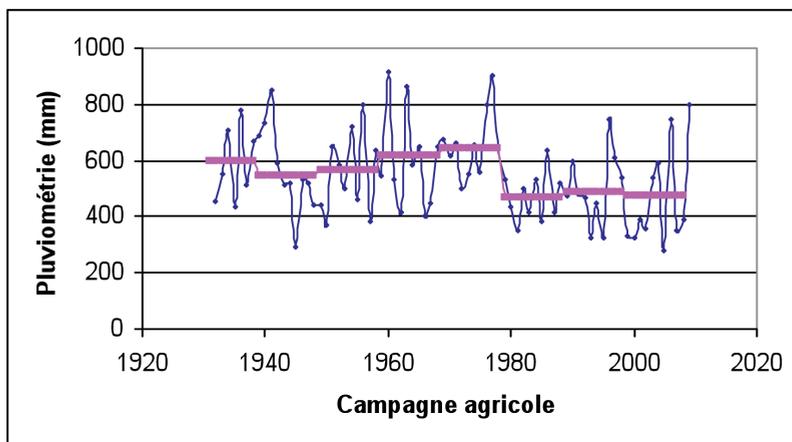


Figure 1: Distribution de la pluviométrie annuelle depuis 1931 à Meknès, indiquant une rupture à partir de 1980, et une fréquence élevée des années sèches à pluviométrie inférieure à 400mm durant les décennies 1980, 1990 et 2000 (Jlibene, 2009b). La campagne agricole commence le 1er septembre et finit fin août de l'année suivante. Les moyennes par décennie sont représentées par la ligne en rose.

Objectifs de la sélection variétale durant la période 1921-1979

Les premières variétés des années 1920 étaient tardives, donc vulnérables à la sécheresse printanière, aux coups de chergui, et à la rouille noire (*Puccinia graminis*) (Grillot, 1942; Grillot, 1948). L'obtention de variétés à maturité précoce a permis d'éviter la sécheresse et les attaques de la rouille noire. L'abondance des pluies durant les décennies 1950 - 1970, et l'introduction de la fertilisation minérale surtout azotée, ont provoqué la verse des variétés à paille haute (Tegyey, 1968). C'est probablement la raison pour laquelle les opérations de développement (labour et engrais) n'ont pas eu l'impact souhaité (Jlibene, 2009a). La rouille brune (*Puccinia triticina*) a été aussi favorisée par cette forte pluviométrie. La résistance à la verse, à travers le raccourcissement de la taille de la plante ainsi que la résistance à la rouille sont devenus les objectifs principaux de la sélection variétale. Le gène de nanisme a été identifié au Japon, introduit dans les variétés américaines, et transféré aux variétés mexicaines (Borlaug, 1953). L'introduction des variétés mexicaines au Maroc dans le cadre de l'opération 'semences' a fait surgir une nouvelle maladie foliaire, la septoriose (*Septoria tritici*), maladie qui n'avait aucune incidence sur les variétés hautes (Santiago, 1970; Scott et al. 1985). Cette nouvelle maladie a été la cause de l'échec de l'opération 'semences'. La sélection de variétés résistantes à cette nouvelle maladie est donc devenue une priorité (Jlibene, 2009a).

Approche utilisée durant la période 1921-1979

Le premier travail d'amélioration a porté sur l'organisation d'une collecte des populations de blé dans les principales régions du royaume (Miège, 1924). Des centaines de lignées ont ainsi été dérivées et purifiées. Une évaluation agronomique de leur productivité et de leur qualité technologique a été réalisée. Cette approche a permis d'obtenir des rendements pouvant atteindre 12 q/ha (Grillot, 1942; Grillot, 1948).

Parallèlement aux collectes, des centaines d'autres lignées ont été importées des pays méditerranéens et autres pays à climat similaire à celui du Maroc, et testées dans les conditions locales (Grillot, 1942; Grillot, 1948).

Progrès génétiques réalisés durant la période 1921-1979

Les anciennes variétés locales étaient des populations très hétérogènes, ayant un potentiel de production faible qui ne dépassait guère les 7 q/ha (Grillot, 1942, Miège, 1924). Les nouvelles variétés de blé dur obtenues à partir des collectes «Caid-Elaize-250», «Selbera-272», et «Maiza-0181» ou de blé tendre «Gharb007», se sont révélées être plus performantes que les anciennes, avec un potentiel de 12 q/ha.

Parmi les introductions étrangères, les variétés de blé tendre «Florence» et «Cadet», d'origine australienne, et «Pusa» d'origine indienne, ont permis d'atteindre des rendements de 19 q/ha. Cependant, pour le blé dur, les variétés importées n'arrivaient pas à rivaliser avec les variétés locales (Grillot et Casal, 1964; Tegyey, 1965).

Un progrès génétique plus conséquent a commencé à être enregistré lorsque la variabilité génétique a été créée par hybridation. Les premiers résultats de cette approche ont été obtenus dès les années 1940 : une variété de blé dur issue du croisement entre «Zrea»

et «Amekkaouï» et baptisée «Zeramek», et une autre de blé tendre «Florence Aurore» issue d'un croisement entre «Florence» et «Aurore» ont été obtenues puis largement vulgarisées (Tegyey, 1965, Tegyey, 1967). Avec un potentiel de rendement de plus de 30 q/ha, elles sont devenues, durant les années 50, les variétés vedettes jusqu'à l'apparition de nouveaux génotypes supérieurs de blé dur, comme, «Kyperounda» (BD2777) et de blé tendre comme «Pinyte» (BT2306). Ces dernières variétés vont devenir dominantes durant les années 1960. Au début des années 1970, la variété de blé tendre «Nasma» avec un potentiel de 40 q/ha est créée (Tegyey, 1972; Tegyey, 1973). Les atouts majeurs de toutes ces nouvelles variétés étaient la maturité précoce leur permettant d'éviter les coups de chergui, les sécheresses printanières et la rouille noire. En plus, leur paille relativement courte, leur permettait de mieux résister à la verse, et leur qualité supérieure du grain était très appréciée des industriels. Ces variétés vont dominer le marché jusqu'au début des années 1980 (Jlibene, 2009a).

Le plus grand progrès en matière de productivité a été réalisé grâce au raccourcissement de la tige, résultat des travaux pionniers de Norman Borlaug (Prix Nobel de la paix en 1970 et fondateur du CIMMYT (Centre International d'Amélioration du blé et du maïs, Mexique). Ces variétés courtes, à tige rigide, sont capables de tolérer des doses élevées d'azote sans verser, et ainsi produire deux à trois fois plus que leurs homologues de taille haute dans des conditions d'humidité favorable. Cette caractéristique, combinée à la résistance génétique à la rouille, a permis le lancement de la révolution verte (Borlaug, 1953, Borlaug, 1995, CIMMYT, 1996). Les variétés nord africaines ont été utilisées par Borlaug comme géniteurs dans le programme de développement des variétés qui sont à l'origine de la révolution verte (Jlibene, 2009a).

Vers la fin des années 1970, la collaboration avec le CIMMYT et plus tard avec l'ICARDA (Centre International de la Recherche Agronomique dans les Régions Arides, Alep, Syrie) a permis l'introduction de variétés possédant les gènes de nanisme, de précocité et de résistance aux rouilles noire (*Puccinia graminis*) et brune (*Puccinia triticina*). Parmi les variétés semi naines et précoces introduites du Mexique durant les années 70, les blés durs «Cocorit» et «Jori» et les blés tendres «Siete Cerros» et «Potam», ont été favorablement accueillies par les agriculteurs (Tegyey, 1968, 1972, 1973) des régions semi arides, régions où l'incidence de la septoriose est insignifiante.

III- AMELIORATION GENETIQUE DES BLES APRES 1980

Contexte bioclimatique de la période 1980-2009

Sur le plan climatique, cette période a connu une baisse brutale de la pluviométrie et une fréquence élevée de sécheresse (Figure 1). La baisse a été de 25 % par rapport aux trois décennies précédentes (1950-1979), soit 143 mm en moyenne, et la fréquence des années sèches à pluviométrie inférieure à 400 mm a augmenté de plus de 33 % contre 3% à 6 % durant les périodes précédentes (Jlibene, 2009a). Les épisodes de sécheresse à l'intérieur de l'année agricole se sont allongés, atteignant jusqu'à 90 jours sans pluie (Zeggaf et al. 2002). Associée à la sécheresse, la cécidomyie, insecte ravageur favorisé par les hivers secs et tempérés, voir chauds, a fortement pullulé, causant des dégâts catastrophiques (Sayoud, 1996).

Objectifs de sélection durant la période 1980-2009

Avant les années 1980, la cécidomyie sévissait surtout dans les régions côtières. L'infestation s'est ensuite généralisée à l'ensemble des régions céréalières du Maroc. La rouille brune et la septoriose continuaient à causer des dégâts, la première presque systématiquement toutes les saisons, et la dernière durant les campagnes humides (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). Au début des années 90, une nouvelle maladie foliaire est apparue, la rouille jaune (*Puccinia striiformis*), maladie très peu fréquente durant les années 1970 (Santiago, 1970). La rouille jaune a d'abord été observée près des montagnes de l'Atlas, avant de se généraliser à tout le pays durant la décennie 2000 (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b).

La sélection de variétés de blé tendre, productives, stables et résistantes à la rouille brune, est devenue prioritaire, dès le début des années 80 (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). Les objectifs de résistances à la cécidomyie et à la septoriose vers la fin des années 80, et ceux de résistance à la sécheresse et à la rouille jaune durant la dernière moitié des années 90 ont orienté les programmes d'amélioration (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b).

Pour le blé dur, l'amélioration de la productivité et de la stabilité des rendements a été l'objectif principal des années 80 (Nsarellah et al. 2005). Les objectifs de résistance à la cécidomyie et à la rouille brune ont été considérés durant les années 90 (Nsarellah et al. 2005).

Objectifs de sélection durant la période 1980-2009

Vers la deuxième moitié des années 80, la stratégie de sélection a complètement changé. Au lieu de développer une variété «passe partout» valable pour toutes les régions de culture, les environnements ont été subdivisés en deux grands groupes cibles : l'aride et le semi aride (environnement défavorable) et l'humide et le subhumide (environnement favorable) (Jlibene et al. 1996). Les caractéristiques variétales requises pour l'environnement défavorable incluent la résistance à la sécheresse, à la cécidomyie et à la rouille brune. Celles requises pour l'environnement favorable portent essentiellement sur la résistance à la septoriose et aux rouilles. Cette approche a cependant rencontré des difficultés dans son application : d'une part, le catalogue national ne contenait pas de dispositions spéciales pour ce genre de variétés, d'autre part l'aire de culture délimitée pour chaque variété était difficile à respecter par les utilisateurs. Enfin, l'environnement dit «favorable» n'est pas stable d'une année à l'autre, et peut devenir «défavorable» et vice versa. Ainsi, une nouvelle stratégie alternative a été adoptée en mi 90, stratégie qui reste en vigueur jusqu'à présent (Jlibene, 2009b). Cette stratégie de sélection consiste à accumuler plusieurs caractéristiques génétiques valables pour les deux types d'environnements dans la plupart des variétés.

Cette phase s'est aussi caractérisée par le renforcement des échanges du matériel végétal avec les programmes internationaux de sélection, ce qui a permis d'enrichir le patrimoine génétique national avec ces nouvelles introductions (Nsarellah et al. 2005). Le travail de l'amélioration génétique est ainsi devenu plus structuré et la recherche des ressources génétiques et leur utilisation dans les hybridations et les sélections mieux organisées.

IV- RÉSULTATS DE L'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DU BLÉ TENDRE

Variétés développées durant la période 1980-2009

Au début des années 80, le paysage agricole était dominé par la variété Nasma, productive, rustique, de bonne qualité mais vulnérable aux maladies foliaires et à la cécidomyie (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). Après dix années de culture, cette variété, connue pour sa résistance à la rouille brune est devenue, sensible à cause de l'apparition de nouveaux pathotypes plus virulents (Jlibene, 2009a).

Plusieurs variétés plus performantes que la variété dominante Nasma, ont été mises au point : Jouda, Saïs, Baraka, Khaïr, Saba, Marchouch, Kanz, Tilila et Achar (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). Grâce à ces variétés, l'opération de promotion de la culture du blé tendre lancée en 1985, a largement réussi, à l'inverse des opérations 'labour', 'engrais' et 'semence' des années 1960 et 1970 (Jlibene, 2009a). La culture du blé tendre s'est étendue à toutes les régions du pays, même aux régions arides. Parmi ces variétés, Marchouch et Achar ont connu un succès similaire à celui de Nasma (Jlibene, 2009b). Le gain génétique de la variété Marchouch a été de 4,74 q/ha en moyenne sur l'ensemble des environnements, et de 8,06 q/ha dans les conditions extrêmes de sécheresse où Nasma ne réussissait pas à produire du grain (Tableau 1). La variété Achar a apporté un gain supplémentaire par rapport à Marchouch de 4,61 q/ha, (Tableau 1).

Tableau 1. Progrès génétique (blé tendre) réalisé en matière de productivité, réponse à l'environnement et résistance à la sécheresse (Jlibene, 2009b).

Variété	Année d'inscription	Gain moyen ¹ (q/ha)	% Gain	Gain en conditions de sécheresse ¹	Réponse à l'environnement
Nasma	1973	+0,00	0 %	0,00	1,00
Marchouch	1984	+4,74	13 %	8,06	0,91
Achar	1987	+4,61	11 %	0,53	1,10
Arrehane	1997	+6,17	20 %	12,23	0,80
Nouvelles	2006	+3,01	9 %	3,30	1,00

¹Gain de la nouvelle variété par rapport à la variété qui la précède. Gain moyen est la moyenne des gains dans tous les environnements de test. Gain en conditions de sécheresse est le gain obtenu dans les environnements extrêmes où la variété témoin donne un rendement nul. Le progrès génétique annuel de rendement, tout environnement confondu, est de 0,575 q/ha/an. Le progrès génétique annuel en conditions de sécheresse extrême est de 0,78q/ha.an.

Au début des années 90, de nouvelles variétés performantes mais plus spécifiquement adaptées à l'un des environnements, favorable ou défavorable, ont été créées : Amal et

Rajae pour l'environnement favorable et Mehdiya, Massira et Tilila pour l'environnement défavorable (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). Les variétés Amal et Rajae, résistantes à la septoriose, ont été adoptées par les agriculteurs des régions du Gharb et Saïs. Mehdiya plus résistante à la sécheresse a été adoptée dans les régions de Zaer et Chaouia. Les variétés Massira et Tilila n'ont pas connu de succès, à cause du déficit dans leur commercialisation.

A la fin des années 90, deux nouvelles variétés ont été développées : Arrehane et Aguilal, résistantes à la cécidomyie et plus tolérantes à la sécheresse (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). La variété Aguilal, sensible à de nombreuses maladies foliaires, n'a pas été acceptée par les agriculteurs. Par contre, Arrehane, résistante à la fois aux maladies foliaires, à la cécidomyie et à la sécheresse, a connu un excellent succès commercial. Le gain génétique moyen de cette variété sur le champion national Achtar est de 6,17 q/ha (Tableau 1). Le gain le plus phénoménal a été enregistré au niveau des environnements de sécheresse extrême. Arrehane produit 12,23q/ha dans l'environnement le plus extrême où Achtar a été incapable de produire du grain (Jlibene, 2009b).

Le remplacement de la variété Achtar, qui continue à dominer les superficies de blé tendre, par la variété Arrehane, augmentera significativement la production, dans tous les environnements et plus particulièrement dans les environnements défavorables. La variété Arrehane n'a pas été détrônée pendant une dizaine d'années (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). A partir de 2006, de nouvelles variétés plus performantes ont été mises au point, avec un gain génétique de 3q/ha dans tous les environnements aussi bien favorables que défavorables (Jlibene, 2009b) (Tableau 1).

Progrès génétiques réalisés durant la période 1980-2009

Au cours des trois dernières décennies de sécheresse, l'amélioration génétique a permis de relever graduellement le niveau de productivité du blé tendre de 0,58 q/an (Jlibene, 2009a, Jlibene, 2009b). Le rendement potentiel a doublé, passant de 50 q/ha au début des années 80 à plus de 100q/ha. Le rendement le plus élevé a été de 120q/ha obtenu dans des conditions optimales d'alimentations hydrique et minérale.

Un progrès substantiel a été enregistré au niveau de la stabilité des rendements, grâce à l'amélioration de la résistance génétique aux parasites, ravageurs et à la sécheresse. Les variétés récentes combinent la résistance multiple à plusieurs parasites et ravageurs, particulièrement la cécidomyie (ravageur dans les régions semi arides), la septoriose et la rouille jaune (maladies dans les régions humides), et la rouille brune qui se rencontre dans toutes les régions (Jlibene, 2009b).

La résistance à la sécheresse a été améliorée graduellement, depuis le début des années 80, à un rythme moyen de 0,78 q/ha/an (Jlibene, 2009b). Les variétés les plus récentes mises au point à partir de 2006, combinent à la fois la résistance à la sécheresse et la résistance multiple aux parasites. L'utilisation de ces variétés à grande échelle, permettra potentiellement de relever le rendement national de 50 %.

V- RESULTATS D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DU BLÉ DUR

Variétés développées

Entre 1980 et 2000, dix neuf variétés de blé dur ont été enregistrées au catalogue officiel: « Marzak, Karim, Acsad-65, Belbachir, Sebou, O.Rabia, Sarif, Tensift, Massa, Isly, Tassaout, Jawhar, Anouar, Yasmine, Amjad, Tarek, Ouregh, Marjana, Tomouh ». Ces variétés sont toutes très productives, à cycle et à paille courts et parfaitement adaptées aux différentes zones agro-écologiques du Maroc. Elles sont aussi résistantes aux maladies foliaires, particulièrement aux rouilles, helminthosporioses et septorioses (Nsarellah et al. 2005). Ces variétés ont aussi une meilleure tolérance au stress hydrique et thermique. En termes de qualité du grain, cinq de ces variétés, « Oum Rabia, Jawhar, Amjad, Ouregh, Tomouh » répondent parfaitement aux exigences des industries de la semoule et pâtes.

A partir de l'année 2000, les premières variétés de blé dur tolérantes à la sécheresse et résistantes à la cécidomyie « Irden, Nassira, Chaoui, Amria et Marouane » ainsi qu'une variété résistante à la fois à la cécidomyie et à la rouille brune « Faraj » ont été mises sur le marché. Ces variétés sont issues des croisements de variétés marocaines avec des génotypes importés (Nsarellah et al. 2003a, Nsarellah et al. 2003b). En 2008, une variété de blé dur (D22M67) ayant une bonne qualité technologique a été enregistrée au catalogue national. Deux lignées avancées (D32M78, D25M78) ont été proposées au catalogue en 2008 et trois lignées (D8M78, D9M78, D27M78) ont été proposées en 2009. Ces lignées ont une bonne qualité (grain jaune demandé par les minotiers), et une bonne productivité.

Progrès génétique

Comme dans le cas du blé tendre, l'amélioration génétique du blé dur a permis d'élever le potentiel de productivité de 60 q/ha à 90 q/ha en conditions d'humidité et de fertilité non limitantes. L'amélioration de la résistance génétique aux parasites et à la sécheresse a permis de stabiliser les rendements. Les variétés récentes combinent la résistance multiple à plusieurs parasites, et ravageurs, particulièrement à la cécidomyie (Nsarellah et al. 2003a, Nsarellah et al. 2003b), à la rouille (*Puccinia triticina*) et aux pourritures racinaires (*Fusarium culmorum* et *Cochliobolus sativus*) (Mergoum et al. 1997).

La résistance à la sécheresse a été améliorée graduellement, depuis le début des années 1980 (Nsarellah et al. 2003a, Nsarellah et al. 2003b). Les variétés nouvelles ont été obtenues dans des conditions de sécheresses de plus en plus sévères depuis les années 1990.

VI- IMPACT DE L'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE SUR LES RENDEMENTS

Amélioration des rendements nationaux

Les rendements du blé dur et du blé tendre (Figure 2) ont évolué de façon similaire au cours de la période 1960-2008, avec un avantage d'un quintal en faveur du blé dur durant la période située avant 1980, et un avantage d'un quintal en faveur du blé tendre après

1980. Entre 1960 et 1970, les rendements des deux espèces ont varié entre 5 et 13q/ha selon le climat de l'année, avec une moyenne de 9q/ha (Figure 2). Ils ont ensuite augmenté de 4 à 5 q/ha au cours de la décennie 1980, pour atteindre 13q/ha pour le blé dur et 14q/ha pour le blé tendre, malgré la baisse de la pluviométrie. Ces bons rendements en périodes sèches témoignent d'une meilleure valorisation de l'eau de pluie. Au cours des décennies 1990 et 2000, les rendements ont fluctué autour de ces mêmes moyennes, avec cependant des rendements records en années favorables (en 1986, 1988, 1991, 2006, et 2009) et des rendements faibles en années de sécheresse (5q/ha en 1992, 1993, 1995, 2000, 2007). Cependant, nous pouvons considérer ces rendements faibles comme des performances pendant les sécheresses sévères qu'a connues le Maroc durant ces dernières décennies.

L'accroissement annuel moyen des rendements depuis 1980, est estimé à 0,18q/ha/an pour le blé dur et 0,19q/ha/an pour le blé tendre (Figure 2). Ce progrès est essentiellement dû au changement variétal, puisque les techniques de production (fertilisation minérale, désherbage ...) ont peu évolué pendant les deux dernières décennies.

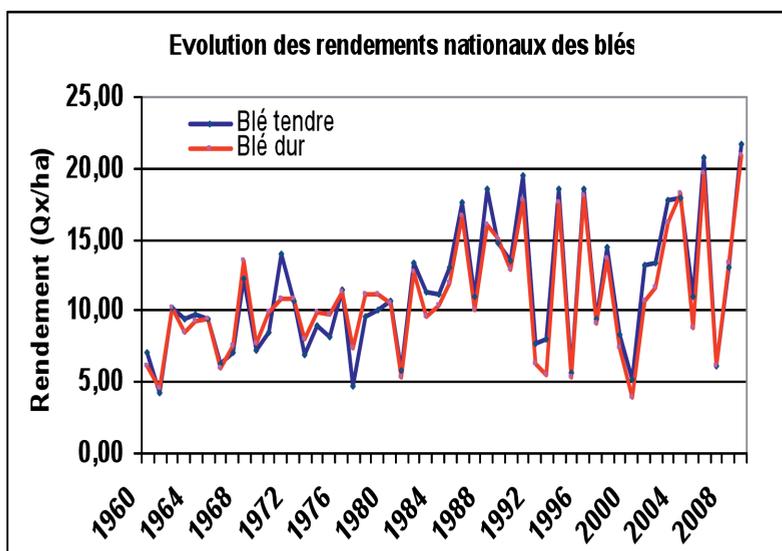


Figure 2. Evolution des rendements nationaux des blés dur et tendre de 1960 à 2009.

Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau

Le progrès réalisé en matière de rendement (Figure 2), s'explique par l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie (EUEP) (2003), laquelle dépend de la variété et des techniques de production. Depuis 1980, l'agriculture marocaine, particulièrement la production céréalière, a été révolutionnée par la mise sur le marché de variétés résistantes aussi bien aux stress biotiques qu'abiotiques. Sachant que le plus grand changement depuis 1980 a été la mise au point et l'adoption des variétés améliorées, l'amélioration de la productivité de l'eau doit provenir essentiellement de la sélection variétale. Les nouvelles variétés améliorées ont permis de valoriser l'eau de pluie.

L'EUEP a été en constante amélioration depuis 1960 (Figure 3), évoluant à un rythme moyen de 6,3 g/mm/an pour le blé tendre et par 4,8 g/mm/an pour le blé dur, passant de 1960 à 2008 de 1,67 kg/mm, équivalente pour les deux espèces, à 3,93 kg/mm pour le blé tendre et 3,42 kg/mm pour le blé dur.

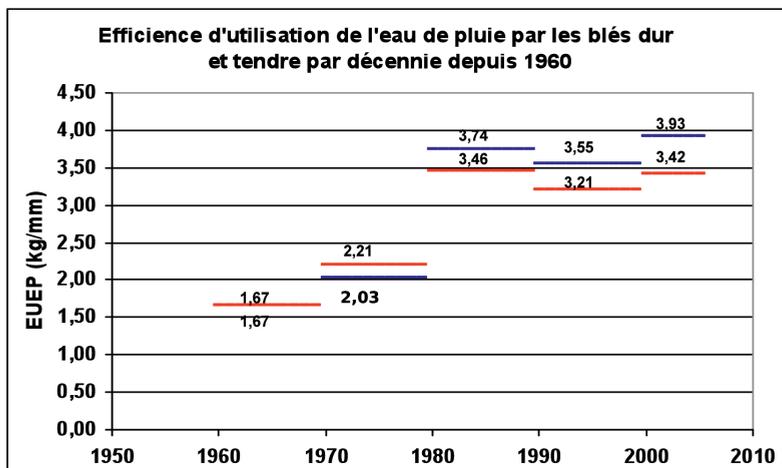


Figure 3. Evolution de l'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie par les blés, par pas de 10 ans. (lignes bleues : blé tendre, lignes rouges : blé dur)

Décalage entre progrès génétique et progrès technologique

La progression annuelle des rendements nationaux, de 0,18 q/ha/an pour le blé dur et 0,19 q/ha/an pour le blé tendre, ne représente que le tiers du progrès génétique potentiel réalisé et qui est de 0,58 q/ha.an. De la même façon, l'EUEP atteinte jusqu'à présent (3,93 kg/mm pour le blé tendre et 3,46 kg/mm pour le blé dur), ne représente que le tiers de l'EUEP potentielle que les variétés améliorées peuvent offrir et qui est de 11 kg/mm (Jlibene, 2009b).

Ce décalage entre le progrès génétique et le progrès réalisé au niveau de la production peut être fortement réduit par l'encouragement de l'utilisation de semences sélectionnées, d'encadrement, de vulgarisation, de limitation du nombre de variétés utilisées, enfin par le raccourcissement du temps de développement et de la mise sur le marché de la variété.

Semences sélectionnées:

Les 400.000 q de semence de blé tendre et 200.000 q de blé dur vendus en moyenne chaque année, ne permettent de couvrir que 15% des superficies en blé tendre et 11% en blé dur, sur la base d'une dose de semis de 1,5 q/ha. Ces taux sont très en deçà du minimum requis de 30%. Dans le cadre du plan 'Maroc Vert' il est prévu de doubler la quantité de semences sélectionnées produites.

Utilisation d'un nombre limité de variétés:

Parmi toutes les variétés améliorées et mises sur le marché (une soixantaine par espèce), un nombre limité (3 à 4 /type de blé) domine le marché des semences sélectionnées: Karim, Marzak et Vitron pour le blé dur, et Achar, Marchouch, Tigre et Mehdia pour le blé tendre. La plus récente de ces variétés est vieille de 20 ans.

Temps de développement d'une variété:

Le développement d'une variété de blé demande 13 années d'expérimentation, 2 années pour l'inscription au catalogue, 2 années pour céder la variété au multiplicateur, enfin 3 à 5 années pour multiplier la semence. Entre le développement et la mise sur le marché, la durée est donc de 20-22 ans. Dans d'autres programmes de sélection à travers le monde, la variété est développée en 8 ans, cataloguée et multipliée en moins de 6 ans.

Temps de transfert:

Lorsque la variété est développée, il faut 8 à 10 ans pour la transférer aux agriculteurs : 2 ans de multiplication de semence, 2 ans de pré tests chez les agriculteurs pilotes, et 4 à 6 ans pour la vulgarisation. Cette durée peut être réduite de 4 ans.

Manque à gagner:

Avec le système actuel, un minimum de 10 ans de retard est enregistré ce qui correspond à un manque à gagner de 5.8 q/ha pour les 10 ans de retard, ou 17,4 millions de q/an sur les trois millions d'hectares de blé, soit plus de 5 milliards de dirhams.

VII- PERSPECTIVES**Défis futurs**

En ce début du 21^{ème} siècle, la culture du blé au Maroc devra affronter de nombreux problèmes parmi lesquels nous pouvons citer :

1. Accentuation de la sécheresse
2. Augmentation des températures
3. Augmentation de la concentration en gaz carbonique
4. Introduction de nouvelles technologies
5. Emergence de nouveaux parasites et ravageurs
6. Apparition de nouvelles races physiologiques
7. Exigences en qualité

Toutes les projections climatiques (Gommes *et al.* 2009), établies pour la région méditerranéenne, convergent vers l'avènement d'un climat plus aride au cours du 21^{ème} siècle. Cette aridité aura des conséquences négatives sur les ressources hydriques et sur les niveaux de productivité des terres et des cultures pluviales. La moindre goutte d'eau doit être valorisée par la culture. Les variétés futures doivent par conséquent être plus efficaces dans l'utilisation de l'eau. Selon ces mêmes modèles, la chaleur augmentera

de quelques degrés, accentuant le stress thermique sur la culture du blé, exigeant de la variété une plus grande tolérance à la chaleur. L'augmentation du CO₂ dans l'air doit se répercuter par une augmentation de la biomasse et donc du rendement. Les recherches dans ce domaine sont encore à ces débuts.

Les technologies d'économie de l'eau en zones pluviales comme le semis direct ou en zones irriguée et humides comme le semis en paillasse, ont des chances d'être adoptées au Maroc. Cependant, ces nouvelles technologies présentent aussi des inconvénients. Le semis direct par exemple, s'il améliore la productivité et la fertilité des sols, favorise le développement de ravageurs, de maladies foliaires telles que l'helminthosporiose et les pourritures racinaires. Des variétés adaptées à ces nouvelles conduites techniques devront donc être produites.

En termes de méthodologies et d'approches, il y a lieu de tirer bénéfice des développements actuels et futurs des technologies de marquage moléculaire et des techniques de physiologie analytique, en accentuant l'intégration de ces outils dans les programmes d'amélioration génétique.

Avec l'amélioration, du niveau de vie et la diversification du marché, les consommateurs deviennent de plus en plus exigeants en matière de qualité. Les variétés de demain devront répondre à cette exigence aussi bien des consommateurs que des industriels.

