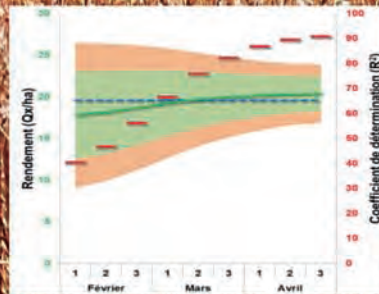




المعهد الوطني للبحث الزراعي  
Institut National de la Recherche Agronomique

Riad BALAGHI  
Mohammed JLIBENE  
Bernard TYCHON  
Herman EERENS

# LA PRÉDICTION AGROMÉTÉOROLOGIQUE DES RENDEMENTS CÉRÉALIERS AU MAROC





المعهد الوطني للبحث الزراعي  
Institut National de la Recherche Agronomique

Division de l'Information et de la Communication

INRA-Edition 2012

Tél.: 25 37 77 98 06 - Fax : 05 37 77 98 07

Dépôt légal : 2012 MO 3225

ISBN : 978- 9954-0-6676-8

Impression FANIGRAPH

Tél.: 05 37 26 48 40 • Fax : 05 37 26 48 41

## Préface



La sécurité alimentaire repose sur une céréaliculture sensible aux aléas climatiques, aussi bien au Maroc que dans le monde. La production céréalière nationale ne couvre pas les besoins alimentaires du pays. Ces besoins sont assurés par les importations qui pèsent lourd sur la balance commerciale. Le poids du déficit est appelé à croître en raison de l'augmentation des prix des produits céréaliers sur le marché international qui est due à une demande soutenue, à la hausse du coût de certains intrants, à l'utilisation des matières premières agricoles pour la production de biocarburants et aux conséquences du changement climatique. La production nationale de céréales est fortement exposée au risque climatique car elle est située essentiellement dans les zones arides et semi arides, qui présentent des ressources en terres et en eau limitées par rapport aux besoins de croissance des cultures. Le Plan Maroc Vert prévoit d'assurer la sécurité alimentaire du pays à travers l'amélioration de la productivité, tout en économisant sur les ressources en eau et en sol. C'est un objectif ambitieux mais réalisable compte tenu de la marge importante de bénéfice offerte par le niveau du progrès technologique réalisé jusqu'à présent à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), dans le domaine de l'adaptation à la sécheresse et de la valorisation des terres. Ce progrès inclut la technologie de gestion des risques pour l'aide à la prise de décision, en plus des technologies variétales, agronomiques et phytosanitaires. Sur le plan de la gestion des risques climatiques, et de la sécheresse en particulier, l'INRA a développé des approches et des outils permettant d'identifier les régions affectées par le déficit céréalier, de définir à temps la manière et les moyens d'intervention ainsi que d'aborder le marché international des céréales dans les meilleures conditions. C'est le fruit d'un investissement initié par l'INRA, au début des années 90, dans le domaine de la recherche agrométéorologique orientée vers la prédiction des rendements céréaliers.

C'est un travail de long terme qui ne pouvait être soutenu que par une institution dotée d'une visibilité et d'objectifs et qui dispose de moyens et d'équipes de recherche engagées et conscientes des enjeux cruciaux pour l'agriculture du pays.

Le document que nous avons le plaisir de vous présenter relate l'historique de la recherche agrométéorologique opérationnelle entreprise à l'INRA par nos chercheurs, en collaboration avec des collègues issus d'organismes partenaires internationaux. Cette recherche a débuté suite à la sécheresse historique de la campagne agricole 1994-1995 qui a fait prendre conscience de la nécessité de prévoir les récoltes céréalières et de bâtir un système national de prédiction des rendements céréalières. Cette recherche a porté ses fruits, puisqu'un système national de prédiction des rendements céréalières a été mis au point, appelé « CGMS\_MA ». Ce système est actuellement opérationnel, porté par trois institutions nationales (INRA, DSS et DMN), réunies en consortium stratégique, et fonctionne selon les standards internationaux de qualité. Il permet de prédire les rendements céréalières jusqu'à trois mois en avance sur la récolte, offrant ainsi une flexibilité importante pour la prise de décisions.