VIII- CONCLUSION

Tout programme d'amélioration génétique nécessite un investissement en moyens humains et matériels, ainsi qu'une coopération régionale et internationale. L'investissement dans l'amélioration génétique a été extrêmement rentable, le taux de rentabilité interne étant de 39% pour le blé tendre et 25% pour le blé dur (Azzam et al. 1997, Fadlaoui et al. 1994). Ces taux montrent que chaque dirham investi dans la recherche variétale rapporte l'équivalent de 10 dirhams supplémentaires (Belaid et al. 2005). Cette rentabilité est sûrement plus élevée actuellement. En effet, ces études ont porté sur des variétés anciennes telle que 'Saada' dont le potentiel de productivité est faible (Jlibene, 1992); elles doivent donc être reprises pour prendre en compte les variétés plus récentes et plus performantes. La résistance du blé dur à la cécidomyie, utilisée essentiellement dans les régions semi arides, peut potentiellement rapporter, dans ces régions, un bénéfice de 1,14 milliards de dirhams (Laamari et Nsarellah, 2005).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Anonymes. Toutes années. Statistiques du Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime. Rabat, Maroc.
2. Azzam, A., S. Azzam, S. Lhaloui, A. Amri, M. El Bouhssini, et M. Moussaoui. 1997. Economic returns to research in Hessian fly resistant bread wheat varieties in Morocco. *J. Econ. Entomol.* 90 : 1-5.

3. Belaid A., N. Nsarellah, A. Laamari, M. Nachit, and A. Amri. 2005. Assessing the economic impact of durum wheat research in Morocco. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, ICARDA. Aleppo, Syria. 50 pp.
4. Borlaug, N.E. 1953. New approach to the breeding of wheat varieties resistant to *Puccinia graminis tritici*. *Phytopathology*, 43: 467.
5. Borlaug, N.E. 1995. Wheat Breeding at CIMMYT. Commemorating 50 years of research in Mexico for global wheat improvement. Wheat Special Report No 29. P. IV-VI.
6. CIMMYT. 1996. CIMMYT 1995-96 world wheat facts and trends: understanding global trends in the use of wheat diversity and international flows of wheat genetic resources. Mexico, DF.
7. Fadlaoui, A., A. Azzam, S. Azzam, S. Lhaloui, A. Amri, M. El Bouhssini, et M. Moussaoui. 1994. Rentabilité de recherches agricoles: cas des variétés résistantes à la cécidomyie. In Proceedings de La Conférence sur "Acquis et perspectives de la recherche agronomique dans les zones arides et semi-arides". Rabat, 246-27, Mai 1994. Maroc. Pages: 483-487.
8. Gomme R., T. El Hairech, D. Rosillon., R Balaghi., H. Kanamaru., 2009. Etude Banque Mondiale/Maroc/FAO sur l'impact des changements climatiques sur le secteur agricole au Maroc. Composante impact des changements climatiques sur les rendements agricoles au Maroc. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome, Italie, 105p. http://ext-ftp.fao.org/SD/Reserved/Agromet/WB_FAO_morocco_CC_yield_impact/report/
9. Grillot, G.; 1942. La bataille du blé: le choix des variétés. *La Terre Marocaine* 153: 8-10.
10. Grillot, G. 1948. Les blés du Maroc. *La Terre Marocaine* 224: 173-184.
11. Grillot, G. et L. Cazal, 1964. Variétés sélectionnées de céréales cultivées au Maroc. 2nd Edition. Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat.
12. Jlibene, M., 1992. Agronomic evaluation of the Hessian fly resistant wheat cultivar SAADA in Morocco. *Al Awamia* 77: 147-160.
13. Jlibene M., A. Amri, M. El Bouhssini, and O. G. Ferrara, 1993: Status of breeding wheat resistant to Hessian fly and *Septoria tritici* blotch in Morocco. Paper presented to the 8th International Wheat Genetics Symposium, Beijing, China, 20-25 July 1993.
14. Jlibene M., M. Mergoum, M. Belhadri, M. Mekni, E. Smith. 1996: La variété de blé tendre 'Tilila' combine souplesse et productivité. *Al Awamia* 92: 7-14.
15. Jlibene M., 2009a. Amélioration génétique du blé tendre à l'aube du 21^{ème} siècle. Editions INRA. 2009. 60 pages.
16. Jlibene M., 2009b. Options génétiques d'adaptation du blé tendre au changement climatique au Maroc: variétés à résistance multiple. Document présenté dans le cadre du Grand Prix Hassan-2 de l'Innovation dans le Domaine Agricole. 2009.
17. Laamari A. et Nsarellah N. 2005. Evaluation du gain économique des variétés de blé dur résistantes à la cécidomyie. Rapport particulier de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat Maroc, et l'ICARDA, International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas. (Projet IRDEN), 7 Pages.

18. Miege, E. 1924. Sur les divers *Triticum* cultivés au Maroc. Bulletin de la Société des Sciences naturelles au Maroc. Tome IV n°5 et 6. 30 juin 1924.
19. Mergoum M., Nsarellah N. and M. M. Nachit. 1997. Evaluation of durum wheat germplasm resistance to root rot and foot rot disease complex (*Fusarium culmorum* and *Cochliobolus sativus*) in Morocco. Plant genetic resources Newsletter. 109 :11-14.
20. Nsarellah N., A. Amri, M. M. Nachit, M. El Bouhssini, and S. Lhaloui. 2003a. New durum wheat with Hessian fly resistance from *Triticum araraticum* and *T. carthlicum* in morocco. Plant Breeding. 122: 435-437.
21. Nsarellah N., A. Amri, M. M. Nachit, M. El Bouhssini, et S. Lhaloui. 2003b. Transfert de la résistance à la cécidomyie des sources de blé tendre H5, H11 et Pi321644 au blé dur. Al-Awamia 103.
22. Nsarellah N., Amri A. et M. Nachit. 2005. L'amélioration génétique du blé dur au Maroc. Chapitre In. Abbad F. A. ed. « l'amélioration génétique des cultures, Acquis et perspectives ». Institut National de la Recherche Agronomique. INRA. Rabat, Maroc.
23. Rasmusson, D. C., Nachit M. and Jlibene M., 1988. Durum wheat improvement program in Morocco: review and recommendations. Review requested by the Director of INRA, Rabat, Morocco.
24. Santiago, F. 1970. Resultado das observacoes efectuadas en Marroc ena Tunisia respeifantes as doencas e pragas does cereals, principalmente em relacao aos trigos Mexicanos cultivados nestes paises: missoes de estudo relizados em 1969 a expensas das Missoes Americanas de auxilio tecnico a Marracos e Tunisia. Elvas, Portugal, Estacao de Melharamente de Plantas. 22 pp
25. Sayoud R. Ezzahiri B. et Bouznad Z. 1996. Les maladies des céréales et légumineuses alimentaires au Maghreb. Guide pratique. Projet Maghrébin sur la surveillance des maladies et le développement de germoplasme résistant des céréales et de légumineuses alimentaires. PNUD RAB/91/007. Maroc Algérie Tunisie.
26. Schaller, C. Rasmusson, D. C., and Srivastava, J. 1982. The review and recommendations on the cereal improvement program of Morocco. Review organized by ICARDA at the request of the Director of INRA, Rabat, Morocco. Rapport interne. 11 pages.
27. Schaller, C., Scharen A. L., and Srivastava J., 1986. Cereal improvement program in Morocco: review and recommendations. Review organized by ICARDA at the request of the Director of INRA, Rabat, Morocco. Rapport interne. 8 pages.
28. Scott, P.R., Benedikz, P.W., Jones, H.G. & Ford, M.A. 1985. Some effects of canopy structure and microclimate on infection of tall and short wheat by *Septoria nodorum*. Plant Pathol., 34: 578-593.
29. Tegye, L. 1965. Quelques observations sur l'amélioration des blés. Al Awamia 16:23-42.
30. Tegye, L., 1967. Amélioration des blés durs au Maroc par hybridation interspécifique. Al Awamia 24: 67-82.
31. Tegye, L. 1968. Le comportement des blés tendres mexicains au cours de la campagne 1968-69. Al Awamia 26 : 51-54.

32. Tegye, L., 1972. Variétés, états des travaux de sélection et de recherche. Les Cahiers de la Recherche Agronomique 31: 33-39.
33. Tegye, L. 1973. Sélection et expérimentation des céréales d'automne au Maroc. Rapport d'activité pour la période 1960-1973. Direction de la Recherche Agronomique (INRA actuellement).
34. Zeggaf, T. A., Nsarellah, N., Hadrabach, D., Baidani, A. 2002. Caractérisation de la variabilité spatiale du climat marocain en relation avec la productivité des céréales a petites graines. *Hommes Terre & Eaux*, 32(124):84-90.

La Recherche en Amélioration Génétique Ovine au Maroc : Principaux Acquis et Conséquences sur le Développement de la Production Ovine

Ismail BOUJENANE ¹, Moussa EL FADILI ², Fouad GUESSOUS ³,
Mohamed BADRAOUI ⁴ et Mohamed SADIKI ⁵

^{1,3,5} Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

^{2,4} Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, Maroc

Résumé

Le présent chapitre est une synthèse des principaux travaux de recherche qui ont été menés dans le domaine de l'amélioration génétique ovine au Maroc. Ces recherches ont permis une meilleure caractérisation des principales races ovines locales, une bonne connaissance de leurs potentialités génétiques et un début de réponse à leurs origines génétiques. Elles ont permis également d'élucider le déterminisme héréditaire de la haute prolificité de la race D'man et d'initier l'étude des profils génétiques des races locales pour ce qui est de la résistance à la tremblante du mouton. L'estimation des paramètres génétiques et le développement d'index de sélection, utilisés pour la prédiction du mérite génétique des ovins, ont facilité la sélection des reproducteurs de qualité sur le terrain et la mise en place de schémas de sélection. L'adoption du croisement terminal simple ou à double étage, qui utilise les brebis croisées D'man x race locale, a amélioré la productivité des brebis et aussi la croissance et le développement musculaire des agneaux, en comparaison avec l'élevage en race pure. Le développement en station des races synthétiques, ayant 50 % du sang D'man et 50 % du sang d'une race locale, et les premiers résultats de transfert chez les éleveurs ont permis de souligner l'intérêt de cette voie pour exploiter des animaux plus productifs et adaptés pouvant être élevés comme une race locale pure. L'utilisation de la génétique moléculaire dans le futur permettra d'affiner encore plus la connaissance de nos races locales et de leurs potentialités. Il apparaît ainsi que le Maroc a pu accumuler jusqu'à maintenant des résultats significatifs scientifiques et de recherche/développement en amélioration génétique ovine. Néanmoins, les équipes et les programmes mobilisés doivent être plus appuyés et renforcés à l'avenir afin de garantir leur pérennité surtout au regard des ambitions importantes affichées par le Plan Maroc Vert pour la filière ovine.

Mot-clés : Ovins; Amélioration génétique; Sélection; Croisement; Race synthétique; Prolificité; Productivité; Génétique moléculaire; Maroc.

Summary

This chapter is a synthesis of the main researches that were conducted on sheep breeding in Morocco. These programs allowed a better characterization of the most important locale sheep breeds, a good knowledge of their genetic potential and an answer to their genetic origins. Also, they elucidated the inheritance of the high prolificacy of D'man breed and initiated studies on the genetic profiles of the locale breeds with regard to their resistance to scrapie. Estimation of genetic parameters and development of selection indexes, used for predicting the genetic merit of sheep, made easier animal selection on the field and helped in setting up selection schemes. The use of two-way or three-way terminal crossbreeding, that included D'man x locale breed ewes, had improved productivity of ewes as well as growth and muscular development of lambs, compared to pure breeding system. The development at stations of synthetic breeds, having 50% D'man genes and 50% locale breed genes and the first results of transfer to farmers emphasized the interest of this way for exploiting the well adapted animals that can be raised as a locale pure breed. The use of molecular genetics in the future will better improve knowledge of locale breeds and their potential. It appears that Morocco has accumulated until now some significant basic and applied results in sheep genetic improvement. Nevertheless, teams and programmes raised should be enhanced and reinforced in the future in order to guarantee their durability mainly with regard to important ambitions displayed by the "Morocco Green Plan" for the sheep sub-sector.

Keywords: Sheep; Genetic improvement; Selection; Crossbreeding; Synthetic breed; Prolificacy; Productivity; Molecular genetics; Morocco.

1. Introduction

Le cheptel ovin au Maroc constitue une véritable richesse nationale. C'est un secteur dont le poids socio-économique est important. Le nombre d'exploitants pratiquant l'élevage ovin s'élevait en 1998 à 781.560, soit 52% du nombre total des exploitants agricoles et 71% de ceux pratiquant l'élevage (MADRPM, 1998). L'élevage des ovins est rencontré dans toutes les régions du pays où il constitue parfois la source essentielle de revenu des agriculteurs. De plus, 60 à 70% de la population rurale est concernée par cet élevage dont 27% vit exclusivement de cette activité. Le cheptel ovin exploite les zones de parcours et les zones marginales. De plus, la célébration de la fête de l'Aïd Al Adha implique le sacrifice de plus de 4 millions de têtes chaque année.

L'effectif actuel des ovins est estimé à près de 17,0 millions de têtes (MAPM, 2008). Les mâles représentent 22% et les femelles 78% de l'effectif global. Cet effectif diminue de façon importante en année de sécheresse et se rétablit rapidement en année normale car il est fortement tributaire des parcours pour son alimentation et donc des conditions climatiques.

Le patrimoine ovin national est riche et varié. Il est caractérisé par une grande diversité de races bien adaptées aux conditions du milieu. Il est composé pour 99% du type dit «local» qui est constitué de 57% d'ovins purs et 43% d'ovins dits «communs». Par ailleurs, 40% des ovins purs ont un standard bien défini, le reste est composé de populations non standardisées qui regroupent surtout les ovins dits de montagne.

Actuellement, la production de viande ovine est de 120.000 tonnes, soit 32% de la production totale de viandes rouges et 15% de la production totale de viandes (MAPM, 2008). Cette production est appelée à augmenter de 2,5% par an afin de pouvoir satisfaire les besoins de la population humaine à l'horizon 2020. La quantité de laine produite s'élève à 40.000 tonnes/an (FAO, 2007). La quasi-totalité du lait des brebis est utilisée pour l'allaitement des agneaux ; une très faible quantité est destinée à la consommation humaine.

La productivité des ovins au Maroc est faible à peine 0,8 agneau sevré par brebis/an, soit une moyenne de production de viande de 12 kg/brebis/an. Cette faible productivité est due aux faibles performances de reproduction des brebis, et de croissance et de viabilité pré- et post-natale des agneaux. Elle est aussi due à la conduite extensive des troupeaux dans les zones de parcours, au manque de reproducteurs sélectionnés et au non développement de schémas de production performants. Ainsi, l'augmentation de la productivité des ovins nécessite des actions d'amélioration importantes et de longue durée. La 1^{ère} action consiste à l'amélioration du mode de conduite des ovins afin qu'ils extériorisent leur potentiel génétique, et la 2^{ème} action a trait à l'utilisation des techniques d'amélioration génétique objectives et adaptées. Dans ce sens, deux méthodes sont utilisées pour améliorer génétiquement les performances des animaux : la sélection en race pure et le croisement.

L'objectif de ce chapitre est de rapporter de façon succincte les principaux acquis de la recherche dans le domaine de l'amélioration génétique ovine dans notre pays, afin de s'enquérir de ce qui a été réalisé et de dégager pour le futur les aspects prioritaires sur lesquels les programmes de recherche devraient se focaliser.

2. Ressources génétiques ovines

2.1. Caractérisation phénotypique

Après la création de l'Association Nationale Ovine et Caprine (ANOC), plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à la définition des standards des principales races ovines et à l'évaluation de leurs performances de reproduction et de production. Ces travaux ont permis ainsi de distinguer quatre groupes de races et populations ovines.

2.1.1. Races locales rustiques standardisées

Il s'agit des races Timahdite, Sardi, Béni Guil, Boujaâd et Béni Ahsen. Ces races sont localisées dans différentes régions et chacune occupe une zone géographique, délimitée légalement, appelée «berceau de la race» (Boujenane, 1999). Elles ont été caractérisées et standardisées chacune sur le plan phénotypique. Les animaux ont tous une toison blanche, une queue fine et un cornage chez les béliers. À l'exception de la race Béni Ahsen, les quatre autres races sont intégrées dans le programme national d'amélioration génétique et elles sont prises en charge dans leurs zones berceaux par un réseau d'éleveurs sélectionneurs encadrés par l'ANOC.

2.1.2. Populations ovines non standardisées

Les travaux réalisés ont permis d'inventorier plus de 15 populations peuplant les zones de montagnes : Aït Barka, Aït Hdidou, Aït Mohad, Aknoul, Marmoucha, Tounfite et Siroua; les zones de plaines et de plateaux : Tadla, Béni Meskine, Harcha, Tousint, Zoulay, Doukkala-Abda et Zemmour. D'autres variantes sont issues de brassages génétiques entre ces populations, comme les types Rehamna-Sraghna et Zemrane (Boujenane, 1999). Les ovins de ces populations sont également tous à queue fine et la majorité est à toison blanche. Ces animaux, élevés quasiment sur parcours, sont très rustiques et s'adaptent bien aux conditions difficiles. Les informations sur ces populations sont fragmentaires et les études de caractérisation et d'évaluation de leurs performances sont rares. Cependant, ces populations constituent une diversité génétique indéniable et méritent une attention toute particulière ainsi que des mesures urgentes pour leur conservation.

2.1.3. Race locale prolifique D'man

La race D'man constitue un atout majeur pour l'élevage national grâce à ses aptitudes de reproduction exceptionnelles (Boujenane, 1996). Elle représente 3,4% du cheptel national. Elle est rencontrée dans les vallées de Ziz, Dadès et Draa. Les animaux de la race D'man sont à queue fine, ils ont une petite taille et une toison colorée. Les béliers et les brebis n'ont pas de cornes. La race D'man est conduite en stabulation permanente dans des troupeaux de 4 à 8 brebis. En dehors des oasis, cette race présente des difficultés d'adaptation dans les conditions de parcours, ce qui la différencie des races locales rustiques (El Fadili, 2005b). La race D'man est également intégrée au programme national d'amélioration génétique en race pure et elle a été largement utilisée dans les plans de croisement avec les races locales standardisées.

2.1.4. Races améliorées d'origine européenne

Les races améliorées d'origine importée ont été introduites au Maroc depuis les années 1930. Elles sont bien fixées et caractérisées dans leurs pays d'origine. Leurs effectifs au Maroc sont négligeables. Ces races ont été testées en élevage en race pure et intégrées au programme national d'amélioration génétique. Elles sont surtout exploitées pour la production des béliers utilisés en croisement industriel. Il s'agit des races Ile-de-France, Mérinos Précoce, Suffolk, Lacaune viande et tout récemment la race Texel belge. Signalons que d'autres races comme Causse du lot, Suffolk, Noir de Velay et Berrichon de Cher n'existent plus au Maroc.

2.2. Caractérisation zootechnique

De nombreux travaux de recherches ont été réalisés dans les stations expérimentales de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV Hassan II), de l'Institut Nationale de la Recherche Agronomique (INRA) et les fermes de sélection de l'Etat sur les principales races locales pour évaluer leurs performances de reproduction et de production.

2.2.1. Performances de reproduction

Les nombreux travaux de recherche réalisés au Maroc ont tous montré que la race D'man présente des qualités reproductives exceptionnelles qui la différencient nettement des autres races locales (Boujenane, 2006) : âge à la puberté précoce (7 contre 10 mois), saison sexuelle longue (10 contre 8 mois), anœstrus post-partum court (50 contre 80 jours), nombre d'agnelages par an élevé (1,4 contre 0,9). De plus, la race D'man se distingue par sa prolificité élevée (Tableau 1) due à un taux d'ovulation et à une viabilité embryonnaire, à un même taux d'ovulation, plus élevés que ceux des autres races locales (Boujenane et al., 1991c; El Fadili et al., 2008).

Par ailleurs, la productivité pondérale au sevrage est en moyenne de 20,2 kg pour les brebis de races locales rustiques et de 22,8 kg pour les brebis de race D'man (El Fadili, 2006a). Cependant, conduite en bergerie toute l'année dans son berceau, la race D'man a réalisé une productivité de 43,5 kg de PV/brebis (Kerfal et al., 2005), alors que les races Boujaâd et Sardi ont sevré respectivement 27,9 kg et 26,9 kg de PV/brebis (Chikhi et Boujenane, 2003a,b).

Tableau 1. Moyennes des performances de reproduction des brebis des races locales standardisées¹

Race	Age au 1 ^{er} agnelage (mois)	Fertilité (%)	Taille de portée à la naissance	Taille de portée à 90j	Productivité pondérale à 90j (kg)
D'man	15,8	85	1,82	1,53	22,8
Timahdite	23,9	85	1,05	0,95	17,9
Béni Guil	25,3	86	1,09	0,97	17,5
Sardi	19,9	93	1,10	1,04	23,1
Béni Ahsen	24,9	87	1,11	0,79	15,9
Boujaâd	-	98	1,14	1,10	26,9

¹ Moyennes calculées à partir des résultats de plusieurs travaux de recherche.

2.2.2. Performances de croissance et de mortalité

Les résultats des différents travaux de recherche (Boujenane, 2006) ont montré que les poids et les gains moyens quotidiens (GMQ) des agneaux de races locales standardisés sont comparables à tous les âges, sauf ceux des agneaux de race D'man qui sont légèrement faibles, en raison de la taille de la portée élevée de leurs mères (Tableau 2). Les poids des agneaux des six races locales standardisées sont en moyenne de 3,05 kg à la naissance, 8,1 kg à 1 mois, 16,3 kg à 3 mois, 24,5 kg à 6 mois et 34 kg à 12 mois. Pour ce qui est des GMQ, ils sont de 162 g entre la naissance et 1 mois et de 138 g entre 1 et 3 mois.

La moyenne de la mortalité entre la naissance et 90 jours des agneaux de races locales (Tableau 2) avoisine 8% (Boujenane, 2006).

Tableau 2. Moyennes des performances de croissance des agneaux des races locales standardisées ¹

Race	Poids à la naissance (kg)	Poids à 90 j (kg)	GMQ0-30j (g)	GMQ30-90j (g)	Mortalité 0-90j (%)
D'man	2,14	14,8	144	134	11,0
Timahdite	3,52	17,4	177	146	9,0
Béni Guil	3,22	15,3	155	121	6,5
Sardi	3,46	20,1	166	146	8,0
Béni Ahsen	3,55	16,0	183	122	7,5
Boujaâd	3,89	21,8	213	190	8,0

¹ Moyennes calculées à partir des résultats de plusieurs travaux de recherche.

2.2.3. Performances d'engraissement et caractéristiques de la carcasse

La majorité des travaux de recherche se sont intéressés à l'engraissement des agneaux juste après leur sevrage pour une période de 1 à 3 mois maximum (Boujenane, 2006; Chikhi et Boujenane, 2005). Le gain moyen quotidien à l'engraissement a varié de 142 à 283 g/j, la quantité d'aliments ingérés de 0,78 à 1,36 kg de MS/agneau/jour et l'indice de consommation de 4,7 à 6,7. Les travaux menés à la station d'El Koudia (El Fadili, 2001; 2005b; 2006b; 2009a), sous les mêmes conditions de conduite, ont montré des performances à l'engraissement similaires chez les races locales ; le GMQ à l'engraissement est en moyenne de 197 g/j et l'indice de consommation est en moyenne de 5,6 (Tableau 3).

Le poids à l'abattage a varié de 25,8 à 45,5 kg pour des poids de carcasses allant de 12,2 à 23,2 kg. Le rendement en carcasse a varié de 46,7 à 50,9% et le poids du gras mésentérique de 545 à 752 g (Boujenane, 2006). La comparaison des caractéristiques de la carcasse des races locales dans des conditions de conduite similaires et d'abattage d'agneaux à un âge comparable d'environ 145 jours (El Fadili, 2001; 2005b; 2006b; 2009a) a permis de constater que la race Béni Guil présente la carcasse la plus grasse, suivie par la race Timahdite mais avec des carcasses mieux conformées (Tableau 3). Quant à la race Sardi, elle est la moins conformée est aussi la plus maigre. De même, les races Timahdite et Boujaâd présentent un bon développement musculaire. Cependant, la race D'man a présenté des carcasses plus grasses et moins conformées (El Fadili, 2001; Boujenane, 2006).

Tableau 3. Performances d'engraissement et caractéristiques des carcasses des principales races locales pures ¹

Race	GMQ à l'engrais (g/j)	Indice de consommation (kg d'aliments/kg gain de poids)	Poids carcasse (kg)	Conformation (points)	Compacité (%)	Gras Dorsal (mm)	Gras mésentérique (g)	Longissimus Dorci (cm ²)
Timahdite	209	5,45	15,70	4,55	27,8	2,32	790	12,5
Sardi	192	5,76	14,37	3,50	23,2	1,60	461	11,0
Beni Guil	195	5,45	14,95	4,26	27,0	3,02	756	10,2
Boujaâd	193	5,25	13,80	3,43	25,6	2,48	502	12,6
D'man	196	6,14	14,73	3,05	27,0	1,98	900	10,2

¹ Résultats obtenus à partir de comparaisons dans les mêmes conditions d'élevage d'El Koudia.

2.2.4. Production laitière

De nombreux travaux se sont intéressés à l'estimation de la production et la caractérisation de la composition du lait des races ovines locales (El Fadili, 2006a). La production laitière en 12 semaines, estimée par les méthodes PAAT (pesée avant et après tétée) et d'oocytocine, a varié de 58,3 à 123,4 kg pour la race Timahdite; de 52,3 à 78,3 kg pour la race Béni Guil; de 59,3 kg pour la race Sardi ; de 80,3 à 113 kg pour la race D'man et de 57,4 à 77,3 kg pour la race Béni Ahsen (Boujenane, 2006). Ainsi, il apparaît que la production laitière des races locales est similaire et faible, indiquant que les races locales sont non laitières et sont destinées à la production de viande. Par ailleurs, le pourcentage de matières grasses du lait des brebis D'man, Sardi et leurs croisées a varié de 6,43% à 8,58% (Boujenane et Lairini, 1992).

2.2.5. Production de la laine

Les poids de la toison des ovins de races locales varient de 1,7 à 2,6 kg pour la race Timahdite, de 1,7 à 2,5 kg pour la race Béni Guil, 1,6 à 2,1 kg pour la race Sardi, de 0,25 à 2,8 kg pour la race D'man, de 1,8 à 3,5 kg pour la race Béni Ahsen et de 1,6 à 3,5 kg pour la race Boujaâd (Boujenane, 1999). Il apparaît que la race Béni Ahsen possède des aptitudes lainières intéressantes. C'est pourquoi des efforts sont nécessaires pour sa sauvegarde et sa sélection sur ce caractère.

2.3. Caractérisation génétique

L'étude de la variabilité génétique intra et entre races ovines locales, en vue d'établir les programmes d'amélioration des races les plus intéressantes et des programmes de conservation des races menacées d'extinction, a été réalisée par les techniques du polymorphisme en utilisant soit les protéines sanguines soit les microsatellites.

L'étude du polymorphisme des protéines sanguines chez les races Timahdite, Sardi, Béni Guil, D'man, Boujaâd et Béni Ahsen, en utilisant les systèmes post-albumine, transferrine et hémoglobine, a montré que toutes les races locales sont polymorphes aux trois locus (Boujenane et *al.*, 2008). Neuf allèles ont été observés au système transferrine, et trois allèles à chacun des systèmes post-albumine et hémoglobine. L'estimation de l'hétérozygotie attendue est plus élevée chez la race D'man (0,491), plus faible chez la race Timahdite (0,331) et intermédiaire chez les autres races. La distance génétique la plus faible a été enregistrée entre les races Boujaâd et Béni Guil, et la plus élevée entre les races Timahdite et Béni Ahsen.

Par ailleurs, l'analyse génétique par la méthode des microsatellites des races Béni Guil, D'man, Sardi et Timahdite a montré que le nombre d'allèles par microsatellite varie de 9 à 10 chez les quatre races locales. Les valeurs du taux d'hétérozygotie ont montré qu'en théorie 7 individus sur 10 de chacune des 4 races sont hétérozygotes. Les distances génétiques entre les races locales varient entre 0,04 et 0,06 (Ouragh et *al.*, 2002).

L'arbre phylogénétique ou dendrogramme construit à partir des distances génétiques (Figure 1) a montré que les races locales peuvent être réparties en 2 grands groupes, avec la race D'man dans l'un et les autres races locales dans l'autre. Ce dernier est lui-même divisé en deux branches avec la race Béni Ahsen sur l'une et les autres races sur l'autre (Boujenane et *al.*, 2008). Ceci indique que les deux races D'man, Béni Ahsen et les quatre autres races locales ont des origines différentes. Par conséquent, vu que l'effectif de la race Béni Ahsen ne cesse de diminuer, il est urgent d'établir un programme pour sa conservation de crainte de perdre les gènes qu'elle possède.

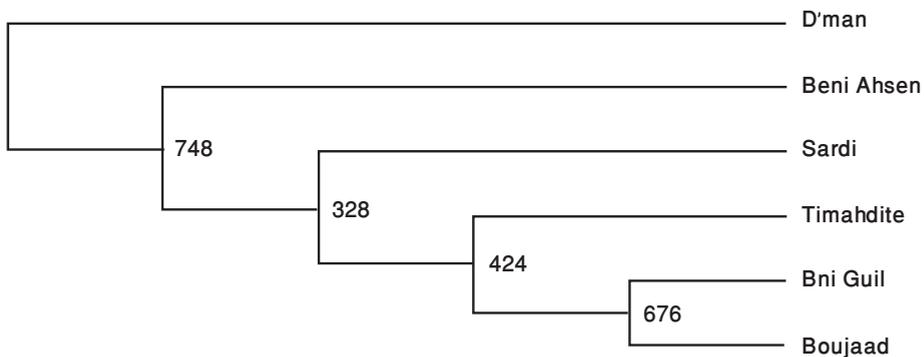


Figure 1. Dendrogramme montrant les relations génétiques entre six races ovines locales (Boujenane et *al.*, 2008)

2.4. Déterminisme héréditaire de la prolificité chez la race D'man

La race D'man est réputée pour sa prolificité élevée puisque sa taille de portée à la naissance varie de 1 à 6 agneaux par mise-bas. Jusqu'à un passé récent, la prolificité chez les ovins était considérée comme un caractère à hérédité polygénique, c'est-à-dire contrôlé par plusieurs gènes avec un petit effet chacun. Toutefois au début des années 1980, des chercheurs australiens ont montré que la haute prolificité chez la race Mérinos

Booroola a une hérédité monogénique, c'est-à-dire contrôlée par un gène majeur *Fec^B*. Au Maroc, le déterminisme héréditaire de la prolificité chez la race D'man a été étudié en utilisant deux approches.

2.4.1. Approche quantitative

Le déterminisme héréditaire de la prolificité chez la race D'man a été étudiée en analysant le taux d'ovulation des brebis D'man pure, F1, et croisées en retour sur D'man toutes issues de béliers D'man, et celui des brebis F2, croisées en retour sur Sardi et croisées en retour sur D'man toutes issues de béliers F1 eux-mêmes issus des béliers D'man précédents. Chaque bélier D'man a au moins un descendant mâle F1. Le critère adopté pour distinguer entre les brebis porteuses et non porteuses du gène majeur hypothétique est la présence ou l'absence d'une performance avec 3 ovules ou plus durant la vie productive de la brebis (Boujenane, 1989).

Les résultats du taux d'ovulation ont montré que les rapports de ségrégation et du testage des béliers ne supportent pas l'hypothèse de la ségrégation d'un gène majeur chez la race D'man. Il a été ainsi conclu que la haute prolificité chez la race D'man a un déterminisme héréditaire polygénique.

2.4.2. Approche moléculaire

L'analyse moléculaire a été utilisée pour vérifier si oui ou non la haute prolificité de la race D'man est due à une mutation *Fec^B*, comme celle observée chez la race Booroola australienne, ou à une mutation *Fec^X*¹, semblable à celle observée chez la race Inverdale New Zélandaise. Pour cela, des prélèvements sanguins ont été effectués sur des brebis D'man qui ont réalisé chacune au moins 2 mises bas avec des tailles de portée supérieures à 3 agneaux. La méthode RFLP (restriction fragment length polymorphism) a été utilisée dans le cadre d'un projet international impliquant 13 pays dont le Maroc et 21 races prolifiques dont la D'man (Davis et al., 2006).

Cette étude a montré qu'aucune des deux mutations n'est présente chez la race D'man, et par conséquent sa prolificité n'a pas un déterminisme héréditaire monogénique, mais plutôt un déterminisme héréditaire polygénique. Ces résultats consolident ceux qui ont été obtenus à travers l'approche quantitative.

Le déterminisme polygénique de la prolificité de la race D'man a favorisé l'émergence de programmes de création de races synthétiques à partir de la race D'man. Il permet de produire des descendants avec différentes proportions de sang D'man (25 %, 50 %, 75 %) selon le niveau de prolificité souhaité par l'éleveur.

2.5. Etude du polymorphisme du gène de la résistance à la tremblante du mouton

Il est actuellement admis que la résistance/sensibilité à la tremblante du mouton est contrôlée génétiquement. Le statut de résistance/susceptibilité des races ovines locales marocaines vis-à-vis de la maladie a été étudié à travers le polymorphisme du gène codant

pour la protéine prion PrP. L'étude menée par Serrano et *al.* (2007) a montré que le variant le plus fréquent est ARQ avec des fréquences supérieures à 65% chez les races D'man, Sardi et Boujaâd, suivi du variant ARR. Le variant ARH est présent uniquement chez la race Boujaâd avec une faible fréquence de 3,49%. En revanche, les variants AHQ, VRQ et ARK n'ont été trouvés chez aucune race. Le génotype le plus fréquent est ARQ/ARQ, suivi par ARR/ARQ. La proportion des ovins avec ARR/ARR (considéré comme le plus résistant à la tremblante) est faible dans les trois races, particulièrement dans D'man et Sardi. Concernant le codon 141, qui est lié à la susceptibilité à la tremblante atypique Nor98, l'allèle F a été détecté avec une fréquence relativement élevée (19,77%) chez la race Boujaâd, une fréquence faible chez la race Sardi et il est absent chez la race D'man.

L'autre étude menée par Boukhris et *al.* (2006) sur les races Boujaâd, Timahdite, Béni Guil, D'man et Sardi a mis en évidence 4 allèles : ARR, AHQ, ARQ et VRQ, avec une prédominance de l'allèle ARQ, l'allèle ancestral ($> 0,70$). L'allèle de résistance ARR est plus fréquent chez la race Timahdite (0,256) suivie par la race Boujaâd (0,173). Quant à l'allèle de sensibilité VRQ, il n'est rencontré que chez les races Sardi et Béni Guil à des fréquences très faibles (0,015 et 0,004).

Bien que le statut de résistance à la tremblante soit favorable, ces résultats permettent d'envisager la possibilité de mise en place d'une stratégie d'amélioration génétique fondée sur l'élimination progressive des allèles de haute sensibilité à la tremblante.

3. Amélioration génétique

3.1. Sélection

Les performances enregistrées chez les ovins sont la résultante à la fois des facteurs génétiques et des facteurs non génétiques ou de l'environnement.

3.1.1. Principaux facteurs non génétiques influençant les caractères économiquement importants

Les facteurs non génétiques qui influencent les performances de reproduction, de croissance, d'engraissement et de laine ont été largement étudiés chez la majorité des races locales. Ceux qui ont des effets significatifs sur ces performances sont l'élevage, l'âge de la brebis, le rang d'agnelage, la saison et l'année de mise-bas, le mode de naissance et le sexe de l'agneau. La connaissance des facteurs non génétiques est essentielle pour une évaluation génétique précise.

3.1.2. Paramètres génétiques et phénotypiques des principaux caractères

Par paramètres génétiques et phénotypiques, on sous-entend l'héritabilité, la répétabilité et les corrélations génétiques et phénotypiques. Ces paramètres sont essentiels pour conduire un programme de sélection visant l'amélioration d'un ou de plusieurs caractères. Ils sont utilisés pour l'évaluation génétique qui est la base la sélection des meilleurs reproducteurs.

3.1.2.1. Répétabilité

La répétabilité est la part de la variance phénotypique qui est due aux effets permanents de l'animal. Elle est estimée pour les caractères qui peuvent être mesurés plus d'une fois. Elle renseigne sur le nombre de performances à prendre en considération lors de l'évaluation génétique pour juger correctement un animal et elle est utilisée lors de la réforme pour prédire la performance future d'un animal en se basant sur ses performances passées.

Les répétabilités des caractères de portée des brebis ont été estimées chez différentes races locales. Les moyennes des répétabilités de la taille de portée à la naissance, la taille de portée au sevrage, le poids de portée à la naissance et le poids de portée au sevrage sont respectivement de 0,12, 0,19, 0,19 et 0,14 chez les races D'man, Sardi, Béni Guil et Boujaâd (Boujenane et al., 1991d ; Boujenane et Mharchi, 1992a ; Boujenane et Chikhi, 2006). Par ailleurs, chez les brebis D'man, Sardi et leurs croisées, la répétabilité a été plus élevée pour le taux d'ovulation (0,26), faible pour la viabilité embryonnaire (0,02) et intermédiaire pour la taille de portée à la naissance (0,22) (Boujenane et al., 1991a).

Ainsi, les répétabilités des caractères de reproduction des races locales sont généralement faibles. Elles indiquent que la prise en considération de plusieurs performances est nécessaire lors de la sélection pour porter un bon jugement sur la brebis.

3.1.2.2. Héritabilité

L'héritabilité est la part de la variance phénotypique qui est expliquée par les effets génétiques additifs, et donc des effets qui sont transmis du parent au descendant. L'héritabilité est utilisée pour estimer les valeurs génétiques additives des animaux et le progrès génétique réalisé par sélection, et pour connaître les caractères à améliorer par sélection.

- Performances de reproduction

Les héritabilités des caractères de portée ont été estimées chez les races D'man, Béni Guil, Timahdite, Sardi et Boujaâd (Boujenane et al., 1991d ; Boujenane et Mharchi, 1992a ; El Fadili et Leroy, 2001 ; Boujenane et Chikhi, 2006). Ainsi, les moyennes des héritabilités de la taille de portée à la naissance, la taille de portée au sevrage, le poids de portée à la naissance et le poids de portée au sevrage des brebis de races locales sont respectivement de 0,13, 0,11, 0,18 et 0,11. Les faibles héritabilités des caractères de reproduction des races locales indiquent qu'il est difficile de les améliorer par sélection et que le progrès génétique réalisé est faible.

- Performances de croissance

Les héritabilités des poids aux âges types et des GMQ des agneaux ont été estimées pour les principales races locales. Elles varient pour un caractère donné selon la race et le mode de conduite. Les moyennes des héritabilités des poids à la naissance, 30 jours et 90 jours sont respectivement de 0,19, 0,16, 0,24. Celles des GMQ0-30 et GMQ 30-90 sont respectivement de 0,09 et 0,25 chez les agneaux des races D'man, Sardi, Béni Guil, Timahdite et Boujaâd (Boujenane et Kerfal, 1990 ; Boujenane et Mharchi, 1992b ;

El Fadili *et al.*, 2000a,b; Boujenane *et al.*, 2001; Boujenane et Kansari, 2002a; Chikhi et Boujenane, 2004). Ces héritabilités montrent qu'il est possible de réaliser des gains génétiques appréciables si des programmes de sélection appropriés sont établis. Par ailleurs, au vu de ces estimations, il semble que le poids à 90 jours et le GMQ30-90 sont les critères de sélection les plus appropriés pour l'amélioration des performances pondérales des ovins de races locales.

Ces paramètres génétiques et phénotypiques ont permis, pendant plusieurs années, de calculer les index de sélection des ovins de race Timahdite du noyau de sélection de la ferme de Sidi Aïssa et des troupeaux de sélection des fermes de Tizitine et d'Oulmès. Ce qui a permis de classer les animaux en catégories (Super, 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} classes) sur la base de leur mérite génétique et non pas sur la base de leur apparence. Ils ont été également utilisés pour choisir les brebis qui ont servi à peupler le noyau de sélection dans le cadre du schéma de sélection à noyau ouvert financé par le projet PNUD-FAO entre 1988 et 1993. Ces paramètres génétiques et phénotypiques sont également utilisés dans le logiciel d'indexation appliqué par l'Association Nationale Ovine et Caprine (ANOC) pour la sélection des meilleurs antenais et antenaises des races locales chez les éleveurs sélectionneurs des grandes régions moutonnières du Maroc.

3.2. Croisement

Dans le but d'exploiter la diversité génétique et de valoriser les aptitudes des races disponibles au Maroc, de nombreuses recherches sur les croisements ont été réalisées. Ainsi, les races locales Timahdite, Sardi, Béni Guil, Boujaâd et D'man, et les races améliorées Ile-de-France, Mérinos Précoce, Lacaune viande, Suffolk et Texel belge ont été utilisées dans différents plans de croisement : croisement entre races locales, croisement industriel, croisement à double étage, création de nouvelles races synthétiques. Les résultats obtenus pourront aider l'éleveur, en fonction du degré d'intensification de son élevage, dans le choix des races et les plans de croisement adéquats à utiliser.

3.2.1. Croisement race locale rustique x race locale rustique

Les travaux sur les croisements structurés entre races locales standardisées sont quasiment inexistantes. Seuls Bourfia et Touchberry (1993a,b) se sont intéressés à la comparaison des croisements diallèles entre les races D'man, Béni Guil et Sardi. Les résultats de ces études ont montré que les brebis D'man ont les performances de reproduction les plus élevées, et que le croisement entre les béliers Béni Guil et les brebis D'man aboutit aux productivités pondérales les plus élevées comparé aux autres croisements diallèles. En revanche, les agneaux issus de la race Sardi ont réalisé les carcasses les plus lourdes. Toutefois, en comparant les races locales dans les mêmes conditions, El Fadili (2006a) a rapporté que leurs performances de reproduction et de production sont similaires et il a conclu que le croisement entre les races locales rustiques n'a aucun intérêt économique.

3.2.2. Croisement entre la race prolifique D'man et les races rustiques

L'intérêt porté aux caractéristiques reproductives exceptionnelles de la race D'man s'est concrétisé par d'importants travaux de recherche sur son utilisation en croisement avec

toutes les races locales standardisées (Bradford *et al.*, 1989; Boujenane et Bradford, 1991; Boujenane *et al.*, 1991b,c; Bourfia et Touchberry, 1993a,b; El Fadili, 1996, 2004, 2005b, 2009a,b; El Fadili et Leroy, 1997; 2001; El Fadili *et al.*, 2000b; 2001; Boujenane et Kansari, 2002b; 2005). Ces travaux ont montré que l'utilisation de la race D'man, comme race de bélier, n'a aucun effet sur les performances de reproduction des races locales pures. En outre, le croisement réciproque impliquant la femelle D'man avec le bélier des races Béni Guil (Bourfia et Touchberry, 1993a, b), Sardi (Boujenane *et al.*, 1991c) et Timahdite (El Fadili et Leroy, 2001) ont permis une prolificité élevée à la naissance. Cependant, cette supériorité n'est pas maintenue au sevrage car le poids de la portée a diminué. Par ailleurs, les agneaux croisés D'man ont réalisé un GMQ à l'engrais et un rendement à l'abattage satisfaisants, mais ont déposé un gras mésentérique et de couverture dans leur carcasse supérieurs à ceux des agneaux de races pures Sardi (Boujenane *et al.*, 2003), Béni Guil (Bourfia et Touchberry, 1993a) et Timahdite (El Fadili *et al.*, 2000).

Ainsi, il apparaît que la différence dans les croisements réciproques entre la race D'man et les races locales rustiques est importante. Elle est en faveur de la race D'man pour les caractères de reproduction des brebis et en faveur des races rustiques pour les caractères de croissance et de viabilité des agneaux.

3.2.3. Croisement industriel

Les recherches ont été réalisées en impliquant les brebis de races locales Timahdite, Sardi, Béni Guil, Boujaâd et D'man et les béliers de races Ile-de-France, Mérinos Précoce, Suffolk, Lacaune viande et Texel belge (Boujenane *et al.*, 1998; El Fadili, 1996, 2004, 2005b, 2008, 2009b; El Fadili et Leroy, 1997; 2000; Boujenane et Kansari, 2002b). Les principales conclusions qui peuvent être tirées de ces recherches sont :

- Le croisement industriel a permis des performances de croissance pré-sevrage, d'engraissement et une qualité de la carcasse des agneaux croisés nettement supérieures à celles réalisées par les agneaux de différentes races locales pures.
- La race Ile-de-France permet la production d'agneaux avec une croissance pré-sevrage, une croissance à l'engraissement et un poids de carcasse supérieurs à ceux des agneaux issus de pères des races Lacaune, Mérinos Précoce et Suffolk. Ainsi, la race Ile-de-France semble être plus efficace et serait mieux adaptée aux systèmes alimentaires intensifs pour la production d'agneaux précoces.
- La race Lacaune a donné des agneaux qui ont montré une tendance précoce à déposer du gras, indiquant qu'elle pourrait représenter une alternative aux races traditionnellement utilisées en croisement industriel, dans des conditions alimentaires et d'élevage moins intensives.
- La race Texel belge a donné des agneaux croisés avec des carcasses présentant un bon développement musculaire et avec moins de gras.

3.2.4. Croisement à double étage

Les différentes recherches ont montré que l'avantage de l'utilisation de la race D'man en croisement pour améliorer à la fois la prolificité et la productivité des brebis croisées est légèrement contrebalancé par des performances de croissance et de viabilité moindres des

produits croisés (Berger *et al.*, 1989; Boujenane *et al.*, 1991b, 1999; Bourfia et Touchberry, 1993a,b; El Fadili *et al.*, 2000b; El Fadili et Leroy, 2001). C'est pourquoi, l'utilisation d'une 3^{ème} race améliorée au croisement terminal est nécessaire pour améliorer la croissance et le développement musculaire des agneaux. En effet, l'exploitation combinée des gènes de prolificité de la race D'man, de rusticité de la race locale et de croissance et conformation de la race améliorée a montré que le croisement à double étage a permis d'augmenter la production et la qualité de la viande ovine, comparé à l'élevage en race pure et le croisement industriel (Boujenane et Kansari, 2002b; El Fadili, 2006a).

Dans le cas du croisement à double étage impliquant les races locales comme support, la productivité pondérale a été significativement supérieure à celles des brebis de races pures rustiques et presque comparable à celle de la race pure D'man (El Fadili *et al.*, 2000b; Boujenane et Kansari, 2002b). Cette supériorité est le résultat de la prolificité élevée de la brebis croisée F1 (D'man x race locale) comparée à celle des brebis des races rustiques. De même, les agneaux croisés de 2^{ème} génération, avec 25 % de gènes D'man, ont une croissance, une viabilité, des performances à l'abattage et une qualité de la carcasse comparables à celles des agneaux issus des brebis de races locales croisées aux mêmes races de béliers améliorés (El Fadili *et al.*, 2001).

Par ailleurs, le transfert et la diffusion des brebis croisées (D'man x race locale) à certains éleveurs de différentes régions du pays ont montré une augmentation de la prolificité de 60 à 77%, de la productivité pondérale à 90 jours de 40 à 60% et de la viabilité des agneaux de 4,4% par rapport aux races locales détenues par les éleveurs bénéficiaires (Zaabout, 2003; Boujenane et Kansari, 2005; El Fadili, 2008). Ces travaux de recherches appliquées indiquent que la brebis croisée (D'man x race locale) constitue un animal de choix pour augmenter la production de viande au Maroc. De plus, ces brebis bénéficient d'une précocité sexuelle et d'un désaisonnement leur permettant une production à contre saison et donc une intensification de la production d'agneaux de boucherie.

3.2.5. *Création de nouvelles races*

Comme alternative au croisement à double étage, la création de nouvelles races synthétiques pourrait répondre aux préoccupations pratiques des éleveurs qui souhaitent une conduite simplifiée de leur troupeau.

Les résultats préalables à la création et l'estimation des paramètres de croisement de la race D'man avec les races Sardi (Boujenane et Bradford, 1991; Boujenane *et al.*, 1991b,c; Boujenane *et al.*, 1999), Béni Guil (Bourfia et Touchberry, 1993a,b) et Timahdite (El Fadili et Leroy, 2001) ont été en faveur d'évoluer vers la création de nouvelles races synthétiques (Boujenane, 2002; Boujenane *et al.*, 2003; El Fadili *et al.*, 2009). La caractéristique commune à ces programmes de création, qui ont demandé plusieurs années de croisement de métissage, est qu'ils utilisent tous la race prolifique D'man avec l'une ou l'autre des races Sardi, Béni Guil ou Timahdite, avec une contribution de 50% des deux races fondatrices. L'implication de la race D'man avec 50% dans le génotype de la race synthétique semble être optimale, car elle aboutit à la productivité pondérale la plus élevée comparée aux autres proportions du sang D'man (Boujenane et Bradford, 1991; El Fadili, 2005a).

Les performances réalisées chez les brebis et les agneaux des races synthétiques DS et INRA180, aussi bien en stations que chez les éleveurs, sont intermédiaires à celles enregistrées par les deux races parentales (Boujenane, 2002; Boujenane *et al.*, 2003; Zaaboul, 2003; El Fadili *et al.*, 2009a; 2009b). Ces races synthétiques ont montré également une puberté précoce, un anœstrus post-partum court et une saison sexuelle longue qui leur a été transmise par la race D'man (puberté précoce, anœstrus post-partum court et une saison sexuelle longue) et qui peuvent être mis à profit dans un système d'agnelage accéléré. Actuellement, de nombreuses brebis appartenant à ces races synthétiques sont élevées avec succès dans les élevages de différentes régions du pays et contribuent à l'amélioration de la productivité des troupeaux. En effet, les brebis de race DS transférées à des éleveurs pratiquant le croisement industriel dans quatre régions du Maroc et suivies depuis la période de lutte jusqu'au sevrage de leurs agneaux ont donné une grande satisfaction auprès éleveurs bénéficiaires suite aux productivités très intéressantes qu'elles ont réalisées (Tableau 4).

Tableau 4. Performances des races synthétiques DS et INRA 180 comparées à celles des races parentales en station et chez les éleveurs ^{1,2}

Site	Race	Brebis			Agneaux		
		Fertilité (%)	Prolificité (%)	Prod. (kg)	PONA (kg)	P90J (kg)	Viabilité 0-90j (%)
Station	Sardi	91	115	19,1	3,34	16,6	88,4
	D'man	85	202	21,5	2,69	14,3	90,0
	DS	92	157	20,1	2,73	15,3	87,3
Elevéurs	DS	96	153	32,8	3,53	23,6	90,7
	Timahdite	93	124	24,0	3,34	17,4	77
Station	D'man	85	213	23,4	2,92	14,7	63
	INRA 180	93	164	24,5	2,91	15,9	79
Elevéurs	INRA 180	90	161	27,7	2,86	19,6	92

¹ Prod. : Productivité à 90 j, PONA : Poids à la naissance, P90J : Poids à 90 j.

² Chez les éleveurs, les brebis des deux races synthétiques ont été croisées à des béliers de races à viande.

4. Conclusion

Le Maroc dispose d'une richesse exceptionnelle en matière d'ovins, tant du point de vue numérique que de la diversité génétique. De nombreux travaux de recherches fondamentales et appliquées ont permis une meilleure caractérisation des principales races ovines marocaines. Des avancées scientifiques et méthodologiques importantes ont ainsi pu être accumulées : parmi elles, la connaissance du déterminisme héréditaire de la prolificité et la caractérisation génétique du patrimoine ovin national constituent les plus significatives. Par ailleurs, plusieurs stratégies de production élaborées aussi bien en race pure qu'en croisement ont eu un impact certain sur le développement de la filière ovine au Maroc.

Dans sa stratégie globale élaborée en 2008, le Plan Maroc Vert accorde une place de choix au développement de la filière ovine. Il prévoit, en particulier, le maintien du niveau de consommation de viande ovine à 4 kg/hab./an à l'horizon 2020 ; ce qui devrait nécessiter une augmentation de la production de 120.000 tonnes actuellement à plus de 160.000 tonnes en 2020. Il prévoit aussi le recours, à plus grande échelle, à l'utilisation de races sélectionnées (locales et améliorées) dans les élevages agréés productivistes. Il recommande enfin l'encouragement massif d'unités d'engraissement et de production d'agneaux croisés.

Pour accompagner cet ambitieux plan, il apparaît donc plus que nécessaire de renforcer les programmes et les équipes de recherche dans ce domaine. Par ailleurs, des efforts sont nécessaires pour évoluer vers une évaluation génétique objective des reproducteurs de chaque race standardisée sur des caractères d'intérêt économique, pour la sauvegarde et la caractérisation des populations ovines de montagne non standardisées et pour la reconnaissance et le développement par le Ministère de l'Agriculture des races nouvellement créées comme races locales à part entière.

Références

- Berger Y.M., Bradford G.E., Essadi A., Johnson D.W., Bourfia M., Lahlou-Kassi A. 1989. Performance of the D'man and Sardi sheep on accelerated lambing. III. Lamb mortality, growth and production per ewe. *Small Rumin. Res.* 2: 307-321.
- Boujenane I. 1989. Inheritance of reproduction traits in crosses between D'man and Sardi breeds of sheep. Ph.D. Dissertation, University of California Davis, U.S.A. 152 pages.
- Boujenane I. 1996. The D'man. In : M.H. Fahmy (Ed.) "Prolific Sheep". CAB International, Wallingford, UK, pp. 109-120.
- Boujenane, 1999. Les ressources génétiques ovines au Maroc. Actes Editions, Rabat. 136 pages.
- Boujenane I. 2002. Development of the DS synthetic breed of sheep in Morocco: ewe reproduction and lamb pre-weaning growth and survival. *Small Rumin. Res.* 45: 61- 66.
- Boujenane, 2006. Reproduction and production performances of Moroccan sheep breeds. A review. *Anim. Breed. Abstr.* 74 (7): 1-18.
- Boujenane I., Kerfal M. 1990. Estimates of genetic and phenotypic parameters for growth traits of D'man lambs. *Anim. Prod.* 51 : 173-178.
- Boujenane I., Bradford, G.E. 1991. Genetic effects on ewe productivity of crossing D'man and Sardi breeds of sheep. *J. Anim. Sci.* 69: 525-530.
- Boujenane I., Lairini K. 1992. Milk production and percentage fat of D'man, Sardi and crossbred ewes. *Small Rumin. Res.* 8 : 207-215.
- Boujenane I., Mharchi A. 1992a. Estimation des paramètres génétiques et phénotypiques des performances de reproduction des brebis de race Béni Guil. *Actes Inst. Agron. Vet. (Maroc)* 12 (4): 5-13.

- Boujenane I., Mharchi A. 1992b. Estimation des paramètres génétiques et phénotypiques des performances de croissance des agneaux de race Béni Guil. Actes Inst. Agron. Vet. (Maroc) 12 (4): 15-22.
- Boujenane I., Kansari J. 2002a. Estimates of (co)variances due to direct and maternal effects for body weights of Timahdite sheep. Anim. Sci. 74 (3): 409-414.
- Boujenane I., Kansari J. 2002b. Lamb production and its components from purebred and crossbred mating types. Small Rumin. Res. 43 (2): 115-120.
- Boujenane I., Kansari J. 2005. Productivité des brebis Timahdite et croisées D'man x Timahdite en station et chez les éleveurs au Maroc. Revue Élev. Méd. vét. Pays Trop. 58 (1-2): 75-79.
- Boujenane I., Chikhi A. 2006. Paramètres génétiques et phénotypiques des performances de reproduction des brebis des races Boujaâd et Sardi au Maroc. Revue Élev. Méd. vét. Pays trop. 59 (1-4): 51-57.
- Boujenane I., Bradford G.E., Berger Y.M., Lahlou-Kassi A. 1991a. Repeatability estimates for litter size and its components in sheep. J. Reprod. Sci. 26 : 107-113.
- Boujenane I., Bradford G.E., Berger Y.M., Chikhi A. 1991b. Genetic and environmental effects on growth to 1 year and viability of lambs from a crossbreeding study of D'man and Sardi breeds. J. Anim. Sci. 69: 3989-3998.
- Boujenane I., Bradford G.E., Famula T.R. 1991c. Inheritance of litter size and its components in crosses between the D'man and Sardi breeds of sheep. J. Anim. Sci. 69: 517-524.
- Boujenane I., Kerfal M., Khallouk M. 1991d. Genetic and phenotypic parameters for litter traits of D'man ewes. Anim. Prod. 52 : 127-132.
- Boujenane I., Berrada D., Mihi S., Jamai M. 1998. Reproductive performance of ewes and preweaning growth of lambs from three native Moroccan breeds mated to rams from Moroccan and improved breeds. Small Rumin. Res. 27: 203-208.
- Boujenane I., Chafik A., Benbihi M. 1999. Heterosis retained in different generations of inter se mating between D'man and Sardi sheep. J. Anim. Breed. Genet. 116: 151-159.
- Boujenane I., M'Zian S., Sadik M. 2001. Estimation des paramètres génétiques et phénotypiques des caractères de croissance des ovins Sardi. Actes Inst. Agron. Vet. (Maroc) 21 (3): 177-183.
- Boujenane, I., Roudies, N., Benmira, A., El Idrissi, Z., El Aouni, M. 2003. On-station assessment of performances of the DS synthetic and parental sheep breeds, D'man and Sardi. Small Rumin. Res. 49 (2): 125-133.
- Boujenane I., Ouragh L., Benlamlih S., Aarab B., Miftah J., Oumrhar H. 2008. Variation at post-albumin, transferrin and haemoglobin proteins in Moroccan local sheep. Small Rumin. Res. 79 (2-3): 113-117.
- Boukhris R., Ouragh L., Pantano T., Kichou F., Babillot J.M., Bed'hom B., El Fadili M. 2006. Etude du polymorphisme du gène de la protéine PrP chez les races ovines Marocaines Study of gene polymorphism of the PrP protein in Moroccan sheep breeds. Renc. Rech. Ruminants 13: 261.

- Bourfia, M., Touchberry, R.W. 1993a. Diallel cross of three Moroccan breeds of sheep I. lamb growth and carcass traits. *J. Anim. Sci.* 71: 870-881.
- Bourfia, M., Touchberry, R.W. 1993b. Diallel cross of three Moroccan breeds of sheep II. Reproductive performance and productivity of purebred ewes. *J. Anim. Sci.* 71: 882-887.
- Bradford G.E., Lahlou-Kassi A., Berger Y.M., Boujenane I., Derqaoui L. 1989. Performance of D'man and Sardi sheep on accelerated lambing. II. Ovulation rate and embryo survival. *Small Rumin. Res.* 2: 241-252.
- Chikhi, A., Boujenane, I. 2003a. Performances de reproduction et de production des ovins de race Boujaâd au Maroc. *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.* 56 (1-2) : 83-88.
- Chikhi, A., Boujenane, I. 2003b. Caractérisation zootechnique des ovins de race Sardi. *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.* 56 (3-4): 187-192.
- Chikhi A., Boujenane I. 2005. Performances d'engraissement et caractéristiques des carcasses des agneaux Boujaâd et Sardi au Maroc. *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.* 58 (4) : 267-272.
- Davis G.H., Balakrishnan L., Ross I.K., Wilson T., Galloway S.M., Lumsden B.M., Hanrahan J.P., Mullen M., Mao X.Z., Wang G.L., Zhao Z.S., Zeng Y.Q., Robinson J.J., Mavrogenis A.P., Papachristoforou C., Peter C., Baumung R., Cadyn P., Boujenane I., Cockett N.E., Eythorsdottir E., Arranz J.J., Notter D.R. 2006. Investigation of the Booroola (FecB) and Inverdale (FecX¹) mutations in 21 prolific breeds and strains of sheep sampled in 13 countries. *J. Reprod. Sci.* 92 (1-2): 87-96.
- El Fadili M. 2001. Performances génétiques et zootechniques des races marocaines Timahdite et D'man en race pure et en croisement. Thèse de doctorat Es-Sciences Vétérinaires, Faculté de Médecine Vétérinaire, Université de Liège, Belgique.
- El Fadili M. 2004. Facteurs de variation et performances en croisement de la race ovine Boujaâd. I. Caractères de reproduction, viabilité et croissance pré sevrage. *Al Awamia* 109: 207-220.
- El Fadili M. 2005a. Facteurs de variation et performances en croisement de la race ovine Boujaâd. II Croissance post-sevrage et caractéristiques de la carcasse des agneaux. *Al Awamia* 111: 101-116.
- El Fadili, 2005b. Productivité de la D'man en race pure et en croisement dans le bour atlantique. Symposium international, Erfoud, Maroc. In : Boulanouar B. et Kradi C. (Eds). Actes du Symposium international sur le Développement durable des systèmes oasiens. Publications INRA 359.
- El Fadili, M. 2006a. Amélioration de la production ovine par le croisement. In: Boulanouar B. & Paquay R. (Eds.) «L'élevage du mouton et ses systèmes de production au Maroc». INRA, Rabat, Maroc. pp. 237-255.
- El Fadili M. 2006b. Productivité et caractéristiques de la carcasse du mouton Sardi en race pure et en croisement. Proceeding du séminaire national sur la production Agricole, 16-17 Mars, Settât, Maroc.