**Pr. Mohamed BADRAOUI**

*Directeur de l'INRA*

# Présentation



La prédiction agrométéorologique des rendements est un art difficile. C'est aussi et surtout une science qui se pratique, à plusieurs institutions nécessairement solidaires, sous la pression d'échéances fixes, et qui sert des clients souvent critiques. Ses adeptes sont des praticiens qui, au-delà des limitations qui affectent données, modèles et méthodes ont appris à fournir des estimations dont l'erreur – connue – est acceptable pour la prise de décision.

Depuis quinze ou vingt ans, avec l'essor de l'informatique, de la télédétection, de la géostatistique et des systèmes d'information géographiques on a vu se développer la tendance à une approche très technicienne au suivi des cultures et à la prédiction des rendements. Certains s'en contentent. On les reconnaît facilement : ils produisent de manière semi-automatique graphes et cartes comparant l'année en cours à une fiction statistique (l'année moyenne ou normale) ou à l'année précédente.

Les auteurs de cet ouvrage sont d'une autre trempe. S'ils utilisent tous les acquis récents, ils savent aussi, par expérience, que la prédiction des rendements reste d'abord une application agronomique. Il faut connaître et comprendre le climat et sa variabilité à toutes les échelles spatiales et de temps qui intéressent l'agriculture, et il faut connaître l'agriculture et les facteurs statiques et dynamiques de sa variabilité, aux mêmes échelles, au-delà des statistiques agricoles. C'est ce qui caractérise ce petit ouvrage : il explique les méthodes – des plus traditionnelles comme l'analyse fréquentielle des pluies aux plus avancées comme l'exploitation des indices de végétation satellitaires – et il nous fait **comprendre** pourquoi et comment les utiliser pour quantifier l'effet des facteurs qui agissent sur les rendements agricoles.

Je connais bien les auteurs, et depuis longtemps. Leur art de la prédiction des récoltes vient de l'expérience et de l'utilisation rigoureuse de l'éventail complet des techniques agrométéorologiques. Ils ne négligent pas les méthodes éprouvées, dont l'approche technicienne ignore jusqu'à l'existence. Il suffit, pour s'en convaincre, de consulter la bibliographie où De Martonne, Célérier et Charton (1924) font bon ménage avec Bénichou et Le Breton (1987) et de Wit, Duveiller et Defourny (2012).

Par leur façon minutieuse d'essayer de **comprendre**, l'approche de Riad Balaghi et de ses collègues a quelque chose du naturaliste. On le voit bien dans certaines règles empiriques, comme quand ils précisent le seuil des pluies cumulées au-dessus duquel la relation entre rendement et pluviométrie s'estompe. On le voit aussi dans de nombreuses figures qu'on ne trouvera dans aucun autre ouvrage sur le sujet : des figures qui dissèquent les données.

Le travail de MM. Balaghi, Jlibene, Tychon et Eerens mérite une ample diffusion, au-delà du Maroc. D'abord dans les écoles qui enseignent, à divers niveaux, sous un nom ou un autre, la prédiction des récoltes. Les étudiants apprendront à regarder les données de près et à extraire toute l'information qu'elles contiennent. Ensuite, et surtout, auprès des professionnels et des praticiens, même chevronnés : ils seront surpris d'y voir un savoir-faire (un « art ») et des analyses originales que les ouvrages plus techniques ne connaissent pas.

Pour ma part, je me réjouis de la disponibilité d'un ouvrage de **vulgarisation scientifique avancée** sur la prédiction des rendements céréalières. Je ne doute pas un instant qu'il aura le succès qu'il mérite.