- El Fadili, M. 2008. Mise à l'épreuve et promotion des brebis prolifiques F1DT (D'man x Timahdite) en milieu réel chez les éleveurs. Rapport de synthèse Final. 54 pages.
- El Fadili M. 2009a. La race Béni Guil : ses performances en race pure et en croisement. Bulletin de transfert de Technologie en agriculture 172.
- El Fadili M. 2009b. Productivité et qualité des agneaux et de la viande dans le croisement de la race Texel belge au Maroc. Publications INRA Maroc. 38 pages.
- El Fadili M., Leroy P.L. 1997. Utilisation de la race D'man en croisement. Actes de la journée d'étude sur la race D'man, Errachidia, 10-12 Décembre, Maroc.
- El Fadili M., Leroy P.L. 2000. Comparaison de trois races de croisement terminal pour la production de l'agneau croisé au Maroc. Ann. Méd. Vét. 145: 85-92.
- El Fadili M., Leroy P.L. 2001. Estimation of additive and non-additive genetic parameters for reproduction, growth and survival traits in crosses between the Moroccan D'man and Timahdite sheep breeds. J. Anim. Breed. Genet. 118: 341-353.
- El Fadili M., Michaux C., Leroy L.P. 1997. Amélioration de la productivité des ovins des races locales par le croisement: Croissance et caractères de carcasses. Proceeding du séminaire international sur la Filière des viandes rouges dans les pays méditerranéens. Tunis, 20-25 Avril, Tunisie. pp. 139-148.
- El Fadili M., Michaux C., Boulanouar B., Leroy L.P. 2000a. Environmental and genetic effects on growth in Timahdite and crossbred lambs in Morocco. Revue Élev. Méd. vét. Pays trop. 53: 75-83.
- El Fadili M., Michaux C., Detilleux J., Leroy P.L. 2000b. Genetic parameters for growth traits of the Moroccan Timahdit breed of sheep. Small Rumin. Res. 37: 203-208.
- El Fadili M., Michaux C., Detilleux J., Leroy P.L. 2000c. Comparison of five crossbreeding types involving Timahdite, D'man and improved terminal sire breeds of sheep: Ewes reproduction, lamb survival and growth performance. Anim. Sci. 71: 435-441.
- El Fadili M., Michaux C., Detilleux J., Leroy P.L. 2001. Evaluation of fattening performances and carcass characteristics of purebred, first and second cross lambs between Moroccan Timahdite, D'man and improved meat rams. Anim. Sci. 72: 251-257.
- El Fadili M., Derqaoui L., François D., Bodin L. 2008. Taux d'ovulation et prolificité chez les brebis D'man, Timahdite et leurs croisées. 15^{ème} Renc. Rech. Ruminants, Paris, France, 4 et 5 décembre. pp. 395.
- El Fadili M., Francois D., Bodin L. 2009a. Performances de reproduction et productivité de brebis F1 à F4 issues de croisements entre les races D'man et Timahdite. 16^{ème} Renc. Rech. Ruminants, Paris, France, 2 et 3 décembre. pp. 295.
- El Fadili M., Francois D., Bodin L. 2009b. Croissance et viabilité des agneaux dans les générations F1 à F4 du croisement de métissage entre les races D'man et Timahdite. Revue Élev. Méd. vét. Pays trop. (Soumis).
- FAO. 2007. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/site/569/default>. Site consulté le 20 octobre 2009.

- Kerfal, M; Chikhi, A.; Chetto, A., Boulanouar, B. 2005. Caractérisation zootechnique de la race ovine D'man et rentabilité de son élevage dans les oasis du Tafilalet. Les cahiers de la recherche agronomique n° 43. INRA, Rabat.
- MADRPM. 1998. Présentation des résultats du recensement général de l'agriculture. Direction de la Planification et des affaires Economiques, Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes, Rabat.
- MAPM. 2008. Elevage en chiffres 2007. Service du Suivi Evaluation, Direction de l'Elevage, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Rabat.
- Ouragh L., Amigues Y., Nguyen T.C., Boscher M.Y. 2002. Analyse génétique des races ovines marocaines. Renc. Rech. Ruminants 9: 99.
- Serrano C., Martin-Burriel I., Lyahyai J., Monzon M., El Hamidi M., Acin C., Badiola J.J., Tligui N., Zaragoza P. 2007. Polymorphisms of the PRNP gene in Moroccan sheep breeds. Veterinary Record 161: 524-525.
- Zaaboul H. 2003. Race ovine synthétique DS : Mise à l'épreuve et comparaison avec différents types génétiques chez les éleveurs. Mémoire de 3^{ème} cycle Agronomie, IAV Hassan II, Rabat.

The Magnetostratigraphy Susceptibility for Lowermost Lower Devonian to Uppermost Middle Devonian Marine Rocks : Eastern Anti Atlas, Morocco

Ahmed EL HASSANI ¹, Brooks B. ELLWOOD ²

¹ Resident Member, Hassan II Academy of Science and Technology,
Rabat, Morocco

² Department of Geology and Geophysics, Louisiana State University,
Baton Rouge, Louisiana 70803, USA

Abstract

Magnetic susceptibility (MS) data from marine rocks are being used for global correlation, because these data are a proxy for time synchronous variations in global erosion cycles, driven by eustasy and climate change. The MS reflects the detrital flux into the marine environment resulting from these erosional pulses. We present here the MS signature from three stratigraphic intervals that are biostratigraphically well studied, from the lowermost Lower Devonian (Lochkovian Stage) through the uppermost Middle Devonian through most of the Givetian Stage, a data base including ~3,300 samples, and ~30 million years of the Devonian. Fluctuating detrital input, due to eustatic-based erosion, is associated with the bioevents observed in our data sets. These bioevents include the well-known Chotec and Kačák Intervals at the Emsian/Eifelian and Eifelian/Givetian boundaries, respectively, as well as the two “*Terebratula*” *pumilio* events in the Upper Givetian. All these bioevents are associated with pronounced sea-level high stands. In the Lower Emsian there are two anomalous, large-amplitude transgression-regression (T/R) cycles that demonstrate significant changes in detrital content into the marine system. We see two possible explanations for these pulses. One, these pulses result from either major plate boundary changes and large-scale eustatic fluctuations due to the collision of Laurentia with elements of Gondwana at that time, or two, are due to the development of complex plant structures and root systems as plants covered continents for the first time, resulting in enhanced chemical weathering producing anomalous detrital sediment pulses into the marine environment that ended with soil stabilization at the end of the Lower Emsian.

Résumé

Les données de la susceptibilité magnétique (MS) à partir des roches marines sont actuellement utilisées pour établir des corrélations globales, parce que ces données sont dues à des variations temporelles synchrones de l'érosion globale, liés à l'eustatisme et aux changements climatiques.

La MS reflète le flux détritique dans le milieu marin, résultant de ces pulsations d'érosion. Nous présentons ici la signature MS à partir de trois intervalles stratigraphiques bien étudiés sur le plan biostratigraphique, et couvrant l'intervalle entre la partie basale du Dévonien inférieur (étage Lochkovien) - Dévonien terminal, et incluant la plus grande partie de l'étage Givétien, cette base de données comporte 3300 échantillons sur un intervalle de temps de 30 millions d'années au sein du Dévonien.

Les fluctuations des apports détritiques, en relation avec l'érosion liée à 'eustatisme, sont associées à des bio-événements observés dans notre ensemble de données. Ces bio-événements comprennent les intervalles bien connus Chotec et Kačák aux limites l'Emsien/Eifélien et Eifélien/Givétien respectivement, ainsi que les deux événements «Terebratula» et *pumilio* dans le Givétien supérieur. Ces bio-événements sont associés à un haut niveau marin élevé et assez prononcé.

Dans le Dévonien inférieur, à l'Emsien basal, existent deux cycles de transgression-régression (T/R) à grande échelle, qui démontrent des variations significatives du contenu détritiques dans le système marin.

Il y a deux explications à ces pulsations : 1) celles-ci résultent de modifications importantes aux limites des plaques et de fluctuations eustatiques à grande échelle dues à la collision de la plaque Laurentia avec des éléments du Gondwana à l'époque, ou 2) elles sont dues à l'évolution de structures végétales et de systèmes racinaires complexes lorsque les plantes ont recouvert les continents pour la première fois, ce qui a entraîné une altération chimique produisant des apports anormaux de sédiments détritiques dans le milieu marin qui ont pris fin avec la stabilisation des sols à la fin de l'Emsien inférieur.

Keywords : magnetic susceptibility, Paleozoic, Devonian, Morocco, Bioevents, Lochkovian, Pragian, Emsian, Eifelian, Givetian, Plant evolution

INTRODUCTION AND PREVIOUS WORK

For more than 20 years, magnetic susceptibility (MS) measurements of sedimentary sequences have been used in paleoclimatic studies. This includes work on loess sequences (e.g., Heller and Evans, 1995), lacustrine sediments (e.g., Allen et al., 1999), and archaeological sites (e.g., Ellwood et al. 1997). As a result, a number of different climate-driven mechanisms have been identified as one of the controls on MS variations. In part, this work has been successful because MS, independent of other measurements, has been shown to be very sensitive to small changes in total iron concentration of sediments (Banerjee, 1996) that are controlled by climate (e.g., Tite and Linington, 1975; Maher, 1998).

Some early workers who have performed MS studies on rocks of late Paleozoic and Mesozoic age have argued that global correlations are possible, and are the result from climate driven processes (Hansen et al., 1993). However, these studies have suggested correlations between terrestrial and marine sequences that we believe are somewhat tenuous. We agree that climate cyclicity (high-frequency fluctuation) does appear in MS

data sets, as has been clearly demonstrated by Weedon et al. (1999) for Jurassic rocks in England, and we agree that these cycles can be used in some instances for correlations (e.g., Ellwood et al., 2008a). This is possible because the MS signature in marine rocks results from the influx of detrital grains, weathered and eroded from continents and delivered to the oceans, thus mixing with marine-derived sediments (Ellwood et al., 2000). Therefore, the greater the influx of terrigenous detrital material, the greater is the MS. However, these cycles do not have global correlation power without excellent, high-resolution biostratigraphic or isotopic control, because high-frequency (short-term) cycles are too easily destroyed by erosion or non deposition, thus disrupting the correlations. On the other hand, low frequency magnetic susceptibility (MS) cycles, driven by climate and eustasy, do have global correlation power. When employed for correlation purposes, the MS method involves measuring the MS of samples collected at close intervals throughout continuously exposed sections or from drill cores. Where section exposures are continuous, major unconformities can often be recognized. Even where stratigraphic gaps are not identified in outcrop, large abrupt changes in MS magnitude can be diagnostic indicators of major stratigraphic gaps.

The MS method also works in relatively modern marine sediments, where it is used as a proxy for oxygen isotopic ($\delta^{18}\text{O}$) variations and climate fluctuations (e.g., Shackelton, 1999). Pleistocene $\delta^{18}\text{O}$ variations are tied to ice volume and, therefore, to base-level (sea-level) changes resulting in significant global, climate-controlled cyclic transgressive/regressive (T/R) adjustments in coastal regions. These changes drive significant fluctuations in the transport of detrital material into the marine environment, thus producing the MS variations observed. Time series analyses of MS data sets by a number of workers has demonstrated that climate cycles are clearly present in many of these data sets (e.g., Weedon et al., 1999; Jovane et al., 2006; Ellwood et al., 2008b).

In Paleozoic rocks, the MS method has proven to be a useful technique for regional and global correlation (e.g., Crick et al., 1997; Ellwood et al., 2007; Whalen and Day, 2008). Our work has been directed primarily toward Paleozoic rocks because other methods are generally not useful for solving global correlation problems during this time. We have long argued that the MS signature observed is due to the influx of detrital grains into the marine environment as the result of, (1) variations in weathering and erosion during transgressive and regressive sea level changes (Crick et al., 1997; Ellwood et al., 1999), and (2) variable erosion driven by changes in climate (Ellwood et al., 2000; Crick et al., 2001).

The cyclostratigraphic aspect of MS data sets is a climate-driven cyclicity superimposed on longer-term events that result from erosion-driven base-level changes, where the smaller amplitude and shorter duration cycles we relate to climate change. These cycles are superimposed on the longer term and greater magnitude events. There are also other elements in the data. For example, tempestites or storm deposits often give a very short-term but high MS value (e.g., at high sample densities, single data points). In addition, local or regional, relatively low magnitude and short-term fluctuations can be distinguished in MS data sets because they appear in only one or two closely spaced sections. These result from regional or local tectonic processes (Ellwood et al., 1999).

We have also been concentrating our MS work on Global boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) to establish direct links to the best available biostratigraphic data sets. Here we present an extension of our work at the Eifelian/Givetian GSSP (Walliser et al., 1995) that has been established at Jebel Mech Irdane in Morocco (Fig. 1, 2).

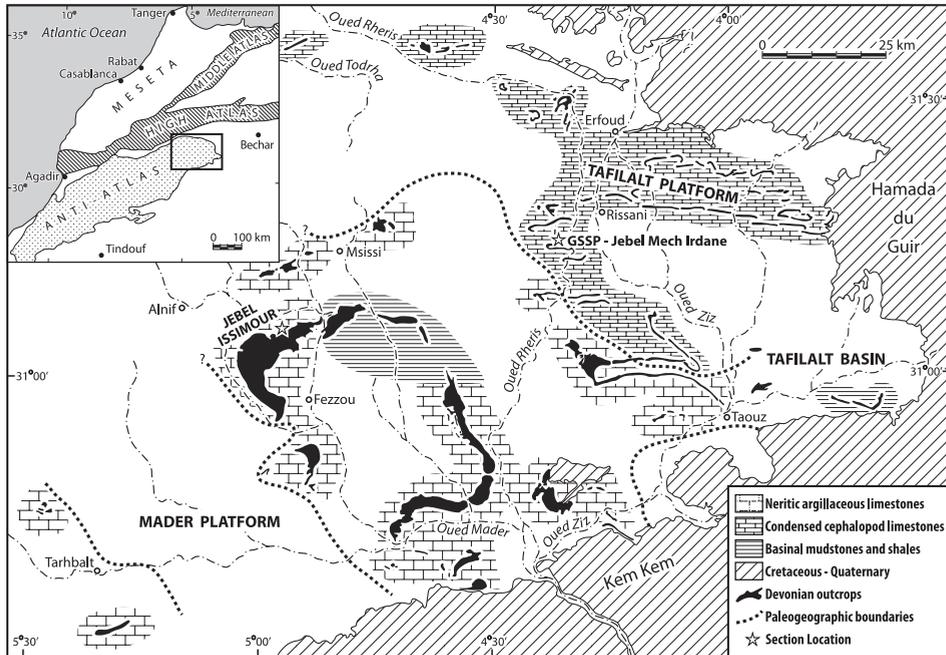


Figure 1. Location of the studied sections. Insert shows the tectonic setting in northern Morocco and the location of the Tafilalt Platform and Mader Basin paleogeographic regions from which the samples were collected. Devonian exposures are given by black filled areas, at the sections sampled are identified by stars. Note that the Tafilalt Platform limestones are somewhat condensed and this becomes much more pronounced in Upper Devonian sequences.

The sampling intervals we use are small (generally 0.05 to 0.1 m) to clarify trends and for maximum time resolution. The MS signature of a Lower Devonian section at Jebel Issimour (Fig. 1, 3) is typical of the type of results that can be acquired using the MS method (Fig. 4). This section is ~270 m thick with a sample spacing of ~10 samples per meter, resulting in the collection and measurement of ~2700 samples from the section (the base of the section through sample #88 was collected at a 5 cm interval; above that level the rest of the section was sampled at a 10 cm interval). Where the section is covered, we removed the cover to allow continuous sampling.



Figure 2. Photographs of the section at Jebel Mech Irdane. The inset gives a close-up of the section where BBE and S. Ellwood are collecting samples near the *T. pumilio* bed level. Bed 117 (Walliser et al., 1995) is labeled and represents the onset of the Kačák Interval.

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY (MS)

All materials are “susceptible” to becoming magnetized in the presence of an external magnetic field, and initial low-field bulk magnetic susceptibility or MS is an indicator of the strength of this transient magnetism. MS is very different from remanent magnetism (RM), the intrinsic magnetization that accounts for the magnetostratigraphic polarity of materials. MS in marine stratigraphic sequences is generally considered to be an indicator of detrital iron-containing paramagnetic and ferrimagnetic grains, mainly ferromagnesian and clay minerals (Ellwood et al., 2000; da Silva and Boulvain, 2002), and can be quickly and easily measured on small samples. In the very low inducing magnetic fields that are generally applied, MS is largely a function of the concentration and composition of the magnetizable material in a sample. MS can be measured on small, irregular lithic fragments and on highly friable material that is difficult to sample for RM measurement.

Calcite and/or quartz are also abundant in marine limestones and shales. These minerals are diamagnetic and acquire a negative, but extremely small MS in low inducing magnetic fields. Thus, the presence of quartz or calcite has very little effect on the MS of a sample, relative to the detrital mineral flux into the system. This is because the MS of paramagnetic and ferrimagnetic minerals is much greater than the MS of diamagnetic minerals and therefore, even a small amount of a paramagnetic mineral can significantly outweigh the MS of the volumetrically more abundant diamagnetic minerals.

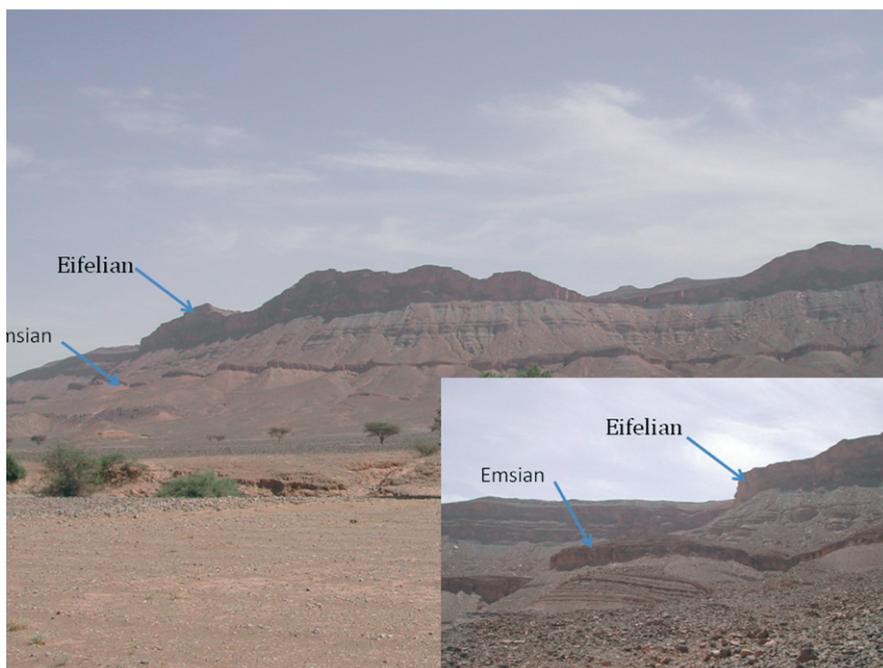


Figure 3. Photographs from the middle of Jebel Issimour of part of the section collected, indicating the middle of the section where Emsian rocks are exposed, and the Eifelian part of the section where sampling ended. The insert is a close-up of the section.

Methods :

Field Sampling

In the field we first clean the section using scrapers and brushes, so that all beds and lithologies are well exposed. Highly weathered zones were cleaned by digging, chipping and brushing. Then, samples are collected for MS and geochemical measurement. Samples are usually collected at 5-10 cm intervals and returned to the laboratory for study, but on occasion we collect samples at 25 cm intervals. This is rare, however, and was not done for this study.

Laboratory Measurement

MS measurements reported in this paper were performed using the susceptibility bridge at LSU (built by Marshal Williams at the University of Georgia). The bridge is calibrated relative to mass using standard salts reported by Swartzendruber (1992) and in the CRC Tables. We report MS in terms of sample mass because it is much easier and faster to measure with high precision than is volume, and it is now the standard for MS measurement for samples collected from outcrops.

Magnetic Susceptibility Analysis

Magnetic susceptibility data for most marine sedimentary rocks that we have measured (>99.9% of samples) range from 1×10^{-9} to 2×10^{-7} m³/kg (Ellwood et al., 2000). For

presentation purposes, these MS data are reported here as δMS data, where:

$$\delta\text{MS} = (\text{MS}_{\text{measured}} - \text{MS}_{\text{marine standard}}) / \text{MS}_{\text{marine standard}}$$

and $\text{MS}_{\text{marine standard}} = 5.5 \times 10^{-8}$; and represents the median value for ~11,000 lithified marine sedimentary rocks, including siltstone, limestone, marl and shale samples. Thus, δMS is dimensionless and allows direct comparison to other MS data sets. A δMS value of zero is coincident with the $\text{MS}_{\text{marine standard}}$ and therefore equal to the median value of the ~11,000 marine rock samples measured in the Rock Magnetism Laboratory at LSU. Negative δMS values are lower than the standard median value and positive values are higher. This approach is similar to that used by isotope geochemists, i.e., in calculating $\delta^{18}\text{O}$ values, and has a number of advantages when evaluating data sets. First, MS magnitude can be directly compared among data sets and between instruments. Second, δMS is a truly dimensionless number as opposed to direct MS values that require adjustment due to measurement relative to a given sample mass or volume. Third, presentation of MS data with values ranging over more than one order of magnitude is not distorted when plotted, as are normal MS values when presented in either a linear or log plot.

DEVONIAN SECTIONS IN THE EASTERN ANTI ATLAS, MOROCCO

We present here sections covering most of the Lower and Middle Devonian. Lower Devonian samples come from the Maider Basin (Fig. 1), where at Jebel Issimour we collected 2,688 samples from the mainly shale, marl and limestone sequence represented (Fig. 4). We also collected 603 samples from the Jebel Mech Irdane section in the Tafilalt Platform (Fig1), where mainly somewhat condensed Middle Devonian rocks are exposed (Fig. 5 and 6). The biostratigraphy for these sequences is well documented, and a composite of the data reported here provide an essentially continuous record from the base of the Lower Devonian to close to the top of the Middle Devonian, a record representing nearly 30 million years. This covers most of Devonian lithologic units A through I (first used by Hollard, 1974); these are truncated above I at Unit J, which is missing at Jebel Mech Irdane (Walliser, 2000).

δMS values for the Issimour and Mech Irdane data sets exhibit normal marine values and are similar to each other. However, in the main, δMS values for the two sections are slightly higher overall than the median value that we use as the standard for marine rocks ($5.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$).

The Jebel Issimour Section

The Jebel Issimour section makes an excellent standard reference section because (1) it can be biostratigraphically correlated to the well studied La Vid section in Spain, where the MS event character is essentially the same, and (2) it covers nearly the entire Lower Devonian. This is important because all of the major MS events in the Lower Devonian appear in this one data set, and there is a long enough section to adequately characterize MS trends for comparison to other sections. Structural problems in the Jebel Issimour section are very minor, are found only in the very base of the section, and are easily resolved. The MS data are also consistent with our ongoing work elsewhere, including

consistency with our measurements from the Lochkovian/Pragian GSSP in Prague (work in progress). The missing portion of the lowest Devonian at the base of the section (Fig. 4) is covered by our earlier work at the Silurian/Devonian GSSP in the Czech Republic (Crick et al. 2001). The uppermost Lower Devonian is not yet well defined biostratigraphically, but we and others (Plodowski et al., 2000) believe it is represented in the uppermost portion of the Jebel Issimour section (Fig. 4). Here we report MS data from the lowermost Lower Devonian (Lochkovian Stage) to the lowermost Middle Devonian from samples collected at Jebel Issimour.

The Jebel Mech Irdane Section

We report separately two portions of the Jebel Mech Irdane section (Fig. 1) that we have sampled and analyzed (Figs. 5 and 6). While the GSSP for the base of the Givetian Stage has been the main focus of work at Jebel Mech Irdane, below this level there are exposures extending down well into the Emsian. This includes excellent exposures of the entire Eifelian Stage, and this is the focus of part of our work reported here (Fig. 5).

The Eifelian begins within the Chotec Interval, a relatively minor biological disturbance that has been discussed by House (2002) and others. The sequence ends in the Kačák Interval discussed below. It is within the Kačák Event (House, 1985) that the Eifelian/Givetian (E/G) GSSP and therefore definition of the base of the Givetian occurs. The Jebel Mech Irdane section that we report here ends in the upper *pumilio* layer.

The E/G GSSP at Jebel Mech Irdane was formally ratified by the International Commission on Stratigraphy (ICS) of the International Union of Geological Sciences (IUGS) in 1994, and the specifics of the E/G GSSP were published in *Episodes* by Walliser et al. (1995). Based on biostratigraphic studies, this and other work (e.g., House, 1985; Walliser, 2000) has identified a global environmental/biological disturbance that began just below the E/G boundary and extends slightly above the boundary (House, 1985; Walliser et al., 1995; Walliser, 2000; ElHassani et al., 2009; Ellwood et al., in press). Depending on criteria and magnitude, this disturbance has been variously named the *otomari* or L'Ei 1 Event (Walliser, 2000) and Kačák Event (House, 1985), and criteria for identifying the duration of this disturbance was based on bio- and litho-stratigraphic data. A number of extinctions of conodont species as well as the first appearance of conodont and goniatite/ammonoid species have been observed within this disturbance, here-after referred to by us as the Kačák Interval. A second extinction level (L'Ei 2; Walliser, 2000) above L'Ei 1 has been identified within this interval where several goniatite genera became extinct and several conodonts and goniatites also appeared (House, 1985; Walliser et al., 1995; Walliser, 2000).

Among other studies of the E/G GSSP section in Morocco was the suggestion that the extinctions and lithologic changes observed within the Kačák Interval may have been the result of a bolide impact (Ellwood et al., 2003). This conclusion was based mainly on the presence of shocked quartz grains concentrated within Bed 117 (identified in Fig.2; bed numbers from Walliser et al., 1995), but they also reported large geochemical and magnetic susceptibility (MS) anomalies within this Interval. These anomalies represent perturbations within the E/G environment and were argued to have been the result of the bolide impact, the causal mechanism behind the extinctions.

The combination of the Eifelian and Givetian exposures at Jebel Mech Irdane provide a data set that includes most of the Middle Devonian. However, in these regions of Morocco (Fig. 1), exposures of the uppermost Middle Devonian and Upper Devonian are truncated and significantly condensed, and not suitable for the high-resolution work that we report here. Therefore, work on the Upper Devonian is not reported here.

RESULTS

Jebel Issemour - Lower Devonian

The δMS for 2,688 samples, collected at 5 and 10 cm intervals from the shale, marl and limestone sequence that is well exposed at Jebel Issimour, was measured at LSU, and we report the results as δMS in Fig. 4. Because there are so many data points, making trends in the data unreadable when the raw data are plotted, we only report the smoothed data (smoothed using splines). Therefore, the very high frequency variations, present in the raw MS data and superimposed on lower frequency trends (smoothed curve), are not given for this data set. The biostratigraphic zonation of Plodowski et al. (2000) was used by us in placing the boundary intervals represented in Figure 4 (dashed lines). Lithologic units A through the base of E (Hollard, 1974) are also reported and their position within the section was taken from Plodowski et al. (2000). Overall, δMS results show trends that we generally interpret as T/R cycles. A very low-frequency cycle begins at the base of the section, with increasing δMS values representing a regression trend (falling sea-level) that lasts into the Lower Emsian. This trend abruptly changes into a large-magnitude T/R cycle pair ending in the lowermost Upper Emsian. Transgression begins in the lowest Upper Emsian and extends up to the middle of lithologic zone D2, where the signal changes to a T/R cyclicity with no overall distinctive transgressive or regressive trends. In the uppermost Upper Emsian, two pronounced T/R cycles culminate in a strong transgression, producing δMS values that represent some of the lowest values in the section. This level begins the Chotec Interval bioevent (top of Fig. 4).

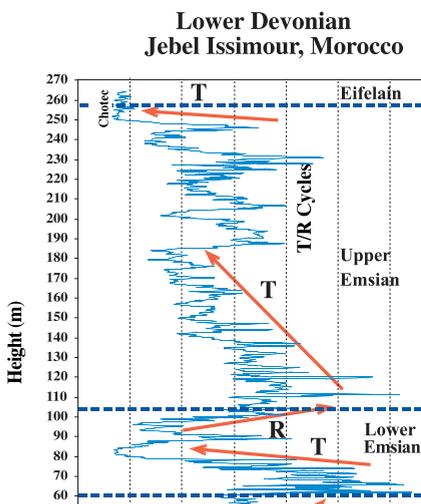


Figure 4. MS results from the Jebel Issimour section, Morocco (JIS in Fig. 1 (C)), including data from the Lowermost Lower Devonian Lochkovian Stage to the Lowermost Middle Devonian Eifelian Stage (biostratigraphic placement of boundary intervals from Plodowski et al., 1999). Arrows are interpreted from the MS data to represent transgressive/regressive (T/R) sea-level cycles. «Lith Units» are from Walliser (2000).

This change occurs at the base of Lith Unit E and the trend extends into the lowermost Eifelian where it ends. Within Lith Unit E there is a slight trend toward regression that is amplified further in the Emsian (Fig. 5). Superimposed on the long-term δMS trends observed in the Issimour section are many high-frequency δMS cycles.

Jebel Mech Irdane - Lower Middle Devonian: Eifelian

The δMS for 191 samples, collected at 5 cm intervals from the mainly Eifelian limestone sequence at Jebel Mech Irdane, was measured at LSU, and we report the results as δMS in Fig. 5. The sequence reported here starts in the very uppermost Emsian with the Chotec Interval, and ends in the very lowermost Givetian within the Kačák Interval. T/R cyclicality begins with a long period of regression in Lith Unit E, followed by sea level rise to the base of Unit F. Unit F exhibits a pronounced, rapid regression that is very short lived, followed by rapid transgression in the uppermost segment of Unit F. Above Unit F, most of the section is represented by Unit G regression. At the top of Unit G, moderate magnitude T/R cycles occur that lead into a broad megacycle that begins with transgression, where maximum transgression represents the beginning of the Kacak Interval (Lith Unit H) that extends into the Givetian. The regression phase of this cycle ends at the beginning of Unit I in the Givetian.

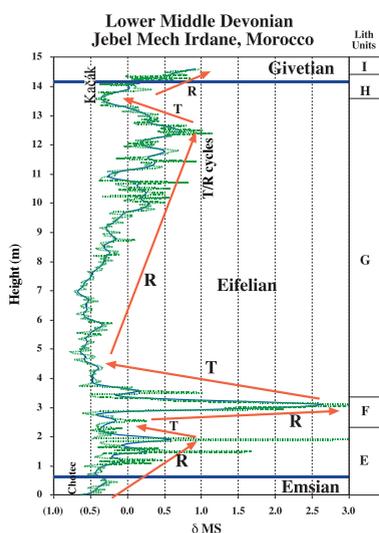


Figure 5. MS results for the entire Eifelian sequence, Lower Middle Devonian in age, collected from the Mech Irdane section (Fig. 1, B). Arrows are interpreted from the MS data to represent transgressive/regressive (T/R) sea-level cycles. "Lith Units" are from Walliser (2000).

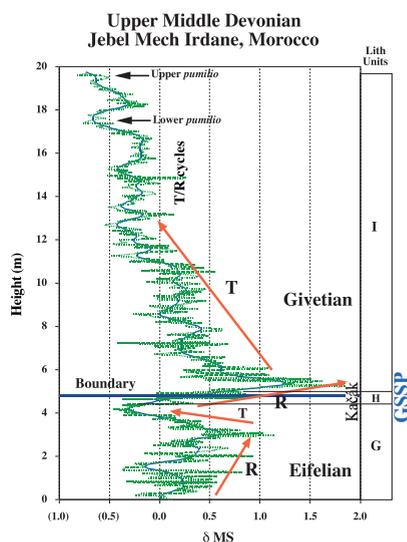


Figure 6. MS results for most of the Givetian sequence (including the Eifelian/Givetian GSSP; Walliser et al., 1995), Lower Middle Devonian in age, collected from the Mech Irdane section (Fig. 1, B). (The figure is modified from Ellwood et al., in press.) Arrows are interpreted from the MS data to represent transgressive/regressive (T/R) sea-level cycles. An unconformity above the punilio beds (identified in the section) truncates the Uppermost Middle Devonian. Figure modified from Ellwood et al. (in press). "Lith Units" are from Walliser (2000).

Jebel Mech Irdane - Upper Middle Devonian : Givetian

The δMS for 412 samples, collected mainly at 5 cm intervals from the dominantly limestone sequence at Jebel Mech Irdane for much of the Givetian, was measured at LSU, and we report the results as δMS in Figure 6 (modified from Ellwood et al., in press). Closer sampling was used through the E/G GSSP interval at the base of Figure 6. This sequence begins in the Upper Eifelian and extends to just above the distinctive *T. pumilio* biomarker beds in the uppermost part of the section. The section includes the end of Walliser's lithologic Units G and H, discussed for Fig. 5 above. The main part of the section is represented by Lith Unit I that extends above the *T. pumilio* beds, labeled at the top of the section. Most of the sequence representing Lith Unit I exhibits long-term transgression, with pronounced T/R cyclicity observed at the top of the section sampled. Both *T. pumilio* bioevent beds are associated with very low δMS values indicating sea-level high stands (Fig. 6).

DISCUSSION

Reporting the MS data as δMS (Fig. 4-6), has allowed us to directly compare the MS magnitudes among these sections as well as contrasting these data with a known global MS data set. The result shows that both the Jebel Issimour and Jebel Mech Irdane data sets have similar values. This is expected because these sections are located at a similar distance from source of detrital material. The δMS data reported here are typical for marine samples, but in the main, they exhibit a slightly higher δMS than the median marine value.

Jebel Issimour - Lower Devonian

All of the bioevents recognized in the data sets reported here occur at times where MS values are quite low, and these are interpreted to represent times of sea-level high-stands at that point in each section. In support of this interpretation of the MS data, independent studies of these bioevents show sea-level high stands at those times. The two major peaks representing low MS values within Walliser's lithologic Unit C, deposited during the Zlichovian/Lower Emsian Stage (Plodowski et al., 2000), appear to precede and thus set the stage for the Mid-Emsian, Daleje bioevent that follows. The low δMS values observed at this time, exhibit rapid and large swings in T/R cycling, but there are no major marine extinction events reported for this time. We believe that there are two reasonable interpretations for these data. On the one hand these data indicate gradual sea-level rise beginning in the Lochkovian (Lith Unit A), through Unit B and ending in the base of Unit C in the Lower Emsian where two large amplitude T/R cycles occur. These Lower Devonian trends may be the result in the Lochkovian and Pragian of the steady movement and eventual closing of Laurentia against Gondwana during this time. On the other hand, the long-term trend in the Lochkovian and Pragian toward higher MS values may have resulted from long-term structural changes in plants, with the steady development of new plant-driven chemical weathering processes, culminating in Lith Unit C where two very large MS megacycles occur. During the Pragian and into the Lower Emsian, plants were spreading across continents and developing complex structures for the first time (Gensel et al., 2001). The development of root systems and corresponding increases in chemical

weathering, may have resulted in anomalous erosional pulses that produced periodic high detrital fluxes into the marine environment that lasted until the newly developing soil systems stabilized. In this case, the observed variations may not have been the result of T/R cycles as indicated in Fig. 4. Most of the high frequency cycles, that are superimposed on low-frequency trends, we attribute to climate, but unconformities in this data set prevent the section from producing good time series trends.

The unusual character observed in Unit C is followed by relatively high δMS values in the lower part of Unit D1 (lowest-most Upper Emsian) with transgression throughout the rest of Unit D1 and into the middle of Unit D2, where there appears to be truncation and missing section. Here the MS character changes to one of moderate magnitude T/R cycles that end at the base of Unit E in the uppermost Lower Devonian. Unit E shows a distinctive drop in δMS values associated with the Chotec Interval (House, 2002), followed by a gradual regression that extends into the Eifelian.

Jebel Mech Irdane - Lower Middle Devonian: Eifelian Stage

Eifelian Stage rocks are well exposed at Mech Irdane and contain the end of the Chotec Interval, a bioevent discussed by House (2002) and others. This has been characterized as a minor event during times of dysoxic or possibly anoxic conditions where the faunal assemblage was stressed but where no major extinctions are recognized. It was a time of high sea level and this is reflected in the low δMS values observed (Fig. 5), recorded both here and at the top of the section at Jebel Issimour (Fig. 4). Through most of the Eifelian, δMS values increase but then exhibit fairly strong T/R cycles near the top of the Eifelian, leading into the Kačák Interval that begins in the uppermost Eifelian and extends into the Givetian.

One exceptionally large peak in δMS values, that we attribute to a regression pulse, is situated within Lithologic Unit F. This level is not recognized as a bioevent, although there are some unusual lithologic changes, including identification of a Styliolinite level and associated rapid facies changes at about the level where we see these very high δMS values (Walliser, 2000).

Jebel Mech Irdane - Upper Middle Devonian: Givetian Stage

Lower and Middle Givetian Stage rocks are well exposed at Jebel Mech Irdane, including the E/G GSSP (Walliser et al., 1995). The data set we report here begins below the Kačák Interval in the Upper Eifelian, extends through the Kačák Interval, and ends with the upper *T. pumilio* event at the top of the section. Above this level unconformities and seriously condensed section prohibit acquisition of reasonably complete MS or other data sets. Through much of the section, with the exception of the Kačák Interval in the lowest Givetian, δMS values fall relatively steadily, with pronounced lows associated with the *pumilio* levels. We attribute these values to result from reduced detrital fluxes into the marine environment due to sea levels rising during this time, and near-shore trapping of detrital components.

The Kačák Interval Bio-event

The Kačák Interval represents an important bio-event that has been discussed and redefined by a number of workers, such that there is some confusion as to the duration and magnitude of what is represented (House, 1985; Walliser, 1990; 2000; Walliser et al., 1995; Schöne, 1997; House, 2002; DeSantis et al., 2007; Ellwood et al., in press). However there is agreement that onset of the Kačák Interval is associated with transgression and corresponding dysoxic or anoxic bottom waters below the E/G boundary. Extinctions identified during this time are attributed to a transgressive anoxic event beginning at the base of marl Bed 117 (Fig. 2; Walliser et al., 1995), equivalent to the onset of the stepped T/R cycle If of Johnson et al. (1985). The MS data for this time are consistent with this T/R cycle interpretation, with δMS values cycling from low to high through this interval (Fig. 5, 6).

While Walliser in several papers has restricted the Kačák to the latest Eifelian (i.e., Walliser, 2000), House (2002) indicated that the Kačák interval extended to slightly above the GSSP boundary level, and the geochemical and MS data associated with this interval clearly support this interpretation (Ellwood et al., in press). Furthermore, our data indicate that the Kačák Interval probably extends to almost a meter above the boundary (Figs. 5, 6). In addition, there are other perturbations that we see occurring below the base of Bed 117, perhaps to as much as ~1 m below the E/G boundary level. Clearly these major changes had a strong impact on the environment, suggesting that there must have been a major effect on the biota.

MS data for the Jebel Mech Irdane section exhibit clear cyclicity, as demonstrated by the FT work of Ellwood et al. (in press). This work has identified four Milankovitch cycles, two longer-term eccentricity peaks (E1 ~405 kyr; E2 ~100 kyr), one shorter-term obliquity peak (O1 ~32 kyr) and one short-term precessional peak (P2 ~20 kyr). This has allowed estimates for the duration of the Kačák Interval of ~200 kyr (Ellwood et al., in press).

*The *T. pumilio* beds*

In the upper part of the mainly carbonate sequence at Jebel Mech Irdane are the distinctive "*Terebratula*" *pumilio* beds, two layers ~0.2 m thick, each separated by ~2 m of limestone (Fig. 6). These beds contain high concentrations of small, "*T.*" *pumilio* brachiopods that are argued to have been brought to the site by tsunami events (Lottmann, 1990a,b). Our δMS data indicate long-term transgression (lower δMS values up-section) from the E/G boundary upward, and each *pumilio* layer is found within some of the lowest δMS values in the section. These low values we interpret to represent maximum flooding surfaces. We hypothesize that these high stands, interpreted from low δMS values, represent starvation surfaces where winnowing and high productivity concentrated the small shells of these organisms, a mechanism suggested by Brett and Baird (1997).

CONCLUSIONS

We have collected two Lower and Middle Devonian, biostratigraphically well-defined marine sections from the Eastern Anti Atlas desert of Morocco, measured the MS for samples and evaluated the results. The Jebel Issimour section, from the Mader Basin,

includes Lochkovian through lowest-most Eifelian samples, while the Jebel Mech Irdane section, from the Tafilalt Platform, includes Eifelian and Givetian samples. Samples exhibit δMS values that are typical for marine sedimentary rocks, and similar ranges are seen among the two sections.

For Lower Devonian samples from Jebel Issimour, our data show well-defined and long term T/R cycles, with high-frequency climate cyclicity superimposed on long-term trends. Two possible explanations exist for two, large amplitude, relatively long wavelength megacycles observed in the Lower Emsian data set represented here. First, these two cycles are associated with the closure of Laurentia with Gondwana at this time. The steady fall in sea-level interpreted from the δMS data for the Lochkovian and Pragian results from the steady reduction in ocean basin area during the closure process. Reorganization following collision, may have caused dramatic sea-level pulses and these are reflected in the MS data for the Lower Emsian. Second, these data are due to the changes in plant structure and morphology going on at this time. The development of complex structures as plants moved across continents for the first time, rapidly evolving during the Pragian and Lower Emsian, developing root systems and driving enhanced chemical weathering, may have been responsible for the somewhat anomalous δMS megacycles observed. Then, following soil stabilization at the end of the Lower Emsian, the δMS data sets reflect normal marine cyclicities. No strong marine bio-events are recognized during the time that these samples were deposited.

The Jebel Mech Irdane data set for the Middle Devonian, contains two bio-events, the Chotec and Kačák Intervals, as well as the "*Terebratula*" *pumilio* beds at the top of the Givetian. The Chotec actually begins in the Lower Devonian and extends into the lowermost Eifelian. It is represented by a sea-level high stand and corresponding low δMS values, and is a low-amplitude bio-event. Above this there is an abrupt high δMS pulse, occurring in the Lower Eifelian, that appears to represent an ecological disturbance that is not reflected in extinctions. Through the rest of the Eifelian, δMS values slowly increase, indicating falling sea-level. This changes with the onset of the Kačák Interval, a major bioevent, that begins with a rapid sea-level rise and corresponding drop in δMS values. There follows a strong, rapid regression and transgression to δMS values more or less equivalent to values immediately preceding onset of the Kačák Interval. Through the rest of the Givetian exposure at Jebel Mech Irdane, there is a trend where sea-level is rising, with clear T/R cyclicity. This culminates in the very low δMS values observed for the *pumilio* beds, and maximum sea-level highs at that time. No extinctions are recorded in association with these marker beds.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful for support to the Institut Scientifique, Rabat, Morocco. We wish to thank S. Ellwood for her important contribution to this work in designing the sampling method used in collecting our samples, for her participation in collecting all of the samples reported here, and for other significant contributions to the research. This work was funded in part by grants to R.E. Crick and BBE from the National Science Foundation (EAR-9628202).

REFERENCES CITED

- Allen, J.R.M., Brandt, U., Brauer, A., Hubberten, H-W., Huntley, B., Keller, J., Kraml, M., Mackensen, A., Mingram, J., Negendank, J.F.W., Nowaczyk, N.R., Oberhänsli, H., Watts, W.A., Wulf, S. and Zolitschka, B., 1999, Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period: *Nature*, v. 400, p. 740-743.
- Banerjee, S.K., 1996, Sediment reveals early Holocene climate change in China: EOS, Transactions, American Geophysical Union, v. 77, p. 3 and 5.
- Brett, C.E., Baird, G.C., 1997. Epiboles, outages, and ecological evolutionary bioevents: Taphonomic, ecological, and evolutionary factors. In Brett, C.E. Baird, G.C. (Eds.), *Paleontological Events: Stratigraphic, Ecological, and Evolutionary Implications*. Columbia University Press, New York, pp. 249-285.
- Crick, R.E., Ellwood, B.B., ElHassani, A., Feist, R., and Hladil, J., 1997, Magnetosusceptibility event and cyclostratigraphy (MSEC) of the Eifelian - Givetian GSSP and associated boundary sequences in North Africa and Europe, *Episodes*: v. 20, p. 167-175.
- Crick, R.E., Ellwood, B.B., El Hassani, A., Hladil, J., Hrouda, F., and Chlupac, I., 2001. Magnetostratigraphy Susceptibility of the Pridoli-Lochkovian (Silurian-Devonian) GSSP (Klonk, Czech Republic) and a Coeval sequence in Anti-Atlas Morocco, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167, 73-100.
- da Silva, A-C., Boulvain, F., 2002. Sedimentology, magnetic susceptibility and isotopes of a Middle Frasnian carbonate platform: Tailfer Section, Belgium. *Facies* 46, 89-102.
- DeSantis, M.K., Brett, C.E., Ver Straeten, C.A., 2007. Persistent depositional sequences and bioevents in the Eifelian (early Middle Devonian) of eastern Laurentia: North America. Evidence of the Kačák Events? In: Becker, R.T., Kirchgasser, W.T. (Eds), *Devonian Events and Correlations*. Geological Society of London, Special Publications 278, pp. 83-104.
- El Hassani, A., Ellwood, B.B., Algeo, T., Tomkin, J.H., Rowe, H. 2009, Timing and Extent of the Kačák Interval Within the Eifelian-Givetian Boundary GSSP, Mech Irdane, Morocco, Using Geochemical and magnetic susceptibility patterns. *IGCP 580: Magnetic susceptibility, correlations and paleoenvironments*, Liège University Belgium, p.26
- Ellwood, B.B., Algeo, T., El Hassani, A., Tomkin, J.H., Rowe, H., 2010, Defining the Timing and Duration of the Kačák Interval within the Eifelian/Givetian Boundary GSSP, Mech Irdane, Morocco, Using Geochemical and Magnetic Susceptibility Patterns, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, in press.
- Ellwood, B.B., Petruso, K.M., Harrold, F.B., and , Schuldenrein, J., 1997, High-resolution paleoclimatic trends for the Holocene identified using magnetic susceptibility data from archaeological excavations in Caves : *Journal of Archaeological Sciences*, v. 24, p. 569-573.

- Ellwood, B.B., Crick, R.E., and El Hassani, A., 1999, The magnetosusceptibility event and cyclostratigraphy (MSEC) method used in geological correlation of Devonian rocks from Anti-Atlas Morocco: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 83, p. 1119-1134.
- Ellwood, B.B., Crick, R.E., El Hassani, A., Benoist, S. and Young, R., 2000. MagnetoSusceptibility Event and Cyclostratigraphy (MSEC) in Marine Rocks and the Question of Detrital Input Versus Carbonate Productivity, *Geology*, 28, 1135 - 1138.
- Ellwood, B.B., Benoist, S.L., El Hassani, A., Wheeler, C., Crick, R.E., 2003. Impact ejecta layer from the Mid-Devonian: Possible connection to global mass extinctions. *Science* 300, 1734-1737.
- Ellwood, B.B., Tomkin, J.H., Febo, L.A., Stuart, C.N., Jr., 2008b. Time Series Analysis of Magnetic Susceptibility Variations in Deep Marine Sediments: A Test Using Upper Danian-Lower Selandian Proposed GSSP, Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 261, 270-279.
- Ellwood, B.B., Tomkin, J.H., Ratcliffe, K.T., Wright, M., Kafafy, A.M., 2008a. High Resolution Magnetic Susceptibility and Geochemistry for the Cenomanian/Turonian Boundary GSSP with Correlation to Time Equivalent Core. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 261, 105-126.
- Ellwood, B.B., Tomkin, J., Richards, B., Benoist, S.L., and Lambert, L.L., 2007. MSEC Data Sets Record Glacially Driven Cyclicity: Examples from the Arrow Canyon Mississippian-Pennsylvanian GSSP and Associated Sections, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 255, 377-390.
- Gensel, P.G., Kotyk, M.E., Basinger, J.F., 2001, Morphology of above- and below-ground structures in Early Devonian (Pragian-Emsian) plants. In: Gensel, P. G., and Edwards, D. (Eds.), *Plants Invade the Land: Evolutionary & Environmental Perspectives*. Cambridge University Press, New York, pp. 83-102.
- Hansen, H.J., Rasmussen, K.L., Liu Qingsheng, Walaszczyk, B.I., Gwozdz, R., and Stage M., 1993, Correlation of marine and terrestrial Upper Cretaceous sediments by their magnetic susceptibility, *Bulletin of the Geological Society [Denmark]*, v. 40, p. 175-184.
- Heller, F., and Evans, M.E., 1995, Loess magnetism: Reviews of Geophysics, v. 33, p. 211-240.
- Hollard, H., 1974, Recherches sur la stratigraphie des formations du Devonien Moyen, de l'Emsien supérieur au Frasnien, dans le sud du Tafilalt et dans le Maïder (Anti-Atlas Oriental). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, t. 36, N° 264, pp. 7-68.
- House, M.R., 1985. Correlation of mid-Palaeozoic ammonoids evolutionary events with global sedimentary perturbations. *Nature* 313, 17-22.
- House, M.R., 2002. Strength, timing, setting and cause of mid-Palaeozoic extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 181, 5-25.

- Johnson, J.G., Klapper, G., Sandberg, C.A., 1985. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica. *Geological Society of America Bulletin* 96, 567-587.
- Jovane, L., Florindo, F., Sprovieri, M., Pälike, H., 2006. Astronomical calibration of the late Eocene/early Oligocene Massignano section (central Italy). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, 10p., Q0712, doi:10.1029/2005GC001195.
- Lottmann, J., 1990a. Die *pumilio*-Events (Mittel-Devon). *Gottinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie* 44, 99 pp.
- Lottmann, J., 1990b. The Middle Givetian *pumilio*-Events a tool for high resolution and event-stratigraphical correlation. In: *Extinction Events in Earth History* 30, pp. 145-149.
- Maher, B.A., 1998, Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications : Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 137, p. 25-54.
- Michard, A., 1976, *Éléments de géologie marocaine. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, N° 252, pp. 408.
- Plodowski, G., Becker, G., Brocke, R., Jansen, U., Lazreq, N., Schindler, E., Schraut, G., Walliser, O.H., Weddige, K., and Ziegler, W. 1999, The section at Jebel Issimour (NW Maïder, Early to early Middle Devonian). First results with respect to lithology and biostratigraphy, In El Hassani, A. and Tahiri, A., eds, *SDS-IGCP 421 Morocco Meeting Excursion Guidebook, Part I: Tafilalt and Maïder (eastern Anti Atlas): Institut Scientifique, Rabat*, p. 45-53.
- Shackelton, N.J., 1999, Will oxygen isotope stratigraphy survive to the next millennium: Eos (*Transactions American Geophysical Union*), v. 80, p. F505.
- Swartzendruber, L.J., 1992. Properties, units and constants in magnetism. *Journal of Magnetic Materials* 100, 573-575.
- Tite, M.S., and Linington, R.E., 1975, Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils: *Nature*, v. 256, p. 565 - 566.
- Walliser, O.H., Bultynck, P., Weddige, K., Becker, R.T., House M.R., 1995, Definition of the Eifelian-Givetian Stage boundary, *Episodes*, 18, 107-115.
- Walliser, O.H., 2000, The Jebel Mech Irdane section. *Notes et Mémoires du Service Géologique*, N. 399, 57-62, Édition du Service Géologique du Maroc, Rabat.
- Weedon, G.P., Jenkyns, H.C., Coe, A.L., Hesselbo, S.P., 1999. Astronomical calibration of the Jurassic time-scale from cyclostratigraphy in British mudrock formations. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, A 357, 1787-1813.
- Whalen, M.T., Day, J.E., 2008. Magnetic susceptibility, biostratigraphy, and sequence stratigraphy: Insights into Devonian carbonate platform development and basin infilling, Western Alberta. In: Lukasik, J., Simo, J.A. (Eds.), *Papers on Phanerozoic Reef Carbonates in Honor of Wolfgang Schlager*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication 89, pp. 291-314.

Valorisation du CO₂: de nouvelles opportunités pour le Maroc

Mahfoud ZIYAD ¹ et Philippe A. TANGUY ²

¹ Membre correspondant de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Laboratoire de Physico-chimie des Matériaux et Catalyse, Université Mohammed V - Agdal,
Avenue Ibn Battouta, B.P. 1014, Rabat, Maroc

² Membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Direction scientifique, Total S.A., 2 place Jean Millier, 92078 Paris La Défense, France

Abstract

The continuous increase of CO₂ concentration in the atmosphere has become an important issue because it impacts the global climate and might modify the future of the humanity. Catalysis can reduce this concentration by converting CO₂ into useful compounds or by fixing it in organic or inorganic carbonates. In all these syntheses CO₂ is used as a building block for the manufacturing of more sophisticated chemicals. The implementation of these processes needs innovative technologies for capturing CO₂ followed by either geosequestration or its utilization as a carbon source to produce chemicals in view of establishing the so called "Sustainable Society".

Several publications have reported studies on the hydrogenation of CO₂ to methanol and to fuels as in Fischer-Tropsch synthesis. The hydrogenation of CO₂ to form formic acid and methyl formate by using metal-complex-catalysts in supercritical carbon dioxide has also been widely described in the literature.

The hydrothermal reactions have played a crucial role in the formation of fossil fuels. Similar reactions can be used to convert CO₂ into organics in the presence of Fe and Ni as a reductant and a catalyst respectively.

The electrochemical and the photoelectrocatalytic methods, when associated with the use of renewable energies, appear to be the appropriate methods for the conversion of CO₂. The direct electrochemical reduction of CO₂ allows the production of hydrocarbons, alcohols such as ethanol and propanol and urea. However, the distribution of the reaction products is very sensitive to the nature and the structure of the surface of the electrode.

Carbon dioxide conversion to fuels and chemicals using enzymatic routes is also an active R&D area that might offers challenges and opportunities to various industries. In the same way, the biological conversion of CO₂, and in particular by the use of micro-algae, is very promising especially because the photosynthetic efficiency of aquatic biomass (6 to 8%) is much higher than that of terrestrial (1.8 to 2.2%).

1. Introduction

Le dioxyde de carbone ou CO_2 est présent à l'état naturel dans l'atmosphère et joue un rôle indispensable dans le cycle du carbone à la base de la croissance des végétaux. Mais le CO_2 est aussi un gaz à effet de serre et sa concentration dans l'atmosphère à des taux très supérieurs à ce prévalant avant la révolution industrielle est en partie à l'origine des changements climatiques. Rappelons que ces changements compromettent le développement durable qui a pour but essentiel de '*satisfaire nos besoins actuels sans pour autant compromettre la réalisation des besoins des générations futures*' [1, 2].

La variation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère a en effet évolué de manière significative en raison de l'activité humaine. En l'espace de 200 ans, sa teneur dans l'atmosphère terrestre s'est accrue de 90 ppm, soit l'équivalent de 480 milliards de tonnes de CO_2 [3]. Ces dernières années, cette concentration augmente au rythme de 1,5 ppm par an, soit l'équivalent de 8 milliards de tonnes supplémentaires par an. Selon les derniers travaux du GIEC, cette accumulation de gaz carbonique dans l'atmosphère couplée à celle d'autres gaz à effet de serre tels les oxydes nitreux, les carbones halogénés, le méthane et l'ozone, entraînera à l'horizon 2050 une augmentation des températures moyennes sur terre de plusieurs degrés et bouleversera les profils de précipitation, avec une pluviométrie diminuée dans les régions déjà arides. Les régions les plus affectées sont localisées dans les zones subtropicales et tropicales, dont le Maroc.

Plusieurs scénarios sont envisagés pour stabiliser la concentration de gaz carbonique et espérer ainsi contrôler le réchauffement global; tous s'appuient sur la diminution des rejets de gaz à effet de serre obtenue par la combinaison de mesures d'efficacité énergétique et de décarbonisation de l'énergie pour les transports (en clair, l'électrification du transport automobile), et de substitution graduelle du charbon par le gaz naturel ou l'énergie nucléaire, sans oublier bien sûr les énergies renouvelables (solaires et éoliennes) pour la production d'électricité dans les centrales thermiques.

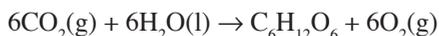
Des travaux sont également en cours sur la viabilité de la capture du gaz carbonique dans les procédés de combustion puis de leur séquestration dans les profondeurs géologiques. Sur ce dernier point, les deux options les plus prometteuses sont la réinjection du CO_2 dans les champs pétroliers (1 million de tonnes sont réinjectées chaque année dans le champ de Sleipner en Mer du Nord dans un but de récupération assistée du pétrole) et l'enfouissement géologique comme dans des anciens réservoirs de gaz déplétés. Mentionnons à cet effet le projet pilote de capture et de stockage du CO_2 de Lacq en France, dont l'objectif est d'étudier la faisabilité technique et économique de la séquestration géologique. Avec ce pilote entièrement financé par le groupe TOTAL, 120000 tonnes de gaz carbonique concentrés (produit par une chaudière de 32 MWth fonctionnant par oxycombustion de gaz naturel) sont en cours d'injection dans le réservoir de Rousse, un ancien gisement de gaz à 4500 m de profondeur sous les Pyrénées. Le projet Otway du CO_2 CRC australien est un autre exemple d'actualité visant à tester la faisabilité de la séquestration géologique dans des aquifères salins.

La capture du CO_2 n'est pas neutre en termes de consommation d'énergie et peut même dégrader le bilan carbone du procédé, ou en diminuer le rendement. La voie classique

consiste à utiliser l'absorption chimique sur des solutions d'amines, solutions qui sont ensuite recyclées par stripping. Cette forme de séparation par distillation requiert 20 à 30% d'énergie supplémentaire par rapport à la consommation sans traitement. D'autres procédés de capture sont possibles, par adsorption sur des matériaux poreux comme les zéolithes, la distillation à froid (cryogénie) ou par membranes. Ils font tous l'objet de recherches approfondies en laboratoire, les deux verrous technologiques étant la diminution de la consommation énergétique et le passage à l'échelle industrielle (scale-up).

Ces dernières années, plusieurs études ayant pour objectif de faire du gaz carbonique une ressource valorisable et facile à gérer et non un rejet coûteux et problématique à stocker, ont été menées comme par exemple dans certaines synthèses utilisant des produits toxiques tels le phosgène ou les isocyanates [4, 5]. Mais la tâche est ardue car le CO₂ est une molécule thermodynamiquement stable dans laquelle le carbone se trouve à son degré d'oxydation le plus élevé. Son activation passe par une réduction (ou une électroréduction) qui nécessite de l'énergie et un catalyseur adéquat. C'est d'ailleurs en raison de cette stabilité que dans certaines applications industrielles on préfère faire appel au monoxyde de carbone CO plutôt qu'au dioxyde de carbone au CO₂ bien qu'il soit toxique et de manipulation moins aisée.