**Dr. René GOMMES**

*Docteur en phyto-géochimie en 1977.*

*Agrométéorologue à la FAO depuis 1980.*

*Coordinateur du « Groupe Agrométéorologie », de 1994  
à 2007, et chef de l'équipe « Impact du Climat », de 2008  
à 2010, de la FAO.*

*Chercheur principal au JRC de 2010 à 2012.*

*Membre de la Société Européenne d'Agronomie (ESA)  
et de la Société Internationale de Biométéorologie (ISB).*

## Remerciements

La recherche sur l'agrométéorologie a été initiée au Centre Régional de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Meknès en 1992, dans le cadre du « *Programme Bour Favorable* » coordonné alors par Dr Mohammed JLIBENE. La recherche a continué dans ce cadre jusqu'en 2002. Elle a été poursuivie sous la direction de Dr Riad BALAGHI dans le cadre de « *l'Unité de Recherche sur l'Agronomie et la Physiologie Végétales* » à l'INRA de Meknès, de 2002 à 2008, puis au « *Département de l'Environnement et des Ressources Naturelles* », à l'INRA de Rabat, de 2008 à nos jours.

Depuis 2008, la recherche en agrométéorologie reçoit le soutien de Monsieur le Directeur de l'INRA, Pr Mohamed BADRAOUI, non seulement en sa qualité de gestionnaire mais également en sa qualité de scientifique, convaincu de l'intérêt de soutenir ce projet de recherche pour renforcer la sécurité alimentaire du pays.

Ce projet de recherche a nécessité une base de données météorologiques et culturelles considérable ainsi qu'une collaboration scientifique et technique d'institutions nationales et internationales : la Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS), la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), l'Université de Liège (Arlon Campus Environnement, ex Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Belgique), le Centre de Recherches Commun de la Commission Européenne (JRC, Italie), l'Institut flamand pour la recherche technologique (VITO, Belgique) et l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO, Italie).

Il a été en partie financé par l'Agence Belge de Développement (CTB, Belgique) ainsi que par l'Union Européenne dans le cadre de son 7<sup>ème</sup> *Programme cadre de recherche, de développement technologique et de démonstration* (Projet « *Crop Monitoring As An E-Agricultural Tool For Developing Countries* », E-AGRI).

L'idée de ce projet de recherche a été maintenue grâce à la persévérance de chercheurs de l'INRA, qui pourront trouver ici une expression de leur œuvre commune. Des personnes de grande qualité scientifique et technique y ont contribué, à des degrés divers :

M. Moha MARGHI, ancien Directeur de la Direction Provinciale de l'Agriculture de Meknès (DPA) et ancien Secrétaire Général du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM), a été le premier à requérir auprès de l'INRA une étude sur les conséquences de la sécheresse de la campagne 1994-1995 dans la région de Meknès. En nous approchant pour la réalisation de cette étude, il nous a inspiré l'idée de nous investir dans les recherches pour la prédiction des récoltes céréalières.

Du Centre de Recherches Commun de la Commission Européenne (JRC, Italie) : Dr Giampiero GENOVESE, Dr Bettina BARUTH, Dr Mohamed EL AYDAM, Dr Giovanni NARCISO, pour avoir soutenu la convention de recherche entre le JRC et l'INRA dans le domaine de la prédiction des récoltes et avoir appuyé le projet de recherche E-AGRI.

De la Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS, Rabat) : M. Redouane ARRACH et M. Mustafa TAHRI, pour leur continuel engagement à mettre à notre disposition les données des statistiques agricoles et pour avoir appuyé la convention entre la DSS, l'INRA et la DMN dans le cadre du projet E-AGRI.

De la Direction de la Météorologie Nationale (DMN, Casablanca) : M. Tarik EL HAIRECH et M. Rachid SEBBARI, pour avoir concrétisé les conventions de recherche entre la DMN et l'INRA et pour leur engagement formel dans le projet E-AGRI.

Du Projet E-AGRI : Dr Qinghan DONG, Dr Allard DE WIT, M. Steven HOEK, pour leur appui capital dans l'adaptation et l'installation du système « CGMS\_MA » au Maroc.

De l'INRA : Dr Rachid MRABET, M. Hassan BENAOUA, Dr Hamid MAHYOU, Dr Sliman ELHANI, Dr Rachid DAHAN, Dr Hassan OUABBOU et M. Mohamed BOUGHLALA, pour l'échange d'information et de données ainsi que pour la participation effective à nos divers travaux de recherche.

Nous voudrions également remercier, les personnes qui ont directement ou indirectement contribué à nos travaux de recherche, soit en nous fournissant gracieusement des données agro-climatiques, soit en participant à nos réflexions : M. Abdelaziz EL OUALI (ex DMN), pour ses conseils sur la climatologie du Maroc ; M. Wolfgang GÖBEL (ex INRA), pour l'échange d'informations agrométéorologiques et nos publications communes sur l'Atlas Agro-climatique du Maroc ; Dr Mohammed EL MOURID (ex INRA), pour avoir initié et soutenu les premiers travaux en modélisation à l'INRA ; M. Hamid FELLOUN (ex MAPM) et M<sup>me</sup> Fatiha SELOUANI (MAPM) pour avoir mis à notre disposition les données climatiques du MAPM.

Nous ne manquerons pas de remercier M. Chafik KRADI, chef de la Division de l'Information et de la Communication de l'INRA, ainsi que son staff et particulièrement M. Reddad TIRAZI, pour la publication et la diffusion de ce document.

Enfin, nos vifs remerciements s'adressent au Dr René GOMMES, scientifique de renom et ex *Senior Scientist* à la FAO, avec qui nous avons eu l'honneur et le grand plaisir de travailler en de nombreuses occasions sur l'agrométéorologie opérationnelle et le changement climatique, pour avoir eu la gentillesse de relire notre document et de le préfacer.



# RÉSUMÉ

Ce document présente la synthèse des travaux de recherche effectués à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), depuis le début des années 1990, dans le domaine de l'agrométéorologie opérationnelle orientée vers la prédiction des récoltes. La prédiction des récoltes permet de se préparer à l'avance aux conséquences d'éventuelles déviations anormales du climat, surtout pour les filières stratégiques de sécurité alimentaire, comme celle des céréales. À notre connaissance, il n'y a pas à ce jour de méthode officielle de prédiction agrométéorologique des récoltes céréalières au Maroc. En revanche, il existe une méthode d'estimation des récoltes, sur la base d'un échantillonnage de terrain éprouvée, de type aréolaire et effectuée chaque année par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, à travers sa Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS). C'est une méthode directe qui est précise, appliquée juste avant la moisson, mais qui requiert des moyens humains et financiers conséquents. La nécessité d'élaborer des méthodes indirectes de prédiction des récoltes qui soient précoces, rapides et économes en ressources, a été comprise à l'INRA consécutivement à la « sécheresse du siècle » qui est survenue lors de la campagne agricole 1994-1995. Ni les classiques analyses fréquentielles du climat, pour trouver des analogies avec des années antérieures, ni les modèles mécanistiques de prédiction des rendements agricoles mis au point dans les pays développés, et en vogue à l'époque, n'ont permis de suivre le développement végétatif des céréales et à fortiori de prédire la récolte catastrophique de 1995. De ce constat est partie l'idée de refonder l'approche de prédiction de la récolte céréalière au Maroc sur la base de méthodologies innovantes, combinant les approches empiriques et statistiques avec l'expertise agronomique et météorologique. La première idée a consisté à trouver les interactions existant entre le climat et le comportement des céréales. C'est ainsi que les cycles climatiques et culturaux ont été analysés de façon concomitante, sur une longue série temporelle, d'abord au niveau de la région de Meknès où les auteurs de ce document travaillaient, puis à l'échelle de tout le pays. Le début de ces recherches a révélé, pour la première fois au Maroc, que la variation interannuelle des rendements céréaliers peut être facilement prédite, avec un degré élevé de confiance, par la variation interannuelle de la pluviométrie annuelle, lorsqu'elle est cumulée sur toute la saison agricole. La relation peut être davantage améliorée, en décomposant la pluviométrie annuelle en plusieurs périodes durant le cycle végétatif des céréales. Le travail de recherche mené avec l'Université de Liège puis en collaboration avec le Centre de Recherches Commun de la Commission Européenne (JRC) a permis d'aboutir à l'élaboration d'une méthodologie pour prédire la production céréalière à partir de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) issu des images satellitaires. Contrairement à la majorité des pays européens, cet indice s'est avéré être fortement corrélé aux rendements des céréales dans le cas du Maroc en raison du caractère semi-aride du climat, de la dépendance de la production céréalière vis-à-vis de la pluviométrie et de l'importance des superficies céréalières. Le NDVI n'est approprié que pour les régions où la pluviométrie, cumulée sur la saison agricole, est inférieure à 550 millimètres.