Il convient de noter que malgré cette stabilité du CO₂, tous les végétaux savent parfaitement le convertir à la température ambiante et à la pression atmosphérique en composés carbonés dont ils ont besoin pour croître. La réaction chimique globale mise en œuvre est relativement simple; elle convertit le CO₂ en glucose et en O₂ (photosynthèse) et peut s'écrire :



La photosynthèse dans les plantes et le phytoplancton est basée sur la conversion de la lumière solaire en énergie chimique par la chlorophylle [6]. Cette réaction biochimique qui semble simple et qui est à la base de la vie est en réalité complexe dans son mécanisme. A l'heure actuelle, on ne sait pas la reproduire même à très petite échelle [7]. Si un jour on réussit à initier la photosynthèse au laboratoire, on sera en mesure de fabriquer des plantes artificielles.

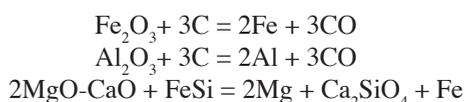
Parmi les technologies susceptibles d'apporter des solutions viables à la diminution des rejets de CO₂ dans l'atmosphère et sa conversion en composés plus nobles, on trouve essentiellement la catalyse homogène et la catalyse hétérogène. La catalyse homogène a l'avantage d'avoir depuis longtemps connu des applications utilisant le CO₂; cependant, elle présente l'inconvénient de mettre en œuvre des réactions se déroulant en phase liquide pour lesquelles il est difficile et coûteux de séparer les produits de la réaction du catalyseur. Les catalyseurs utilisés en catalyse homogène sont souvent polluants et corrosifs. Le défi actuel, compte tenu des exigences en matière de protection de l'environnement et de développement durable, consiste à transformer les réactions de la catalyse homogène en réactions hétérogènes pour lesquelles la séparation des produits et du catalyseur peut se faire par filtration, un procédé mécanique bien établi. Il devient alors possible de récupérer le catalyseur, de le recycler et de réduire le nombre d'étapes qui interviennent dans les synthèses en phase liquide.

Le but de cet article est d'exposer les différentes possibilités de transformation du CO₂ en produits à valeur ajoutée et d'identifier les procédés dans lesquels le Maroc peut s'investir avec des possibilités de réussite. À cet effet, nous passerons en revue toutes les possibilités de conversion catalytique du CO₂ qui pour la plupart font encore l'objet d'intenses recherches dans le but d'optimiser les performances des catalyseurs utilisés et les rendements.

Par cet article, nous voulons également inciter tous les chercheurs à s'investir dans cet axe de recherche qui englobe des thèmes aussi passionnants qu'importants pour le développement durable. C'est en capitalisant des savoirs faire dans ces domaines pluridisciplinaires qu'on pourra accéder à une industrialisation raisonnée et qu'on sera en mesure de relever les défis auxquels nous sommes confrontés. La recherche est nécessaire, car c'est elle qui permet de mettre au point de nouvelles technologies susceptibles de nous aider à régler les problèmes environnementaux majeurs qui se posent à nous.

2. Aspects généraux

Compte tenu de l'augmentation de la demande en énergie pour les transports qui va dépasser l'offre en carburants conventionnels (essence et gazole) d'ici 2020, il est légitime de penser à exploiter le carbone contenu dans le CO₂ en le convertissant en carburants. Cette conversion passe souvent par le difficile problème de la réduction de CO₂ en CO ou en carbone. En métallurgie extractive ce type de réduction qui permet d'isoler l'élément métallique désiré de son oxyde est bien connu et couramment utilisé. Les exemples les plus usuels sont la fabrication du fer, de l'aluminium et du magnésium à partir des oxydes correspondants.



De même, la production de l'hydrogène à partir de H₂O est à ce titre un exemple de réduction important. Le dioxyde de carbone, comme le H₂O et tous les autres oxydes, peut être réduit de la même manière. Certes, sa réduction est difficile, mais pas thermodynamiquement impossible [8]. Le défi consiste donc à trouver le procédé de réduction le plus performant pouvant en même temps utiliser les énergies renouvelables non génératrices d'excédent de CO₂ [9].

L'utilisation actuelle de CO₂ dans des synthèses de produits organiques se limite à la préparation de quelques composés tels que l'urée (pour la production d'engrais azotés et de plastiques), l'acide salicylique (ingrédient pharmaceutique), le polycarbonate (plastiques) et l'acide formique. Les quantités utilisées dans ces procédés restent très faibles et ne peuvent contribuer à une réduction significative des émissions de CO₂. Ce n'est d'ailleurs que lorsque le recyclage de CO₂ est utilisé pour produire des carburants ou d'autres produits à contenu énergétique élevé comme le méthanol, l'éthanol ou le diméthyle éther, qu'on peut assister à une diminution des émissions actuelles. Signalons que le méthanol et l'éthanol peuvent aussi être utilisés dans les piles à combustible pour stocker l'énergie et la restituer sous forme d'électricité.

La production d'hydrocarbures supérieurs à partir de CO₂ consomme beaucoup plus d'hydrogène que la fabrication de composés oxygénés. Par conséquent, cette voie de conversion n'est judicieuse que si on peut produire de l'hydrogène en quantités appréciables non pas à partir de la cryogénie de l'air très consommatrice d'énergie, mais à partir d'énergies renouvelables. Le reformage à sec du méthane par du CO₂ (une réaction techniquement presque maîtrisée à l'échelle industrielle) fournit de l'hydrogène, mais son bilan global de CO₂ est défavorable car elle est consommatrice d'énergie.

La conversion du CO₂ par voies biologiques utilisant par exemple des algues microscopiques (*Spirulina*) ou macroscopiques (*Chaetomorpha linum*) pour produire des composés chimiques et des carburants représente aussi une voie fort prometteuse mais qui en est encore à ses débuts. Comme la photosynthèse, elle nécessite d'importants investissements en recherche pour déboucher sur des applications viables sur le plan technique et commercial [10]. En outre, il reste de nombreux problèmes à solutionner. Parmi ces problèmes on peut citer ceux découlant du choix de l'espèce qui conduira :

- à la production de biocarburant la plus optimisée et à l'extraction de produits secondaires les plus aptes à être valorisés;
- au meilleur rendement en photosynthèse dans un système continu de production;
- au meilleur bilan en CO₂ en comptabilisant les consommations énergétiques dues au pompage de l'eau, aux processus de nettoyage et de séparation, au transfert du CO₂ entre phases et aux exigences de la culture des algues (lagune ou bioréacteur);

à la minimisation de la consommation d'eau et de l'empreinte environnementale liée à la production.

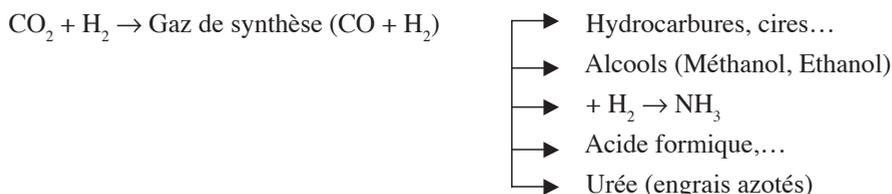
Signalons cependant que la 'filiale algues' constitue un choix d'exception car, outre leur vitesse de croissance très rapide, elles tolèrent et peuvent absorber des teneurs en CO₂ allant jusqu'à 150 000 ppm. Notons également que certaines microalgues eukaryotiques sont capables de produire dans des conditions anaérobiques de l'hydrogène en décomposant l'eau [11].

La valorisation des algues devrait être un axe de recherche prioritaire au Maroc, compte tenu de la grande biodiversité et de la richesse de ses côtes. L'exploitation des algues (rouges et brunes) est déjà une réalité, et les extraits d'algues entrent dans la fabrication de divers produits appréciés à l'échelle internationale (alimentation et cosmétiques ...). Il conviendrait de mieux structurer cette exploitation pour lui donner les moyens de se développer de manière rationnelle et durable et de se diversifier, en particulier au niveau de la valorisation énergétique.

Il est également à noter que la conversion purement chimique est très souvent cinétiquement plus rapide que la voie biochimique. Elle est aussi potentiellement plus simple à mettre en œuvre, mais plus polluante. Toutes ces considérations, qui sont annexes à la réaction proprement dite, entrent en ligne de compte au moment de l'évaluation et du choix du procédé à l'échelle industrielle.

La transformation de CO₂ en hydrocarbures et autres composés chimiques par des *voies vertes* non conventionnelles demeure un énorme défi, une opportunité pour les industries innovantes et une avancée importante pour nos sociétés et leur développement durable. Des recherches poussées en catalyse, en génie de la réaction et en procédés opérationnels sont nécessaires pour introduire progressivement les énergies renouvelables dans les activités polluantes.

Les transformations de base connues peuvent être schématisées comme suit :



Évidemment, ces réactions ne représentent pas toute la chimie qui peut être créée à partir du CO₂. Elles ne correspondent qu'aux briques de base à partir desquelles on pourrait synthétiser et construire toute une nouvelle chimie industrielle.

3. Les procédés de conversion

Pour que la transformation du CO₂ en composés à plus grande valeur ajoutée soit possible, il est nécessaire que l'une au moins des quatre conditions suivantes se retrouve dans le procédé de conversion :

- avoir dans le milieu réactionnel des composés fortement énergétiques tels que l'hydrogène, des produits insaturés, les organométalliques...;
- synthétiser des composés faiblement énergétiques tels que les carbonates organiques;
- déplacer l'équilibre étudié en extrayant le produit désiré du mélange réactionnel;
- approvisionner le système en énergie (de préférence renouvelable).

Avant de passer en revue les différentes techniques de conversion existantes, il est important de noter que le degré de pureté de CO₂ nécessaire pour la mise en œuvre d'une réaction est un paramètre déterminant, car la purification est souvent une opération difficile et onéreuse. Il existe des mélanges pour lesquelles il n'est pas essentiel de disposer de CO₂ pur tel le *tri-reformage* qui consiste en trois réactions dont deux sont endothermiques :



et la troisième, exothermique:



L'association de ces trois réactions permet d'avoir un ensemble thermiquement neutre [12]. Il faut signaler que ces gaz sont des composants anthropogéniques, généralement

issus de foyers de combustion du charbon et de carburants fossiles. Ils constituent la source majoritaire des gaz à effet de serre rejetés par les usines métallurgiques. Ces gaz ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$) peuvent être récupérés, enrichis en oxygène et utilisées pour produire le gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$).

En définitive, tous les procédés connus semblent passer par une étape de réduction. La différence entre eux réside uniquement dans les propriétés du catalyseur utilisé.

3.1 Le reformage catalytique du méthane par le CO_2

Le méthane et le CO_2 sont des gaz à fort effet de serre. Ils peuvent être utilisés pour produire le gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$) précédemment évoqué selon la réaction :



Cette réaction nécessite un catalyseur et des températures voisines de 500°C . Les métaux nobles sont actifs dans le reformage et ont fait l'objet de nombreuses investigations malgré leur prix. Le fer et le nickel ont également été testés et beaucoup d'espoir est placé dans le nickel qui a une bonne activité catalytique et un prix raisonnable. Des essais ont été dernièrement effectués à l'Université Mohammed V – Agdal sur du nickel dispersé sur une apatite synthétique [13]. Les résultats obtenus se comparent bien à ceux publiés avec les catalyseurs conventionnels à base de nickel ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$).

Le gaz de synthèse permet de produire des composés liquides à grande valeur ajoutée par le procédé de Fischer-Tropsch. L'utilisation du reformage par le CO_2 (reformage à sec) au lieu du H_2O (vaporeformage) a l'avantage de produire un gaz de synthèse avec un rapport H_2/CO faible (voisin de 1) plus approprié à la synthèse Fischer-Tropsch [14].

3.2 Hydrogénation de CO_2 : La réaction Fischer-Tropsch

La transformation des oxydes de carbone en hydrocarbures ou alcools est depuis longtemps l'un des grands thèmes de la catalyse. Dans la réduction de ces oxydes en hydrocarbures on distingue la méthanation, où le méthane est le produit principal de la synthèse Fischer-Tropsch (F-T), qui vise plus particulièrement les hydrocarbures liquides. Il n'y a cependant pas de frontière absolue entre les deux car en faisant varier les conditions opératoires on peut constater que, même si la méthanation reste prépondérante sur certains catalyseurs à base de nickel, elle n'est pas la seule à se produire.

L'hydrogénation de CO en CH_4 a été observée pour la première fois par Sabatier [15], et Orlov a été le premier à décrire l'obtention d'hydrocarbures supérieurs par cette réaction [16]. Aux environs de 1925, Fischer et Tropsch (F-T) ont déposé plusieurs brevets sur le procédé de production industrielle d'hydrocarbures contenant des fractions allant de C_5 au C_{10} . La figure 1 suivante montre une usine en Allemagne datant de 1936 qui prouve que la faisabilité du procédé n'était déjà plus à l'époque un obstacle à sa mise en œuvre.

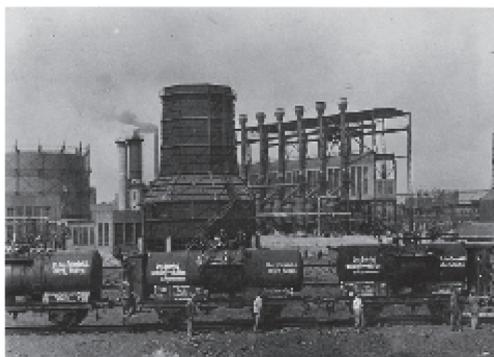
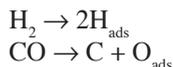
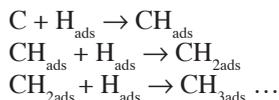


Fig. 1: Usine de synthèse Fischer-Tropsch à Oberhausen avec ses tours de refroidissement et un train de transport du carburant produit (1936).

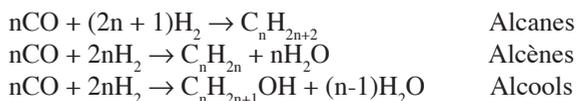
Les métaux qui catalysent ces transformations appartiennent principalement à la triade Fe, Co, Ni, mais il faut ajouter au moins le ruthénium, le rhénium et l'osmium. Evidemment, tous ces métaux catalysent la réaction mais chacun d'entre eux a ses propres particularités. La réaction F-T est exothermique. Elle est handicapée par un empoisonnement relativement rapide du catalyseur par des dépôts carbonés. Des progrès importants ont été réalisés dans l'optimisation des catalyseurs utilisés. Le mécanisme réactionnel est basé sur la formation d'entités CH_x qui se polymérisent. Il peut-être décomposé en deux étapes d'adsorption :



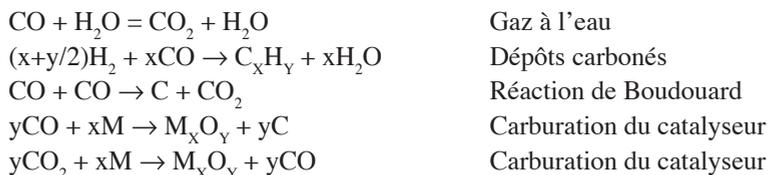
qui sont suivies d'étapes d'hydrogénation :



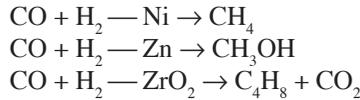
Ces différentes étapes aboutissent à la polymérisation des entités CH_x qui conduisent à des hydrocarbures supérieurs saturés et insaturés et à des produits oxygénés. Les réactions globales en jeu peuvent se résumer comme suit :



Sur ces réactions principales, se greffent des réactions secondaires indésirables telles que:



Le gaz de synthèse peut donc être utilisé soit pour produire des composés chimiques, soit comme vecteur énergétique. Il est hautement flexible dans son utilisation puisque selon le catalyseur choisi et le rapport H_2/CO , on peut synthétiser divers produits comme le montrent les équations suivantes :



La production de méthanol et d'ammoniac nécessite des rapports H_2/CO élevés alors que celle des hydrocarbures a besoin de hautes concentrations en carbone.

Dans cette réaction Fischer-Tropsch, la sélectivité est un facteur déterminant pour la conception du réacteur. Pour une usine produisant par exemple uniquement des C5+ (pentane + hydrocarbures plus lourds), la sélectivité doit être la plus haute possible. Si des cires sont coproduites, leur rendement doit être optimisé.

Il faut souligner que dans pratiquement toutes les réactions précédentes, le CO peut être remplacé par le CO_2 , probablement parce que la réaction débutera toujours par une réduction du CO_2 en CO.

3.2. Hydrogénation de CO_2 en méthanol

Bien que du point de vue technique, la production du méthanol à partir du CO_2 a presque atteint l'étape industrielle, la disponibilité en l'hydrogène et son prix - surtout s'il est produit à partir d'énergies renouvelables - continuent d'être une entrave.



Le méthanol est toxique, mais il peut être à la base de la synthèse catalytique de plusieurs familles de composés selon le schéma suivant:

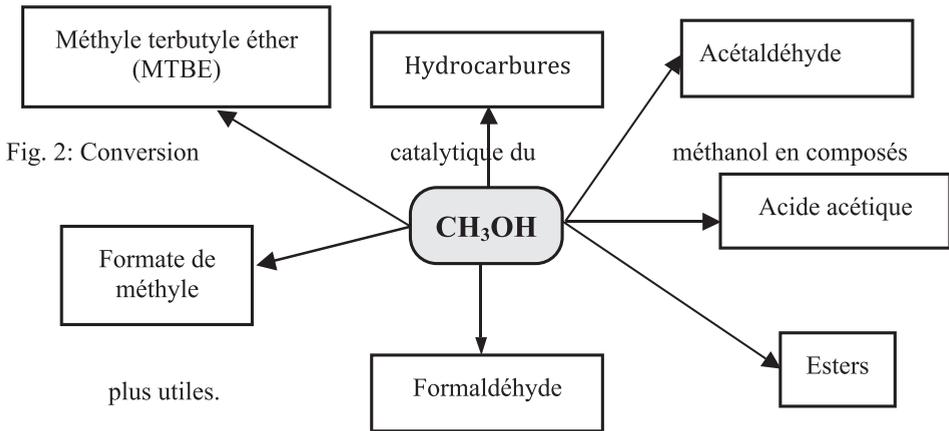


Fig. 2: Conversion catalytique du méthanol en composés plus utiles.

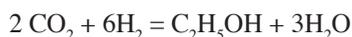
Il est pratiquement admis que le mécanisme réactionnel de production du méthanol ne comprend pas d'étape de réduction de CO_2 en CO. Il semble plutôt passer par la formation de carbonates et de formates. En revanche, l'eau produite par la réaction est néfaste à son développement; elle l'inhibe et diminue la vitesse de production de CH_3OH . Pour améliorer cette synthèse, il conviendrait de développer des catalyseurs qui 'travaillent' à basse température et qui soient moins sensibles à l'eau. La majorité des catalyseurs actuellement utilisés sont à base d'oxydes de Cu-Zn contenant en plus du Al_2O_3 et SiO_2 des ajouts de ZrO_2 et Ga_2O_3 [17].

La faisabilité de la conversion de CO_2 en méthanol a déjà fait l'objet de démonstration et d'essais en réacteurs pilotes [18].

A partir du méthanol, il est possible de synthétiser le diméthyle éther par déshydratation en présence d'un catalyseur acide selon :



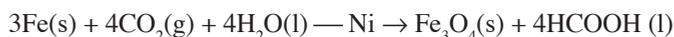
On peut aussi synthétiser par hydrogénation de CO_2 de l'éthanol qui a l'avantage de ne pas être toxique :



Cette réaction peut-être considérée comme une combinaison de la réaction de synthèse de l'éthanol à partir du gaz de synthèse (H_2/CO) et de la réaction du gaz l'eau ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$). Un catalyseur qui, dans les mêmes conditions, serait actif (ex: Rh/SiO) dans les deux réactions séparément, sera assurément actif dans la réaction globale.

3.3. Synthèse de l'acide formique

L'acide formique est utilisé comme intermédiaire chimique, comme solvant ou encore comme désinfectant. L'hydrogénation du CO_2 peut aboutir à la production de l'acide formique, du N,N-diméthyle formamide (DMF) ou du formiate d'éthyle en utilisant comme catalyseur des complexes métalliques dans du CO_2 supercritique [19]. Cette conversion peut être effectuée dans des conditions hydrothermiques relativement douces en utilisant le fer comme réducteur et le nickel comme catalyseur de la réaction, en présence d'eau qui fournit l'hydrogène nécessaire à la réaction [20]. Rappelons que la synthèse hydrothermique est à la base de la formation du pétrole dans la croûte terrestre [21]. Il n'est donc pas surprenant que les synthèses hydrothermiques soient plus performantes que les autres. La réaction globale a lieu aux environs de 300°C et peut s'écrire :



La sélectivité en HCOOH peut atteindre 98% avec un rendement de 15,6%. Elle évolue comme le montre la Fig. 3 suivante :

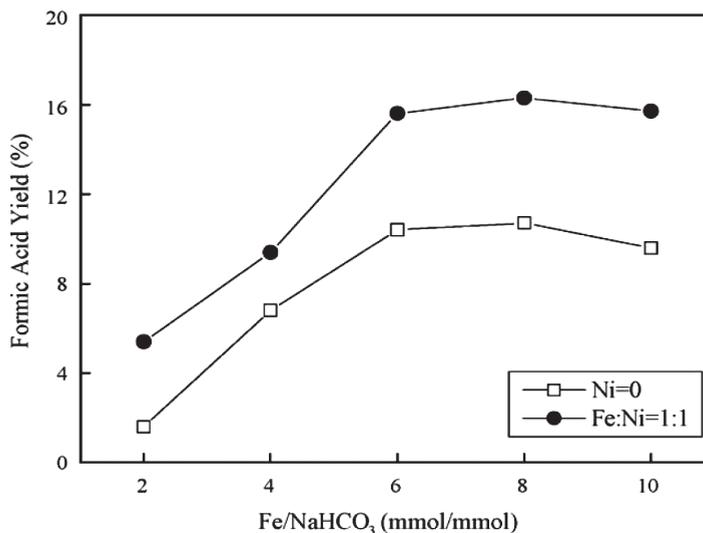


Fig. 3: Rendement en acide formique en fonction de ... (Adapté de [19]).

3.4. Synthèse de l'urée.

Cette réaction est souvent donnée comme exemple typique de '*chimie verte*', car à la découverte de la préparation de l'urée par F. Wöhler (1828), la synthèse était effectuée en décomposant thermiquement le cyanate d'ammonium (NH₄CN). Le cyanate très toxique a rapidement été remplacé par le CO₂, et à l'heure actuelle, l'urée est préparée d'après la réaction globale suivante :



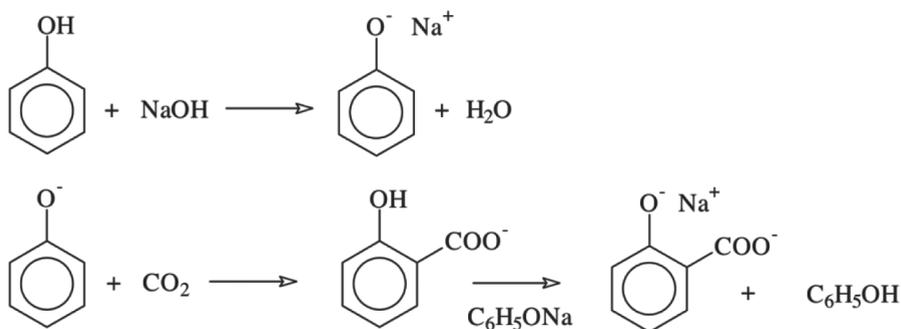
Elle s'effectue à des températures comprises entre 170 et 200°C mais nécessite de hautes pressions (13-30 MPa). L'urée est utilisée dans la synthèse organique d'autres composés tels que le carbonate d'éthyle (CH₃CH₂O)CO par la réaction :



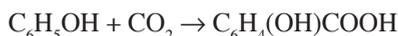
laquelle présente, grâce aux produits synthétisés, une importante valeur ajoutée. L'urée est également un engrais très apprécié à cause de sa haute teneur en azote (46%). La production mondiale d'urée en 2002 avoisinait les 51,8.10⁶ tonnes, ce qui représente environ 81.10⁶ tonnes de CO₂. Le Maroc étant un producteur et un consommateur d'engrais devrait, pour accroître ses capacités dans ce domaine et diversifier sa gamme de produits, disposer d'unités de fabrication d'urée, d'autant plus qu'il s'agit d'un composé de départ dans de nombreuses autres réactions. La synthèse de l'urée consomme des quantités stœchiométriques de CO₂ et d'ammoniac, et par conséquent, la faisabilité de la réaction à l'échelle du Maroc dépend en très grande partie des approvisionnements en NH₃.

3.5. Synthèse de l'acide salicylique

L'acide salicylique a été longtemps produit en utilisant la réaction de Kolbe-Schmitt [22] qui est un procédé en deux étapes très consommatrices d'énergie et qu'on peut schématiser comme suit:



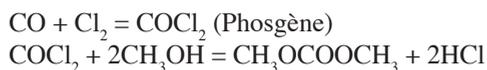
Afin de minimiser cette consommation et de respecter les principes de la chimie verte et du développement durable, un nouveau procédé plus attractif a été mis au point. Il consiste à utiliser du CO_2 supercritique. La réaction globale de synthèse s'écrit :



Elle conduit à des résultats satisfaisants entre la température ambiante et 80°C lorsqu'elle est effectuée en présence d'un catalyseur acide de Lewis tel le bromure d'aluminium (AlBr_3) [23].

3.6. Synthèse de carbonates organiques

La méthode classique de production du diméthyle carbonate utilisait le phosgène. Les réactions mises en jeu sont :



La substitution du phosgène par le CO_2 a permis d'éliminer de la réaction le chlore et le phosgène qui sont hautement toxiques, et partant, difficiles à manipuler.

Le diméthyle carbonate peut être synthétisé à partir du CO_2 et du méthanol en utilisant un catalyseur comme le ZrO_2 . Le diméthyle carbonate (DMC) est un important réactif de méthylation pouvant avantageusement remplacer les halogénures de méthyle et le diméthyle sulfate hautement toxiques. Le DMC peut donc être utilisé pour la synthèse de nouveaux composés par des procédés respectueux de l'environnement. On peut par exemple par transestérification du diméthyle carbonate par le phénol produire du méthyle phénol carbonate conduisant par dismutation au diphényle carbonate [24]. Ces conversions de CO_2 en carbonates organiques représentent une voie très riche en composés nouveaux et une possibilité de stocker de grandes quantités de CO_2 sous forme de polycarbonates.

Ces composés sont des polymères transparents et très résistants aux chocs. Ils sont utilisés dans la fabrication de verres de vue, de lentilles de caméras thermiques, de vitres et phares automobiles ou de prothèses médicales.

3.7. Conversion électrochimique et par photoélectrocatalyse de CO_2

La technique électrochimique de réduction de CO_2 est une technologie souple qui peut être utilisée de façon intermittente, essentiellement lorsqu'on dispose d'excédent d'énergie renouvelable difficile à stocker. Des expériences effectuées sur une électrode en cuivre modifiée ont montré qu'il était possible de produire du méthane, de l'éthane et de l'éthylène [25]. L'efficacité de l'effet catalytique de l'électrode dépend de nombreux facteurs, tels que son état de surface, le pH et la concentration de CO_2 . Des études plus approfondies sont nécessaires pour comprendre et exploiter commercialement les processus mis en jeu dans cette technique. Soulignons que le cycle du carbone décrit dans cette réaction ($\text{CO}_2 + \text{énergie} \rightarrow \text{C1} + \text{C2} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{énergie}$) ne produirait pas d'émission supplémentaire de CO_2 dans l'atmosphère si les apports d'énergie sont d'origine renouvelable.

Il a également été montré qu'on peut par cette technique synthétiser des formiates et de l'urée [26, 27].

La conversion de CO_2 par énergie solaire directe (photocatalyse) ou indirecte (photoélectrocatalyse) est également envisageable. La photoélectrocatalyse a l'avantage de présenter une meilleure efficacité du fait d'une plus faible vitesse de recombinaison des paires e^-/h^+ générées par photoexcitation. La réaction a été étudiée aussi bien en phase homogène qu'hétérogène [28]. La première étape de cette réaction est la transformation de CO_2 en un radical $\cdot\text{CO}_2$ qui se convertit facilement en produits tels que l'acide formique, oxalique et glycolique dont la séparation de la phase liquide est évidemment coûteuse [29].

Une autre possibilité est l'utilisation de l'énergie solaire pour produire des protons et des électrons (par dissociation de l'eau) qui peuvent réduire le CO_2 en alcools et hydrocarbures dans un réacteur photoélectrochimique qui fonctionne de la manière suivante [30] :

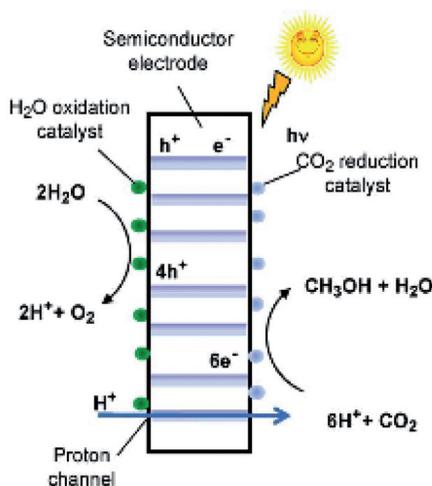
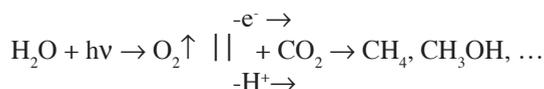


Fig. 4: Modèle simplifié de cellule photoélectrochimique de réduction de CO_2 en Méthanol [31].

et pouvant également être représenté ainsi :

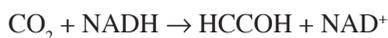


Ce réacteur à membrane est constitué d'un côté d'un photocatalyseur à base de TiO_2 qui oxyde l'eau en O_2 grâce à la lumière solaire. Ce processus fabrique des protons et des électrons qui traversent la membrane pour aller dans le second compartiment du réacteur. Dans ce compartiment, les protons et les électrons réagissent en présence d'un catalyseur avec le CO_2 pour produire du méthane et du méthanol. Le défi dans cette réaction est de développer des catalyseurs fonctionnant à température ambiante, résistant à l'empoisonnement et surtout sélectifs.