Les deux méthodologies combinées, utilisant la pluviométrie cumulée et le NDVI, ont permis de prédire les rendements des céréales à partir de mars, c'est-à-dire deux à trois mois avant la récolte, avec un niveau de précision similaire à celui de la méthode d'échantillonnage de terrain de la DSS, à l'échelle nationale, avec l'avantage d'un très faible coût. Ces résultats éclatants ont permis à l'INRA de publier, pour la première fois au Maroc, trois bulletins annuels de prédiction de la production céréalière entre 2009 et 2011 en partenariat avec le JRC. Dans ces bulletins, les prédictions sont élaborés à partir d'une approche combinée, qui met à contribution une approche paramétrique utilisant des régressions linéaires entre les rendements céréaliers et: (1) la pluviométrie, et (2) le NDVI avec en plus une approche d'analyse par analogie avec les campagnes agricoles historiques ainsi (4) que l'approche de modélisation du JRC qui est basée sur un modèle de simulation déterministe (WOFOST). Le modèle déterministe du JRC est actuellement en cours d'adaptation aux conditions agro-climatiques du Maroc. La volonté de pérenniser ces bulletins, mais aussi de les institutionnaliser et de les produire de façon autonome au Maroc, a abouti à la mise en place d'une collaboration stratégique formelle entre l'INRA, la DSS, la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), en parallèle de celle qui est en cours entre l'INRA et le JRC. Cette nouvelle collaboration a permis la mise en place du premier système de prédiction des rendements céréaliers au Maroc, appelé « CGMS\_MA », fondé sur l'approche combinée développée dans ce document. Grâce à ce système marocain, un quatrième bulletin de prédiction de la récolte céréalière, a été publié en avril 2012. Cette approche combinée de prédiction de la récolte céréalière peut être étendue à d'autres cultures au Maroc et dans des pays à climat similaire, avec les ajustements nécessaires. Parallèlement, une nouvelle voie de recherche s'ouvre dans le domaine de l'estimation des superficies agricoles à partir de l'imagerie satellitaire de basse résolution spatiale et peu coûteuse.

**Mots clés :** Agrométéorologie, prédiction des rendements, analogie, NDVI, pluviométrie, température, céréales, blé tendre, blé dur, orge, sécheresse, Maroc, INRA.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>II. APPROCHES D'ANALYSE</b> .....	<b>10</b>
1. Bases de données utilisées .....	10
1.1. Données Climatiques .....	11
1.2. Indice de l'Oscillation Nord Atlantique.....	13
1.3. Indice de végétation issu de l'imagerie satellitaire.....	13
1.4. Limites administratives du Maroc en format SIG .....	15
1.5. Cartes d'occupation des terres .....	15
1.6. Statistiques agricoles .....	16
2. Méthodes et analyses.....	17
2.1. Traitement exploratoire des données pluviométriques .....	17
2.2. Analyse fréquentielle de la pluviométrie.....	19
2.3. Indice ombrothermique de Bagnouls et Gausson .....	19
2.4. Longueur de la Période de Croissance.....	20
2.5. Analyse de rupture de série chronologique de la pluviométrie .....	21
2.6. Productivité de l'eau de pluie .....	21
2.7. Prétraitement des images satellitaires .....	23
2.8. Approche pour la prédiction de la récolte céréalière .....	24
2.8.1. Progrès technologique.....	26
2.8.2. Analyse par analogie.....	27
2.8.3. Analyse par la régression linéaire .....	29
<b>III. ANALYSES DU CLIMAT DU MAROC</b> .....	<b>30</b>
1. Influence de l'Oscillation Nord Atlantique .....	31
2. Changement climatique .....	32
3. Température.....	34
3.1. Variation spatiale de la température.....	34
3.2. Variation interannuelle de la température.....	37
3.3. Variation saisonnière de la température.....	39