3.8. Conversion enzymatique de CO_2

Nous ne pouvons clore cet exposé sans évoquer les apports et les avantages de la catalyse enzymatique qui fait de plus en plus l'objet de recherches ciblées. En effet, les biocatalyseurs sont capables d'effectuer la réduction de CO_2 à la température ambiante et à pression atmosphérique. Certains bio-organismes tel que l'enzyme 'formate déshydrogénase' peuvent réduire le CO_2 en composés utiles. Les mécanismes mis en jeu sont souvent les étapes inverses des réactions métaboliques [32, 33]. Ces réductions biocatalytiques sont intéressantes car elles se déroulent dans des conditions douces et dans des milieux de pureté inférieure à celle qu'exigent les réactions de catalyse classique. Par contre, leurs rendements et les sélectivités sont souvent faibles. Il y a donc lieu d'intensifier les recherches dans ce domaine, afin de mettre au point des biocatalyseurs plus performants.

Des recherches prometteuses ont actuellement cours sur la conversion de CO_2 en acide formique catalysée par la formate déshydrogénase (EC 1.2.1.2) encapsulée dans un gel de silice et utilisant comme donneur d'électrons la forme réduite de la dinucléotide adénine nicotinamide (NADH) selon [34]:



Ce domaine de recherche est très riche et il couvre probablement de vastes axes et des thèmes de recherche où des équipes marocaines confirmées pourraient intervenir avec succès.

4. Conclusion

Il ressort de l'ensemble des résultats présentés que la problématique du CO_2 et de son impact sur le réchauffement de notre planète pourrait être résolue par un ensemble de techniques et de procédés qui existent déjà mais pas suffisamment exploités. Il est donc important que des recherches soient encouragées pour les adapter aux différents besoins et les améliorer. A l'échelle du Maroc, où la production de CO_2 est en nette progression, il est essentiel que des recherches soient engagées afin de maîtriser les technologies et

de contribuer ainsi à l'effort de préservation de l'environnement. Cette implication lui permettra de faire sa place parmi les sociétés du savoir qui se mettent en place.

Evidemment, la meilleure usine de séquestration de CO₂ existe déjà: c'est sans équivoque la photosynthèse car elle ne produit aucun produit secondaire et respecte les principes du développement durable. Il faut que nos procédés de transformation de CO₂ s'en rapprochent le plus possible à défaut de savoir la reproduire.

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les collègues du Collège Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques pour leurs suggestions, leur collaboration et leurs remarques pertinentes qui ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit.

6. Bibliographie

- [1] J. M. Melillo, A. D. Mcguire, D. W. Kicklighter, B. Moore, C. J. Vorosmarty, A. L. Schloss, *Nature* 363 (6426) (1993) 234-240.
- [2] D.S. Schimel, *Global Change Biol.* 1 (1) (1995) 77-91.
- [3] C. Song, *Catalysis Today*, 115 (2006) 2.
- [4] I. Omae, *Catalysis Today*, 115 (2006) 33.
- [5] C. M. White, B. R. Strazisar, E. J. Granite, J. S. Hoffman, *J. Air Waste Manage. Asso.* 53 (2003) 645.
- [6] L. Brennan, P. Owende, *Renewable and Sustainable Energy reviews* 14 (2010) 557.
- [7] Lewis, N.S., Nocera, D.G. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103 (43) (2006) 15729.
- [8] Neale R. Neelameggham and Ramana G Reddy, editors, *Proceedings of Carbon Dioxide Reduction Metallurgy Symposium* (Warrendale, PA: TMS, 2008).
- [9] C. Minero, V. Maurino, in: G. Centi, R.A. Van Santen (Eds.), *Catalysis for Renewables: From Feedstock to Energy Production*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2007, p. 351 (Chapter 16).
- [10] B. Wang, Y. Li, N. Wu, C.Q. Lan, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 79 (5) (2008) 707.
- [11] K. B. Cantrell, T. Ducey, K. S Ro, P. G. Hunt, *Bioresource Technology* 99(17) (2008) 7941.
- [12] A.T. Ashcroft, A. K. Cheetham, M. L. H. Green, P. D. F. Vernon, *Nature* 352 (1991) 225.
- [13] Z. Boukha, M. Kacimi, M. Ziyad, A. Ensuque and F. Bozon-Verdiraz, *Journal of Molecular Catalysis A : Chemical* 270 (2007) 205.
- [14] F. Fischer and H. Tropsch, *Brennst. Chem.* 4 (1923) 276.
- [15] P. Sabatier and J. B. Senderenas, *C.R Hebd. Seances, Acad. Sci.* 134 (1902) 514.

- [16] E. J. Orlov, Zhur. Ross. Khim. Ob-a, 40 (1908) 514.
- [17] X.-M. Liu, G.Q. Lu, Z.-F. Yan, J. Beltramini, Ind. Eng. Chem. Res. 42 (2003) 6518.
- [18] G. Centi, G. Cum, J.L.G. Fierro, J.M. Lopez Nieto, in Direct Conversion of Methane, Ethane and Carbon Dioxide to Fuels and Chemicals, CAP Report, The Catalyst Group Resources, 2008.
- [19] P.G. Jessop, W. Leitner, Chemical Synthesis Using Supercritical Fluids, Wiley-VCH, 1999, pp. 358.
- [20] B. Wu, Y. Gao, F. Jin, Y. Du, Y. Zhang, Catal. Today, 148 (2009) 405.
- [21] F. Jin, T. Moriya, H. Enomoto, Environ. Sci. Technol. 37 (2003) 3220.
- [22] P.G. Jessop, T. Ikariya, R. Noyori, Science 269 (1995) 1065.
- [23] T. Iijima, T. Yamaguchi, J. Mol. Catal. A: Chemical, 295 (2008) 52.
- [24] Y. Ono, Dimethyl carbonate for environmentally benign reactions, Catal. Today 35 (1-2) (1997) 15-25.
- [25] M. R. Gonçalves, A. Gomes, J. Condeço, R. Fernandes, T. Pradal, C. A. C. Sequiera, J. B. Branco, Energy Conversion and Managements, 51 (2010) 30.
- [26] R.P.S. Chaplin, A.A. Wragg, J. Appl. Electrochem. 33 (2003) 1107.
- [27] M. Shibata, K. Yoshida, N. Furuya, J. Electroanal. Chem. 442 (1998) 67.
- [28] M.M. Halmann, M. Steinberg, Greenhouse Gas Carbon Dioxide Mitigation, CRC Press: Boca Raton (FL, US) 1999.
- [29] Y. Kohno, T. Tanaka, T. Funabiki, S. Yoshida, Satohiro. Phys. Chem. Chem. Phys. 2 (2000) 5302.
- [30] G. Centi, S. Perathoner, Z. Rak, Studies in Surface Science and Catal. 145 (2003) 283.
- [31] G. Centi, S. Perathoner, Top. Catal. 52 (8) (2009) 948.
- [32] B. A. Parkinson, P. F. Weaver, Nature, 309 (1984) 148.
- [33] T. Reda, C. M. Plugge, N. J. Abram, J. Hirst, Proceeding of National Academy of Sciences 105(31) (2008) 10654.
- [34] Y. Lu, Z-Y Jiang, S-W. Xu, H. Wu, Catalysis Today 115 (2006)263.

Les algues marines : une source potentielle de biomolécules

Samira ETAHIRI ¹ et Omar ASSOBEI ^{1,2}

¹ Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc

² Académie Hassan II des sciences et techniques

Résumé

Les biomolécules d'origine marine sont l'objet d'une grande importance pour différents secteurs de l'économie mondiale. En effet, outre leur rôle écologique et naturel, les algues marines regorgent de potentialités pour le développement de différents secteurs économiques (industrie, alimentation, agriculture, médecine, cosmétique...). De même, la demande mondiale croissante en cette ressource dépasse de loin ses capacités de régénération naturelle et exige de plus en plus une gestion rationnelle. De même, l'aquaculture pour les espèces d'algues marines fortement exploitées est une nécessité pour la durabilité de leurs filières d'exploitation (phycocolloïdes, principes actifs, nutriments...).

Bien que les côtes marocaines renferment une flore marine très riche et très diversifiée dont plusieurs espèces sont utilisées à l'échelle mondiale (alimentation, cosmétique, industrie...), l'exploitation des algues au Maroc concerne seulement quelques espèces (*Gelidium sesquipedale*). Ces dernières font l'objet de surexploitation qui présente une menace pour leur pérennité. La recherche de molécules bioactives est voie de valorisation prometteuse de la diversité de cette ressource très abondante sur les côtes marocaines.

Les premiers travaux de recherche menés dans ce domaine au Maroc ont permis la purification et la détermination structurale d'une dizaine de nouvelles molécules dont certaines sont dotées d'une activité biologique intéressante. Trois molécules d'entre elles présentent une importante activité antibiotique (la Bromosphaerone, 12*S* hydroxybromosphaerodiol et 3,5,6 tribromo-Methyl-4-(hydroxyméthyl) 1,2 benzendiol); une molécule à activité anti-inflammatoire (20-hydroxy-5a-cholest-22-ene-3,6-dione), une molécule à activité antiparasitaire (Sphaerococcenol A) et une molécule à forte activité cytotoxique (24-hydroperoxy-24-vinyl-cholesterol). Les activités de ces molécules sont intéressantes en comparaison avec des molécules déjà utilisées dans le domaine thérapeutique, et sont donc de bons candidats pour un usage médical si les études pharmacologiques s'avèrent concluantes. Ces molécules bioactives ont été isolées à partir d'une dizaine d'espèces d'algues des côtes des Doukkala témoignant de l'existence d'un grand potentiel de biomolécules originales chez cette ressource (489 espèces inventoriées).

1. Introduction

Malgré la découverte de nouvelles technologies en chimie de synthèse permettant la création de nouveaux composés, les sources naturelles restent le principal fournisseur de nouveaux médicaments et de nouvelles structures chimiques (Butler, 2004; Newman et al., 2003). De nouvelles sources potentielles touchant tous les règnes du monde vivant sont actuellement à l'étude, avec un intérêt tout particulier pour le milieu marin (Sasson, 2000; Proksch et al., 2002; Jensen et al., 2003; Mayer et Hamann, 2004).

Force est de constater que le monde marin est resté longtemps inexploré du point de vue ressource pharmacologique (Kornprobst, 2005). Effectivement, l'étude des molécules biologiques d'origine marine n'a véritablement commencée que dans les années 50 (Bergmann et Burke, 1955) et s'est intensifiée ces 30 dernières années (Blunt et al., 2009; Fenical, 1996; Faulkner, 2001). D'ailleurs, dans le domaine marin, les substances nouvelles ayant une activité biologique potentiellement intéressante seraient au moins 100 fois plus nombreuses que celle du domaine terrestre.

Ainsi, la description de quelques 4000 à 5000 substances nouvelles synthétisées par des organismes marins (algues, invertébrés ou microorganismes) (Mayer & Hamann, 2004; Mayer et Gustafson, 2004), a permis de caractériser près de 500 nouvelles substances actives: antitumorales, antivirales, immunomodulatrices, antibiotiques, antifongiques, etc.

La grande diversité des productions biochimiques marines s'est développée au cours de millions d'années d'évolution des océans sur la base de deux poussées vitalistes fondamentales : la défense et l'adaptation. Ceci est le résultat de la présence d'un grand nombre d'espèces vivantes dont la coexistence dans les différents écosystèmes est possible grâce à plusieurs systèmes d'interactions. Dans ces processus, la chimie joue un rôle crucial. En effet, tous les organismes vivants possèdent une importante diversité biochimique nécessaire à leur survie. Ainsi, ils peuvent élaborer des composés appelés «métabolites secondaires» qui sont impliqués dans les interactions inter et intra-spécifiques ayant un rôle de médiateur chimique. Ces métabolites ont des structures originales très diversifiées auxquelles est régulièrement liée une activité biologique.

Le champ d'investigation étant immense, il faudrait faire des choix quant aux organismes à étudier afin de cibler ceux qui sont susceptibles de produire des composés bioactifs. Les organismes sans moyens mécaniques de défense (coquilles, camouflages divers, capacité de déplacement rapide...), ne peuvent se protéger des prédateurs que par l'utilisation de véritables armes chimiques qui sont en général des sécrétions destinées à repousser ou à empoisonner un agresseur éventuel. En revanche, les organismes les plus simples qui ont su coloniser une immense diversité de milieux, allant des plus tempérés aux plus extrêmes, ont développé une grande diversité de voies métaboliques impliquant une importante production biochimique. Dans ce contexte, les algues marines présentent une source féconde de bio-molécules.

2. Importance écologique des algues marines

Les algues marines ne constituent pas un groupe évolutif unique, mais désignent toute une série d'organismes pouvant appartenir à des groupes phylogénétiques très différents.

En effet, les algues forment un ensemble très hétérogène de point de vue morphologique, cytologique, biologique et métabolique. Ces caractéristiques sont à la base de la classification des algues. De façon systématique, les macroalgues sont subdivisées en trois groupes issus de voies évolutives indépendantes : les Rhodophycées (algues rouges), les Chlorophycées (algues vertes) et les Phéophycées (algues brunes). Ces trois groupes sont différents par leur équipement pigmentaire, leur biochimie et leur biologie.

Les algues jouent un rôle primordial dans le maintien de l'équilibre écologique du milieu aquatique. D'abord, avec le phytoplancton, elles sont les principales responsables de la production primaire. Ensuite, elles synthétisent la matière organique qui constitue la source alimentaire d'une grande partie de la faune marine. De plus, les algues dégagent par photosynthèse de l'oxygène qui est directement utilisé par les espèces marines et elles constituent un support d'alevins de nombreux poissons, mollusques, crabes et autres espèces. Enfin, les algues permettent également l'amélioration, la clarification, la récupération des éléments nutritifs en suspension et l'autoépuration de l'eau.

D'autre part, l'étude de la composition chimique des algues a montré que les teneurs en protéines sont plus élevées pour les algues rouges et vertes que pour les algues brunes. Cette teneur est en moyenne comparable à celle des végétaux terrestres. Elles contiennent très peu de lipides (1 à 2%), apportent, donc, très peu de calories, mais sont plus riches que les végétaux supérieurs en acides gras polyinsaturés essentiels. Elles contiennent aussi plus de 50 % de glucides, qui sont pour la plupart des fibres alimentaires différentes de celles des végétaux terrestres. Leur teneur en minéraux et en vitamines est plus élevée par rapport à celle des autres végétaux. Cette composition leur confère, par conséquent, le caractère d'aliments diététique par excellence.

De point de vue économique, elles présentent actuellement une source nutritionnelle et un produit à valeur montante. Au cours des dernières années, de nombreux pays se sont intéressés aux algues - soit pour satisfaire leurs besoins nutritionnels et économiques ou bien pour la recherche de nouvelles applications dans le domaine pharmacologique.

On observe aussi que les algues sont produites par la mer en grande abondance et sont très riches en iode ainsi qu'en substances commercialement intéressantes. Une utilisation indirecte par extraction puis transformation de produits particuliers aux algues, alimente actuellement des industries d'une grande importance dans des pays largement ouverts sur la mer.

3. Exploitation mondiale des algues

Il est à signaler que la production mondiale de macroalgues pour l'année 2000 est de 6860 10^3 tonnes (4279.10⁶ dollars US) répartie entre les algues rouges (4900 10^3 tonnes/2971.10⁶ dollars US), algues rouges (192710³ tonnes/1303. 10⁶ dollars US) et algues vertes (3310³ tonnes/5,810⁶ dollars US). Au moins 221 espèces sont exploitées dans le monde dont 101 espèces pour la production de phycocolloïdes, ceux-ci sont utilisés comme additifs pour leurs propriétés technologiques (gélifiant, texturant) par l'industrie agroalimentaire. D'autres espèces sont utilisées en alimentation humaine directe en tant que légumes de mer.

Les principaux pays producteurs sont la Chine, la Corée, le Japon, la France, le Royaume-Uni et le Chili. Ces pays totalisent 90% de la production mondiale. Sur les 2 millions de tonnes de produits secs, plus de la moitié est issue d'aquaculture réalisée principalement

en Chine, Corée et Japon. Les principales espèces cultivées appartiennent aux genres *Laminaria*, *Porphyra*, *Undaria* et *Gracilaria*. La production aquacole de cette ressource végétale a progressé de 119% depuis 1984.

3.1. Exploitation en industrie

Sur le plan industriel, les algues constituent la matière première pour l'élaboration de plusieurs produits d'une grande valeur commerciale.

- **L'agar-agar** (E406) : c'est le plus important polysaccharide extrait à partir des algues rouges, en particulier les genres *Gelidium*, *Pterocladia* et *Gracilaria*. Cette dernière est exploitée à une hauteur de 370 000 tonnes fraîches par an, dont 130 000 tonnes par la culture, essentiellement réalisée en Asie (Vietnam, Thaïlande) et en Amérique (Chili, Caraïbes). L'agar-agar fait l'objet de plusieurs utilisations dont la principale réside dans son emploi dans les laboratoires scientifiques et d'analyses médicales pour la préparation des milieux de culture. L'agar-agar est également utilisé en technologie alimentaire et en industrie agroalimentaire comme épaississant et stabilisant dans la préparation de nombreux produits. Dans l'industrie des cosmétiques, l'agar-agar entre dans la fabrication du savon, des laits et crèmes de beauté. Il intervient également dans l'industrie du textile comme apprêt et dans les produits pharmaceutiques en tant qu'excipient.
- **Les carraghénanes** (E407) : ce sont des produits plus spécialisés dont les propriétés chimiques sont proches de l'agar et sont extraites de l'algue rouge, *Chondrus crispus*. En France, la récolte manuelle de cette algue est réglementée (de mai à octobre), et porte sur environ 5500 tonnes par an. Les carraghénanes sont surtout employés dans l'industrie alimentaire, comme l'agar, et entrent dans la composition de certains médicaments et dans la fabrication de produits cosmétiques.
- **Les alginates et l'acide alginique** (E400 à E405) : extraits des algues brunes laminaires et fucales, comme *Laminaria digitata*, qui représente l'algue la plus exploitée en France (57157 tonnes en 1991). La grande teneur en iode de cette algue présente également un intérêt pour la préparation de compléments alimentaires. Les alginates sont aussi utilisés dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique. En technologie alimentaire, ils sont utilisés comme agent émulsifiant, stabilisant et épaississant. Leur pouvoir élevé de gélification permet leur utilisation à très faibles doses (0,01 à 0,5%). En pharmacologie, l'alginate de sodium est utilisé comme adjuvant pour les immunisations contre certaines espèces virales (Bhakuni et Silva, 1974). Il est également utilisé comme agent de substitution colloïdale et comme agent hémostatique Coalgan®.

Les substances extraites d'algues semblent également trouver leur utilisation comme agents d'immobilisation d'enzyme ou de bactéries.

3.2. Exploitation en agro-alimentation

3.2.1. Alimentation humaine

Outre leur intérêt dans la chaîne trophique, les algues marines sont incorporées dans l'alimentation humaine dans de nombreux pays (Tableau 1). Elles sont utilisées sous forme brute ou après une certaine préparation. Elles sont consommées davantage par les pays asiatiques. Au Japon, elles composent plus de 70% de l'alimentation quotidienne et sont utilisées fraîches, crues, bouillies, ou pour faire une gelée. Elles peuvent se conserver

séchées ou sous forme d'un concentré liquide. Leurs glucides seraient tolérés par les diabétiques et les autres constituants sont faciles à digérer. En effet, il a été démontré que certains polysaccharides issus d'algues peuvent moduler l'absorption intestinale du glucose et la réponse insulínique à l'alimentation, ce qui présente un intérêt dans le traitement nutritionnel des diabétiques en réduisant le pic de glycémie à l'issue d'un repas. Les algues sont riches en vitamines B et C et contiennent une gamme étendue d'oligo-éléments surtout le zinc d'où leur emploi en diététique comme aliment allégé ou pour la correction des carences minérales.

La consommation d'algues est trop importante pour être assurée par la ressource naturelle. Depuis, de nombreuses années la culture a donc pris le relais, jusqu'à assurer environ 90% de la consommation.

La Porphyra est l'algue alimentaire la plus consommée dans le monde spécialement en Asie (Nori), en raison de sa composition intéressante (riche en acides gras polyinsaturés, en vitamines F et B12 et en provitamine A).

A l'inverse des marchés asiatiques où les algues vertes sont les moins représentées, la première algue de consommation type légume en Europe est l'Ulve.

Tableau 1 : principales espèces d'algues utilisées dans l'alimentation (d'après Kornprobst, 2005)

Espèces	Nom commercial	Remarques	Conditionnement et utilisations traditionnelles
Algues vertes			
<i>Caulerpa racemosa</i>	<i>Kubirezula</i>		Consommée fraîche en salade
« <i>Enteromorpha</i> *»	<i>Ao-nori</i>	Mélange des espèces <i>E.prolifera</i> et <i>E. intestinalis</i>	Utilisée en poudre comme assaisonnement
« <i>Monostroma</i> »	<i>Hetoegusa</i>	Contient surtout <i>Monostroma nitidum</i>	Consommée fraîche et séchée dans des soupes
Algues rouges			
<i>Euchema gelatine</i>	Kirinsai		Consommée séchée en salade
« <i>Gracilaria</i> *»	Ogo-nori	Mélange de <i>G. bursa-pastoris</i> , <i>G. lemaneiformis</i> et <i>G. verrucosa</i>	Consommée en salade
<i>Grateloupia filicina</i> *	Mukade-nori		Consommée séchée en salade
<i>Meristotheca papulosa</i>	Aka-tosaka		Consommée séchée en salade
« <i>Porphyra</i> »	Nori	Mélange des espèces <i>P. tenera</i> et <i>P. Yessoensis</i>	Utilisée en feuilles pour préparer des sushis
Algues brunes			
<i>Cladosiphon kamuranus</i>	Okinawa mozuku	Couramment appelé Mostuku	Utilisée en poudre comme assaisonnement
<i>Ecklonia cava Eisenia arborea</i>	Arame		Consommée bouillie avec de la sauce soja
<i>Hizikia fusiformis</i>	Hijiki		Consommée bouillie avec de la sauce soja
« <i>Laminaria</i> *»	Kombu		Consommée bouillie dans des soupes
<i>Nemacystis decipiens</i>	Mosuku		Utilisée en poudre comme assaisonnement
<i>Undaria pinnatifida</i>	Wakame Cut-wakame	Le cut-wakame est une spécialité à longue conservation.	Consommée fraîche en salade et bouillie en soupes.

[* : Algue présente sur les côtes marocaines].

3.2.2. Alimentation animale

L'utilisation des algues dans l'alimentation du bétail est répandue en extrême orient, en Europe et en Amérique du nord, sous forme de farines obtenues après séchage. Les algues brunes principalement Fucus, Sargasse et Laminaires apportent plus de sels minéraux et de vitamines que le fourrage traditionnel.

Dans le domaine de l'élevage, d'autres usages ont été envisagés pour les farines d'algues et spécialement celle des Chlorophytes. Elles sont utilisées pour la production de β -carotène destiné à l'élevage de volaille afin d'améliorer la qualité des œufs dont le jaune devient plus coloré et la coquille plus résistante.

3.2.3. Agriculture

L'utilisation des algues comme amendement naturel riche en sels minéraux et oligo-éléments se fait depuis très longtemps. Depuis la fin du XVIII^e siècle, on utilisait *le Lithothamnium calcareum* ou «maërl» pour réduire l'acidité des sols. Le maërl, essentiellement constitué d'algues rouges calcaires, convient davantage pour les sols pauvres en chaux. Le Goémon constitué d'algues rouges ou brunes est couramment utilisé comme engrais. Par rapport au fumier, ce composé est aussi riche en azote, plus riche en iode et moins riche en acide phosphorique, convenant mieux, de ce fait, aux sols pauvres en iode.

Par ailleurs, des molécules extraites d'*Ascophyllum* et de *Laminaria* induisent chez les végétaux supérieurs des mécanismes de défense (production de substances protectrices), ce qui ouvre la voie à une utilisation valorisante et écologique des extraits d'algues marines comme substituts des produits agro-chimiques.

3.3. Les algues marines : source de molécules à intérêt médical

Durant les 30 dernières années, la recherche sur les substances naturelles à intérêt thérapeutique à partir des algues marines a connu un regain d'intérêt particulier. Ces travaux ont porté sur l'isolement de biomolécules pour leur utilisation comme modèle structural ou comme principe de base pour le développement d'analogues actifs (par hémi-synthèse).

Sur le plan pharmacologique, la présence de différentes activités pharmacologiques a été mise en évidence chez plusieurs espèces d'algues : 290 molécules (des algues vertes), 1260 molécules (algues brunes) et 1336 molécules (algues rouges) (Kornprobst, 2005). Ces travaux ont porté sur l'étude de l'activité antibactérienne, antivirale, anti-tumorale et d'autres propriétés comme celle qui entre dans la régulation du taux du cholestérol sanguin ou dans la régulation du système immunitaire (Mayer, 2007).

3.3.1. Les substances antimicrobiennes

L'activité antibiotique des algues marines a été étudiée pour des algues récoltées dans différentes régions du monde : Océan Atlantique (Febles et al., 1995), Océan Indien

(Crasta et al., 1997), Océan Pacifique (Brennan et Erikson, 1978) et Mer Méditerranée (Ktari, 2000). Ces travaux ont permis l'isolement de nombreuses molécules à activité antibactérienne dont la première est l'acide acrylique isolé par Sieburth (1960).

3.3.2. Les substances antivirales

L'activité antivirale des algues marines a été mise en évidence par plusieurs chercheurs chez différentes espèces d'algues. Cette activité est due, selon Hatch et al. (1979), à la présence du galactose sulfate chez les algues étudiées. Parmi les espèces présentant ce type d'activité nous citons : *Codium elongatum*, *Hypnea musciformis*, *Hypnea cervicornis* et *Ulva fasciata* (Kamat et al. 1992), *Fucus vesiculosus* (Beress et al., 1993), *Corallina pilullifera*, *Padina crassa* et *Enteromorpha intestinalis* (Hayashi et al., 1996), *Schizymenia dubyi* (Bourgougnon et al., 1996) et chez *Gigartina skottsbergii* (Carlucci et al., 1999).

Par ailleurs, l'Obtusadiol, un des agents responsables de l'activité antivirale des algues marines contre le virus de la mosaïque du Tabac a été isolé par Caccamese et al. (1981). L'Halitunal, un diterpène aldéhyde à forte activité antivirale a été isolé en 1991 par Kohen et al. à partir de l'algue verte *Halimeda tuna*.

3.3.3. Les substances cytotoxiques

Les recherches de molécules dotées d'activité cytotoxique à partir des algues marines se sont intensifiées depuis l'isolement de l'Halomon. L'activité anti-tumorale des algues marines a été identifiée chez de nombreuses espèces de macrophytes et elle a principalement été caractérisée chez les Phéophycées. L'origine de l'activité observée a été associée à la présence chez certaines espèces d'algues de polysaccharides (carraghéénanes, fucoïdines, porphyrine...) et de lipides phosphorylés ou glycosylés (Nakazawa et al., 1974; Noda et al., 1989).

Ainsi, une activité contre le carcinome d'Ehrlich a été mise en évidence par Noda *et al.* (1989) chez *Scytisiphon lomentaria*, *Lessonia nigrescens*, *Laminaria japonica*, *Porphyra yezoensis*, *Euchema gelatinae* et *Enteromorpha prolifera* et une autre activité contre le fibrosarcome Meth-A a été détectée chez plusieurs espèces d'algues brunes et rouges. Les espèces *Undaria pinnatifida*, *Laminaria* et *Sargassum spp* présentent elles aussi une activité anti-tumorale (Ohigashi et al., 1992).

Par ailleurs, *Bifurcaria bifurcata* récoltée dans la côte atlantique marocaine, a montré une activité antimittotique due à un diterpène linéaire (Valls et al., 1993). Cependant, l'activité cytotoxique mise en évidence chez *Padina pavonica* et *Jania rubens* est due à des oxystérols (Ktari, 2000).

3.3.4. Activité anti-inflammatoire des algues

L'activité anti-inflammatoire des algues est évaluée en mesurant le pourcentage d'inhibition de l'élastase : enzyme impliquée dans plusieurs états pathologiques tels que l'emphysème pulmonaire et l'arthrite. Les études réalisées sur l'activité anti-inflammatoire des algues

sont peu nombreuses (Ktari, 2000). Les principales activités ont été identifiées chez *Caulerpa prolifera* (Mayer et al., 1993), *Caulerpa brownii* (Aitadafoun, 1993) et *Ulva lactuca* (Ganovski et al., 1979).

La molécule Caulerpenyne, extraite de *Caulerpa prolifera* au dichlorométhane inhibe la PLA₂ du venin d'abeille. D'autres substances tel que le rétinol, isolé de *Caulerpa brownii* inhibe la PLA₂ du fluide synovial humain (Aitadafoun, 1993).

3.3.5. Activités agglutinantes

De nombreuses espèces d'algues marines contiennent des substances capables d'induire l'agglutination de diverses cellules (érythrocytes humaines, cellules lymphocytaires, cellules tumorales, levures ou bactéries). Cette propriété est liée à la présence d'agglutinines qui sont des substances apparentées aux lectines. Ainsi, les agglutinines de *Codium fragile*, *Ptilota plumosa* et d'*Ulva lactuca* agrègent respectivement les érythrocytes de sérotype A, B et C (Rogers et Blunden, 1980). Les extraits d'*Agardhiella tenera* agglutinent sélectivement les cellules leucémiques de souris (Kamiya, 1982). Les agglutinines de *Fucus vesiculosus* agglutinent sélectivement certaines souches de levures et ceux d'*Ulva lactuca* agglutinent des souches de *Streptococcus* et d'*Escherichia coli*.

Outre les propriétés préalablement décrites, des agglutinines algales influenceraient la régulation du système immunitaire de la souris (agglutinine de *Fucus vesiculosus*), l'induction des lymphocytes T et l'inhibition de la croissance de certaines cellules tumorales (agglutinine de *Fucus serratus*).

3.3.6. Substances à effet hypotensif et hypolipémiant

Dans le but de trouver des applications dans la prévention des maladies cardiovasculaires, les propriétés hypotensives et hypolipémiantes de quelques espèces d'algues ont été étudiées. Les premières expériences dans ce domaine ont été menées dès les années 1960. Parmi les molécules impliquées dans ces effets et qui ont été fréquemment citées figurent : la laminine, différentes formes chimiques de la bétaine et les polysaccharides algaux (Abe et Kaneda, 1975). Les résultats obtenus par Renn et al. (1994) ont montré que les algues alimentaires telles que *Porphyra yezoensis*, *Undaria pinnatifida* et *Monostroma mitidium* entraînent effectivement une baisse spécifique du cholestérol libre.

3.3.7. Molécules à activité antiparasitaire

L'activité antiparasitaire des algues marines a été peu étudiée. Le seul produit étant isolé à partir des algues et connu comme antiparasitaire est l'acide kaïnique isolé de l'algue rouge *Digenea simplex* par Ueno et al. (1955).

3.3.8. Substances pour cosmétique

Ascophyllum, *Fucus* et *Laminaria* sont parmi les principaux genres d'algues utilisés à l'état brut en thalassothérapie ou sous forme d'extraits dans les préparations cosmétiques. Les principes actifs sont extraits des algues par des procédés doux, sans additifs comme le

cryobroyage ou la microfiltration. Ils sont utilisés directement sous forme de poudres, de solutions diluées, de concentrés dans l'eau ou le glycol, ou incorporés dans des spécialités cosmétiques (savonnettes, shampooings et crèmes) pour apporter des sels minéraux, oligo-éléments et antioxydants.

4. Exploitation des algues au Maroc

4.1. Inventaire des algues du Maroc

Avec 3500 Km de façade maritime, le Maroc dispose d'une importante flore marine très riche et très diversifiée. Les premiers travaux sur les algues marines au Maroc remontent au siècle dernier et sont restés limités au bord de la ville de Tanger. Les recherches menées entre Salé et Agadir par Gayral (1958) ont permis de répertorier plus d'une centaine de nouvelles espèces portant ainsi le nombre de macroalgues inventoriées à cette époque pour cette région à plus de 320 espèces. Actuellement, 489 espèces d'algues sont répertoriées au Maroc (Benhissoune et al., 2001; Riadi et Kazzaz, 1998). Elles sont réparties entre 87 chlorophycées et 303 rhodophycées et 99 phéophycées. L'inventaire des algues de la côte d'El Jadida a révélé la présence de 143 espèces (Berday, 1989).

4.2. Exploitation industrielle des algues au Maroc

Certaines espèces d'algues marines forment des gisements importants, au moins à certaines périodes de l'année, et font l'objet d'une grande exploitation, celle-ci concerne un nombre limité d'espèces surtout pour l'extraction de l'agar-agar et des carraghénanes.

Dans plusieurs régions de la côte marocaine (Larache, Kénitra, Mehdiya, Sidi Bouknadel, Temara, Sidi Bouzid, Jorf Lasfar, Sidi Abed, Sidi Moussa, Oualidia, Essaouira, Boujdor, Tan Tan, Dakhla...), les algues rouges sont récoltées à grande échelle et sont soit traitées sur place par l'industrie locale (*Gelidium*, *Pterocladia capillacea* et *Gracilaria*), soit exportées après un simple séchage (*Gigartina pistillata*).

L'exploitation et la transformation des algues marines au Maroc, remontent à une cinquantaine d'années. La récolte des algues rouges entre El Jadida et Boujdor est estimée à 14 000 tonnes pour l'année 2008 ce qui a permis une production nette de 1 564 tonnes d'agar-agar qui ont été en grande partie exportés. L'espèce *Gelidium sesquipedale* représente à elle seule plus de 90% de cette récolte et rapporte l'équivalent de 220 MDhs, conférant ainsi au Maroc le rang de troisième producteur d'agar-agar dans le monde derrière le Japon et le Chili, et le rang de deuxième exportateur mondial. Près de 10 000 emplois dépendent directement ou indirectement de l'industrie des algues. Cette industrie assure le plus fort taux de valorisation parmi les industries de transformation des produits de la mer. Malgré ces atouts et ce dynamisme, cette industrie doit faire face à des problèmes liés au manque d'organisation du secteur de collecte et de commercialisation de la matière première.

Toutefois, la surexploitation et la collecte irrationnelle des espèces agarophytes constituent une menace sur leur pérennité. La création de nouvelles filières d'exploitation d'autres espèces de macroalgues permettra d'alléger la forte pression de collecte sur les agarophytes

et de maintenir l'activité socio-économique associée à la production de l'agar-agar. Cette perspective est d'un grand intérêt socio-économique aussi bien pour l'économie nationale que pour l'économie des populations locales.

4.3. Exploitation thérapeutique des algues au Maroc

Dans l'objectif de créer des activités alternatives liées à l'exploitation des agarophytes de la côte atlantique marocaine, des investigations ont été entreprises par plusieurs équipes de recherche appartenant à plusieurs universités marocaines (El Jadida, Tétouan, Rabat, Settat et Marrakech). Les recherches ont concerné essentiellement la bio-prospection de molécules bioactives. Néanmoins, d'autres investigations ont porté sur l'utilisation des algues en alimentation animale ou en tant que bio-engrais. Cependant, les recherches les plus avancées à l'échelle nationale en matière de mise en place de filières alternatives de l'agaro-industrie sont surtout celles concernant l'utilisation thérapeutique des algues.

Les travaux réalisés au Maroc en matière de bioprospection de molécules bioactives à partir des algues marines ont montré l'existence fréquente d'activités thérapeutiques intéressantes (Moujahid et al., 2004, Etahiri et al., 2003; Elkouri et al., 2004; Chiheb et al., 2009 et Younes et al., 2009). Cependant, seules certaines études ont abouti à l'élucidation structurale des principes actifs. En effet, des terpènes, des stérols et des acides gras ont été isolés à partir de *Bifurcaria bifurcata*, *Gelidium sesquipedale* et *Gelidium pulchellum* (Aitaazizi, 1990). Bennamara et al. (1999) ont isolé un composé terpénique à partir de *Cystoseira tamariscifolia* et Daoudi (2002) a isolé neuf nouveaux diterpènes linéaires à partir de *Bifurcaria bifurcata*. Par ailleurs, Etahiri et al. (2001, 2003, 2004 et 2007) ont purifié et caractérisé 10 molécules originales à partir de *Sphaerococcus coronopifolius*, *Pterosiphonia complanata*, *Cystoseira humilis*, *Hypnea musciformis* et *Asparagopsis armata* dont six ont montré des activités biologiques intéressantes (Tableau 2).

Tableau 2 : Molécules bioactives isolées à partir des algues marines (Etahiri et al., 2001, 2003, 2004 et 2007)

Non de la molécule	Activité	Origine	Classe chimique
Bromosphaerone	Antibactérienne	<i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	Terpène
12S hydroxybromosphaerodiol	Antibactérienne	<i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	Terpène
3,5,6 tribromo-Methyl-4-(hydroxyméthyl)1,2benz endiol	Antibactérienne	<i>Pterosiphonia complanata</i>	Tribromophénol
Sphaerococcenol A	Antiparasitaire	<i>Sphaerococcus coronopifolius</i>	Terpène
24-hydroperoxy-24-vinyl-cholesterol	Cytotoxique	<i>Cystoseira humilis</i>	Stérol
20-hydroxy-5-cholest-22-ene 3,6-dione	Anti-inflammatoire	<i>Hypnea musciformis</i>	Dicetostéroïde

4.3.1. Molécules à activité antibactérienne :

Les travaux réalisés sur l'algue rouge *Sphaerococcus coronopifolius* (Etahiri et al., 2001) ont permis la purification de deux molécules : la Bromosphaerone et le 12-S-hydroxy-bromo-sphaerodiol (Figure 1). L'activité antibactérienne de ces deux molécules a été déterminée en termes de Concentration Minimale Inhibitrice (CMI) vis-à-vis de *Staphylococcus aureus ssp aureus* ATCC 6538 qui sont respectivement de 0,104 μM et 0,146 μM soit l'équivalent de 0,1 mg/l et 0,07 mg/l.

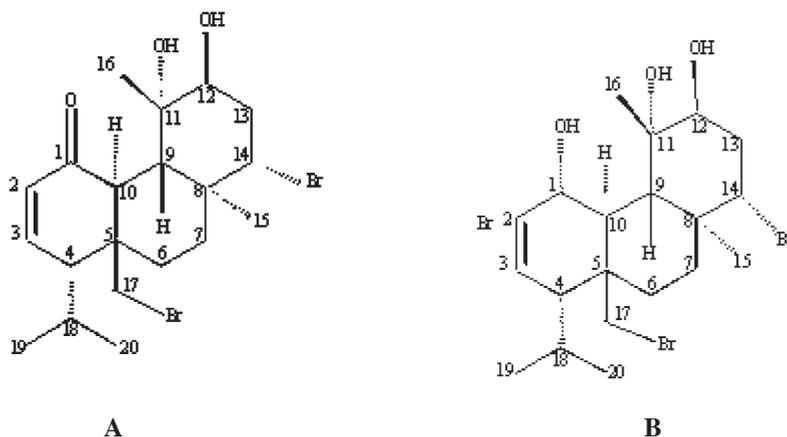


Figure 1 : structure du Bromosphaerone (A) et du 12 S hydroxybromosphaerodiol (B)

Les investigations menées sur l'algue rouge *Pterosiphonia complanata* ont conduit à l'isolement du tribromophénol, molécule pourvue d'activité antibactérienne (Etahiri et al., 2004 et 2007) (Figure 2). La CMI vis-à-vis de *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 du tribromophénol a été évaluée à 7nM soit 2,8 $\mu\text{g/ml}$. Cette activité est largement supérieure à celle du bromophénol le plus connu, isolé à partir de l'algue rouge *Rhodomela confervoides* par Xu et al. (2003) et dont la CMI est de 0,12M soit 70g/ml.

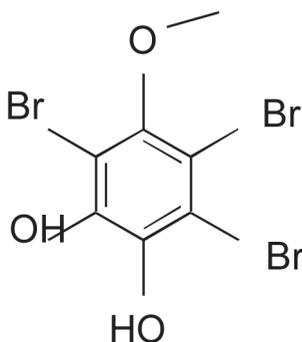


Figure 2 : structure du 3,5,6 tribromo-Methyl-4-(hydroxyméthyl)1,2 benzendiol

Les valeurs des CMI des trois molécules précitées sont intéressantes en comparaison avec des molécules utilisées en thérapeutique. En effet, la CMI₉₀ de certaines céphalosporines (Cefprozil) vis-à-vis de *Staphylococcus aureus* est comprise entre 0,5 à 8 mg/l (Bryskier,

1999). Ces molécules à leur état naturel, sont très actives vis-à-vis de *S. aureus ssp aureus* et sont donc de bons candidats pour un usage médical si les études pharmacologiques s'avèrent concluantes.

4.3.2. Molécule à activité antiparasitaire

A partir de l'algue rouge *Sphaerococcus coronopifolius*, le Sphaerococcenol A (Figure 3) est la molécule responsable de l'activité anti-paludique contre la souche *Plasmodium falciparum* (Etahiri, 2002). Cette molécule a été isolée et son CI_{50} a été évalué à $1\mu M$. La structure du Sphaerococcenol A est identique à celle décrite dans la littérature par Fenical et al. (1976). Cependant, l'activité antiparasitaire de ce composé n'a jamais été décrite à ce jour.

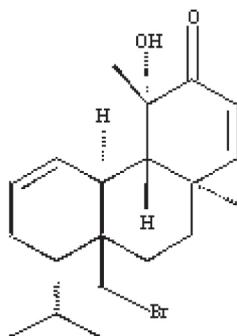


Figure 3 : structure du Sphaerococcenol A.

4.3.3. Molécule cytotoxique

Le produit cytotoxique isolé à partir de l'algue brune *Cystoseira humilis* est l'hydroperoxy-24-vinyl-24 cholestérol (Figure 4) (Etahiri, 2002), sa CI_{50} est de $6,5\ \mu g/ml$. Les caractéristiques chimiques de ce composé sont semblables à celles du produit isolé par Ktari et Guyot (1999) à partir de l'algue verte *Padina pavonica*. Ce même composé a été isolé par Guyot et al. (1982, 1983) à partir de deux tuniciers *Phallusia mamillata* et *Ciona intestinalis* et par Sheu et Sung (1991) à partir de l'algue brune *Turbinaria conides*. Le 24-hydroperoxy-24-vinyl-cholesterol peut être un produit de l'oxydation du fucostérol qui est le stérol le plus abondant chez les algues brunes (Vilter et al., 1983).

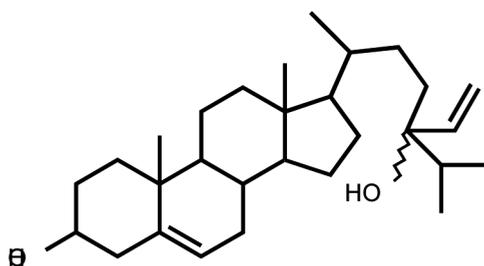


Figure 4 : structure du 24-hydroperoxy-24-vinyl-cholesterol

4.3.4. Molécule à activité anti inflammatoire

Les travaux réalisés par Bultel-Pncé et al. (2002) ont permis l'isolement à partir de l'algue rouge *Hypnea musciformis* d'un nouveau dicetostéroïde : le 20-hydroxy-5 α -cholest-22-ene-3,6-dione (Figure 5). La concentration inhibitrice de l'élastase à 50 % est de 0,1mM.

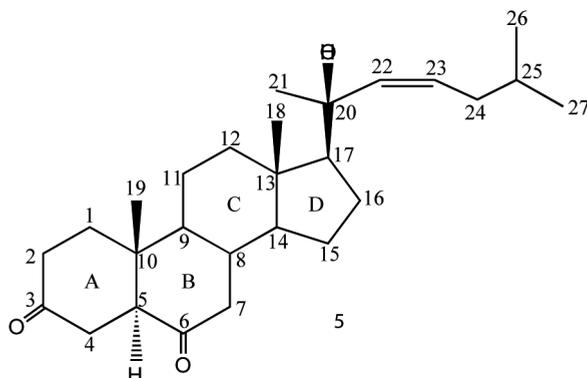


Figure 5 : structure du 20-hydroxy-5 α -cholest-22-ene-3,6-dione

5. Conclusion

Les algues marines jouent un rôle primordial dans le maintien de l'équilibre écologique du milieu aquatique et sont largement utilisées pour satisfaire les besoins nutritionnels des populations surtout en Asie. Elles constituent une matière première pour plusieurs industries (agar-agar, carraghéénanes, alginate...) et une source de nouvelles molécules thérapeutiques (antimicrobiens, antiviraux, cytotoxiques, anti-inflammatoires, agglutinants, hypotensif et hypolipémiant). Elles sont aussi utilisées comme antiparasitaires, bio-engrais, aliment aussi bien pour l'homme que pour les animaux.

Au Maroc, l'exploitation des algues est limitée à certaines espèces d'algues rouges (*Gelidium*) dont les champs régressent chaque année sous l'effet de la surexploitation. La recherche de nouvelles molécules bioactives à partir des algues marines est une voie prometteuse pour la valorisation des espèces non exploitées au Maroc qui présente également une alternative pour diminuer la pression de collecte sur le *Gelidium*.

Les travaux réalisés au Maroc en matière de bio-prospection de molécules bioactives à partir des algues marines ont permis la mise en évidence d'activités thérapeutiques intéressantes. Les résultats obtenus, témoignent de la richesse de ces algues en molécules bioactives (antibiotique, cytotoxique, anti-inflammatoire et antiparasitaire) qui offrent des possibilités de valorisation indéniables, notamment dans le domaine médical entre autres.

Références bibliographiques

- Aitaazizi M., 1990. Contribution à l'étude chimique de quelques espèces d'algues marines de la Côte Atlantique Marocaine (isolement et étude structurale). Thèse de 3^{ème} cycle. Université Cadi Ayyad (Maroc). 174pp.
- Abe S. and Kaneda T., 1975. Studies on the effects of marine products on cholesterol metabolism in rats XI. Isolation of a new betaine, ulvine from a green laver. Japanese Society of Sciences and Fisheries. 41 : 567-571.
- Aitadafoun M., 1993. Inhibiteurs de la phospholipase A₂ : synthèse, étude pharmacologique in vitro et structure-activité. Doctorat de l'Université Paris VI. 124pp.
- Benhissoune S., Boudouresque C., Verlaque M., 2001. A check list of marine seaweeds of the Mediterranean and Atlantic Coast of Morocco. I. Chlorophyceae wille L. Botanica Marina. 44 : 171-182.
- Bennamara A., Abourriche A., Berrada M., Charrouf M., Chaib N., Boudouma M. and Ganeau F. X., 1999. Methoxybifurcanone: an antifungal and antibacterial meroditerpenoid from the brown alga *Cystoseira tamariscifolia*. Phytochemistry. 52 : 37-40.
- Berday N., 1989. Contribution à l'étude écologique du phytobenthos de la zone littorale de la région d'El Jadida. Thèse de 3^{ème} cycle. Faculté des Sciences. Rabat. 170 pp.
- Beress A., Wasserman D., Bruhn T., Beress L., Kraiselburd E. N., Gonzalez L. V., De Motta G. E. and Chavez P. I., 1993. A new procedure for the isolation of anti-HIV compounds (polysaccharides and polyphenols) from the marine alga *Fucus vesiculosus*. Journal of Natural Products. 5 : 478-488.
- Bergmann W. and Burke D.C., 1955. Contributions to the study of marine products. The nucleosides of sponges. III. Spongothymidine and spongouridine. Journal of Organic Chemistry. 20 : 1501-1507.
- Bhakuni D. S. and Silva M., 1974. Biodynamic Substances from Marine Flora. Botanica Marina. 17 : 40-51.
- Blunt J.W., Copp R.B., Hu W.P., Munro M.H., Northcote P.T. and Prinsep M.R., 2009. Marine natural products. Natural Products Reports. 26 : 170-244.
- Bourgougnon N., Lahaye M., Quemener B., Chermann J. C., Rimbert M., Cormaci M., Furmari G. and Kornprobst J. M., 1996. Annual variation in composition and in vitro anti-HIV1 activity of the sulfated glucuronogalactose from *Schizymenia dubyi* (Rhodophyta, Gigartinales). Journal of Applied Phycology. 8 : 155- 161.
- Brennan M.R. and Erickson K.L., 1978. Polyhalogenated indoles from the marine algae *Rhodophyllid membranacea* Harv. Tetrahedron Letter. 1637-1640.
- Bryskier A., 1999. Antibiotiques, agents antibactériens et antifongiques. Edition Ellipses. Paris. 1216 pp.
- Bultel-Poncé V., Etahiri S. and Guyot M., 2002. New ketosteroids from the red alga *Hypnea musciformis*. Bio-organic & Medicinal Chemistry Letters. 12 : 1715-1718.

- Butler M.S., 2004. The role of natural product chemistry in drug discovery. *Journal of Natural Products*. 67: 2141-2153.
- Caccamese S., Azzolina R., Furnari G., Cormac M. and Grasso S., 1981. Antimicrobial and antiviral activities of some marine algae from Eastern Sicily. *Botanica Marina*. 24 : 365-367.
- Carlucci M. J., Ciancia M., Matulewicz M. C., Cerezo A. S. and Damota E. B., 1999. Antiherpetic activity and mode of action of natural carrageenans of diverse structural types. *Antiviral Research*. 43 : 93-102.
- Chiheb I., Riadi H., Martinez-Lopez J., Dominiquez Seglar J.F., Gomez Vidal J.A., Bouziane H. and Kadiri M., 2009. Screening of antibacterial activity in marine green and brown macroalgae from the coast of Morocco. *African Journal of Biotechnology*. 8(7) : 1258-1262.
- Crasta P. J., Raviraja N. S. and Sridhar K. R., 1997. Antimicrobial activity of some marine algae of Southwest Coast of India. *Indian Journal of Marine Science*. 26 : 201-205.
- Daoudi M., 2002. Contribution à l'étude chimique des algues brunes des genres *Bifurcaria* et *Bifurcariopsis*. Isolement et détermination structurale de nouveaux métabolites secondaires. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Chouaib Doukkali d'El Jadida. 269 pp.
- Elkouri A., Bultel-Ponce V., Assobhei O. and Etahiri S., 2004. Etude de la variation saisonnière de l'activité antimicrobienne et anti-inflammatoire chez quelques espèces d'algues marines de la côte Atlantique Marocaine. *Review of Biology and Biotechnology*. 3(1) : 29-36.
- Etahiri S., 2002. Isolement et caractérisation de composés pharmacologiquement actifs à partir des algues marines de la côte d'El Jadida (Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat. Université Chouaib Doukkali d'El Jadida. 200 pp.
- Etahiri S., Bultel-Ponce V. and Assobhei O., 2004. Une nouvelle molécule à activité antibiotique à partir de l'algue rouge *Pterosiphonia complanata*. Brevet Marocain N° 27732 OMPIC.
- Etahiri S., Bultel-Poncé V., Caux C., Guyot M., 2001. New bromoditerpenes from the red alga *Sphaerococcus coronopifolius*. *Journal of Natural Products*. 64 : 1024-1027.
- Etahiri S., Bultel-Ponce V., Elkouri A., Assobhei O., Zaoui D. and Guyot M., 2003. Antibacterial activities of marine algae from the Atlantic coast of Morocco. *Marine life*. 13(1-2) :3-9.
- Etahiri S., El Kouri A., Bultél-Poncé V., Guyot M. and Assobhei O., 2007. Antibacterial bromophenol from the marine red alga *Pterosiphonia complanata*. *Natural Product Communication*. 2(7) : 749-752.
- Faulkner D.J., 2001. Marine natural products. *Natural Products Report*.18 : 1-49.
- Febles C. I., Arias A., Hardisson A., Lopez A. S. and Gil-Rodriguez M. C., 1995. Antimicrobial activity of extracts from some Canary species of Phaeophyta and Chlorophyta. *Phytotherapy Research*. 9 : 385-387.

- Fenical W., 1996. Marine biodiversity and the medicine cabinet the status of New Drugs from marine organisms. *Oceanography*. 9 : 23-27.
- Fenical W., Finer J. and Clardy J., 1976. Sphaerococcenol A, a new rearranged bromoditerpene from the red alga *Sphaerococcus coronopifolius*. *Tetrahedron Letters*. 10 : 731-734.
- Ganovski H., Shipokliev T. and Bratova K., 1979. Antiinflammatory activity of sea algae collected at Bourgas coastal region. *Veterinary Science*. 16(7) : 54-60.
- Gayral P., 1958. *Algues de la côte atlantique marocaine*. Edition Edida. Casablanca. 523 pp.
- Guyot M., Davoust D. et Belaud C., 1982. Hydroxy-24-vinyl-24-cholesterol, nouvel hydroperoxyde naturel isolé de deux tuniciens : *Phallusia mamillata* et *Ciona intestinalis*. *Tetrahedron letters*. 23 : 1905-1906.
- Guyot M., Morel E. and Belaud C., 1983. A cytotoxic hydroperoxide of marine origin and related compounds: synthesis and biological study. *Journal of Chemistry. Research*. 5 : 188-189.
- Hatch M., Ehresman D.W. and Deig E.F., 1979. Chemical characterization and therapeutic evaluation of anti-Herpes virus polysaccharides from species of Dumontiaceae. In: (H. A. Hoppe & Levring T. eds) *Marine Algae in Pharmaceutical Science*, 2. Walter de Grueter, Berlin-New York. Pp : 293-302.
- Hayashi K., Hmada J. and Hayashi T., 1996. A screening strategy for selection of anti HSV-1 and anti- HIV-1 extracts from algae. *Phytotherapy Research*. 10 : 233-237.
- Jensen P.R., Mincer T.J. and Fenical W., 2003. The true potential of the marine. *Journal of Organic Chemistry*. 20 : 1501-1507.
- Kamat S.Y., Wahidulla S., D'sonza L., Naik C.G., Ambiyé V., Bhakuni D.S., Goel A.K., Gorg H.S., Srimal R.C., 1992. Bioactivity of Marine organisms. VI. Antiviral evaluation of marine algal extracts from Indian Coast. *Botanica Marina*. 35 : 161-164.
- Kamiya H., 1982. Properties of the hemagglutinines in the red alga *Monospora* sp. *Bulletin of Japanese Society of Scientific fisheries*. 48(9) : 1365.
- Kohen F.E., Gunasekera S.P., Niel N. and Cross J.N., 1991. Halitunal, an unusual diterpene aldehyde from the marine alga *Halimeda tuna*. *Tetrahedron. Letters*. 32 : 169-172.
- Kornprobst J M., 2005. Substances naturelles d'origine marine. Tome 1. Edition Tec et Doc Lavoisier. 598pp.
- Ktari L., 2000. Recherche de composés actifs dans des algues marines : propriétés pharmacologiques, stimulation du cycle biologique de l'algue et de la biosynthèse d'un métabolite. Thèse de Doctorat de l'Université ParisVI. 140 pp.
- Ktari L. and Guyot M., 1999. A cytotoxic oxysterol from the marine alga *Padina pavonica* (L) Thivy. *Journal of Applied Phycology*. 11 : 511-513.
- Mayer A.M.S., Paul V.J., Fenical W. Norris J.N., De Carvalho M.S. and Jacobs R.S., 1993. Phospholipase A2 inhibitors from marine algae. *Hydrobiologia*. 260 : 158-168.

- Mayer A.M.S. and Hamann M.T., 2004. Marine pharmacology in 2000: marine compounds with antibacterial, anticoagulant, antifungal, anti-inflammatory, antimalarial, antiplatelet, antituberculosis, and antiviral activities; affecting the cardiovascular, immune, and nervous systems and other miscellaneous mechanisms of action. *Marine Biotechnology*. 6 : 37-52.
- Mayer A.M.S. and Gustafson K.R., 2004. Marine pharmacology in 2001-2: antitumour and cytotoxic compounds. *European Journal of Cancer*. 40 : 2676-2704.
- Mayer A.M.S., 2007. Marine pharmacology in 2003-4: marine compound with anthelmintic, antibacterial, anticoagulant, antifungal, antiinflammatory, antimalarial, antiplatelet, antiprotozoal, antituberculosis and antiviral activities; affecting the cardiovascular, immune and nervous systems, and other miscellaneous mechanisms of action. *Comparative Biochemistry and Physiology*. 145 : 553-581.
- Moujahid A., Bencharki B., Hilali L., Bagri A. et Najim L., 2004. Activités antibactériennes et antifongiques des extraits d'algues marines d'origine marocaine. *Biologie et santé*. 4(2) : 298-305.
- Nakazawa S., Kuroda H., Abe F., Nishino T., Ottsuki M. and Umezaki I., 1974. Antitumor effect of water-extract from marine algae. *Chemotherapy*. 22 : 1435-1442.
- Newman D.J., Crag G.M. and Snader K.M., 2003. Natural Products as sources of new drugs over the period 1982-2002. *Journal of Natural Products*. 66 : 1022-1037.
- Noda H., Amano H., Arashima K., Hashimoto S. and Nisizawa K., 1989. Studies on the antitumor activity of marine algae. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 55 : 1259-1264.
- Ohigashi H., Sakai Y., Yamaguchi K., Umezaki T. and Koshimizu K., 1992. Possible anti-tumor promoting properties of marine algae and in vivo activity of Wakam seaweed extract. *Bioscience, Biotechnology, Biochemistry*. 56 : 994-995.
- Proksch P., Edrada R.A. and Ebel R. 2002. Drugs from the seas - current status and microbiological implications. *Applied Microbiology Biotechnology*. 59 : 125-134.
- Renn D., Noda H., Amanos H., Nishino T. and Nishizawa K., 1994. Study on antihypertensive and hyperlipidimic effets of marine algae. *Fisheries Sciences*. 60 : 83-88.
- Riadi H. et Kazzaz M., 1998. Inventaire bibliographique des algues benthiques du littoral Marocain. I. Chlorophyceae et Phaeophyceae. *Acta. Botanica. Malacitana*. 23: 23-41.
- Rogers D. J and Blunden G., 1980. Structural properties of the anti- β lectin from red alga *Ptilota plumose* (Hucla) C. Ag. *Botanica Marina*. 23: 459-462.
- Sasson A., 2000. *Biotechnologies in developing countries: present and future*. Volume 3. Edition UNESCO Publishing. 1103 pp.
- Sheu J.H. and Sung P.J., 1991. Isolation of 24 hydroperoxy 24-vinylcholesterol and fucosterol from the brown alga *Turbinaria conides*. *Journal of Chemistry Society*. 38 : 501-503.
- Sieburth J.M., 1960. Acrylic acid, an antibiotic principle in *Phaeocystis* blooms in Antarctic waters. *Sciences*. 132 : 676-677.

- Ueno N.H., Ueganagi J., Morimoto H., Nakamori R. and Matsuoka T., 1955. Studies on the active compounds of *Digenea simplex* ag and related compounds. *Journal of Pharmacology of Society Of Japan*. 75 : 807-844.
- Valls R., Banaigs B., Piovetti L., Archavlis A. and Artaud J., 1993. Linear diterpene with antimitotic activity from the brown alga *Bifurcaria bifurcata*. *Phytochemistry*. 34 : 1585-1588.
- Vilter H., Glombitza K.W. and Grawe A., 1983. Peroxidase from Phaeophyceae I. Extraction and detection of peroxidases. *Botanica Marina*. 26 : 331-340.
- Xu N., Fan X., Yan X., Li X., Niu R. and Tseng Ck., 2003. Antibacterial bromophenols from the marine red alga *Rhodomela confervoides*. *Phytochemistry*. 62 : 1221-1224.
- Younes F., Etahiri S. and Assobhei O., 2009. Activité antimicrobienne des algues marines de la lagune d'Oualidia (Maroc) : criblage et optimisation de la période de récolte. *Journal of Applied Bioscience*. 24 : 1543-1552.

Achevé d'imprimer : mai 2010
Imprimerie Lawne : 11, rue Dakar, Océan, Rabat, Maroc