4.	Pluviométrie .....	40
4.1.	Variation spatiale de la pluviométrie.....	40
4.2.	Variation interannuelle de la pluviométrie .....	41
4.3.	Variation saisonnière de la pluviométrie.....	44
4.3.1.	Analyse fréquentielle de la pluviométrie décadaire.....	45
4.3.2.	Approximation linéaire du cumul pluviométrique décadaire.....	47
4.3.3.	Variation spatio-saisonnière de la pluviométrie.....	51
5.	Saison de culture .....	53
6.	Longueur de la Période de Croissance .....	58
<b>IV.</b>	<b>ANALYSES DE LA PRODUCTION CÉRÉALIÈRE.....</b>	<b>59</b>
1.	Distribution géographique et utilisation des céréales.....	59
2.	Progrès technologique .....	63
<b>V.</b>	<b>ANALYSES AGROMÉTÉOROLOGIQUES .....</b>	<b>68</b>
1.	Relation entre l'eau transpirée et la croissance .....	68
2.	Relation entre la pluviométrie et le rendement des céréales .....	71
3.	Relation entre la pluviométrie et la superficie céréalière .....	72
4.	Relation entre la pluviométrie et productivité de l'eau de pluie .....	74
4.1.	Échelle nationale .....	74
4.2.	Échelle des zones agro-écologiques .....	77
5.	Sécheresse agricole .....	78
6.	Croissance et pluviométrie.....	80
7.	Relation entre le NDVI et la pluviométrie.....	82
8.	Profil de NDVI .....	85
8.1.	Masque agricole .....	85
8.2.	Variations saisonnière et inter annuelle du NDVI.....	86
8.3.	Variation régionale du NDVI.....	87
<b>VI.</b>	<b>PRÉDICTION DES RENDEMENTS CÉRÉALIERS.....</b>	<b>89</b>
1.	Approche non-paramétrique.....	90
2.	Approche analogique .....	92
2.1.	Prédiction par la pluviométrie .....	92

2.1.1	Prédiction par la pluviométrie totale de la saison .....	92
2.1.2	Prédiction par la distribution intra-annuelle de la pluviométrie .....	93
2.1.3	Progrès technologique .....	97
2.1.4	Erreur de prédiction .....	97
2.2.	Prédiction par le NDVI.....	99
2.2.1	Prédiction dans l'application « marsop3 » .....	99
2.2.2	Prédiction par le ndvi .....	101
2.2.3	Prise en compte du progrès technologique .....	101
2.2.4	Estimation de l'erreur de prédiction .....	102
2.3.	Prédiction par la pluviométrie et le NDVI.....	102
3.	Approche paramétrique .....	105
3.1.	Prédiction par la pluviométrie .....	108
3.1.1.	Prédiction par la pluviométrie cumulée par périodes durant la saison .....	109
3.1.2.	Prédiction par la pluviométrie cumulée sur toute la saison .....	110
3.2.	Prédiction par les indices agro-climatiques .....	113
3.3.	Prédiction par le NDVI .....	114
3.3.1.	Relation Entre Le Rendement Et Le Ndvi .....	114
3.3.2.	À L'échelle Nationale .....	117
3.3.3.	À L'échelle Des Zones Agro-Écologiques .....	119
3.3.4.	À L'échelle Des Provinces .....	119
3.3.5.	Estimation De L'erreur De Prédiction .....	121
4.	Approche combinée .....	122
<b>VII.</b>	<b>INSTITUTIONNALISATION DES PRÉDICTIONS.....</b>	<b>126</b>
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>128</b>
<b>IX.</b>	<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>131</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classement des provinces du Maroc par classes pluviométriques et niveau d'aridité. (Moyenne de 1988 à 2005).....	4
Tableau 2 : Analyse de rupture de série chronologique de la pluviométrie cumulée de septembre à mai au niveau provincial (Source : Balaghi, 2006).....	33
Tableau 3 : Modèles de régression linéaire appliqués à la pluviométrie décadaire cumulée au cours de la campagne agricole (de septembre à mai) à l'échelle nationale.....	49
Tableau 4 : Indice ombrothermique (P/T, en mm/°C), à l'échelle des stations synoptiques. ....	55
Tableau 5 : Les principales utilisations du grain des céréales d'automne (Source : ONICL, 2012). ....	60
Tableau 6 : Répartition des céréales en termes de production, superficie et productivité, à l'échelle des zones agro-écologiques (moyenne de 1990 à 2011). ....	61
Tableau 7 : Progression annuelle des rendements à l'hectare (Quintal/ha.an), des principales céréales avec leurs coefficients de détermination ( $R^2$ ) pour chaque zone agro-écologique (série de 1979 à 2006 ; Source : Balaghi et Jlibene, 2009).....	64
Tableau 8 : Productivité de l'Eau de Pluie (PEP) moyenne et maximale des céréales à l'échelle nationale. La PEP est égale à la pente de la relation entre les rendements et la pluviométrie. ....	77
Tableau 9 : Productivité de l'Eau de Pluie (grammes/litre), moyenne de 1988 à 2011, pour les trois céréales d'automne, aux échelles nationale et des zones agro-écologiques. ....	77
Tableau 10 : Relation non-paramétrique entre des indicateurs de la sécheresse, par phase du cycle de la culture (début, milieu et fin de cycle), et le rendement en grain du blé tendre (Quintaux/hectare). (0 : Absence de sécheresse ; 1 : Présence de sécheresse). ....	91
Tableau 11 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre le rendement du blé tendre, du blé dur, de l'orge et la pluviométrie cumulée d'octobre à mars à l'échelle des zones agro-écologiques (Données de 1988 à 2008).....	113
Tableau 12 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre le rendement des céréales d'automne et le NDVI (SPOT-VEGETATION) moyen de février à mars et de février à avril, à l'échelle des zones agro-écologiques (Données de 1999 à 2011). ....	119
Tableau 13 : Tableau schématique illustrant l'approche combinée, développée pour la prédiction des rendements céréaliers. ....	122

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Phases positive (à gauche) et négative (à droite) de l'Oscillation Nord Atlantique. ....	13
Figure 2 : Pluviométrie décadaire nationale durant la campagne agricole, de 1988 à 2011. ....	18
Figure 3 : Le système Crop Growth Monitoring System (CGMS) de prédiction des récoltes. ....	25
Figure 4 : Exemple hypothétique montrant comment le rendement des cultures peut être influencé par des facteurs externes (Source : Gommès <i>et al.</i> , 2010).....	27
Figure 5 : Relation entre la pluviométrie sur la campagne agricole (cumul de septembre à mai) et l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) moyen des mois de septembre à février (données de 1979 à 2011). ....	32
Figure 6 : Température maximale du mois le plus chaud (A), minimale du mois le plus froid (B), moyenne (C) et amplitude thermique moyenne (D) (cartes réalisées à partir des données <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> à la résolution spatiale de 1 km, Série de 1950 à 2000, Hijmans <i>et al.</i> , 2005). ....	36
Figure 7 : Somme des températures moyennes journalières (en degrés x jours), au cours de la saison de culture des céréales. Les campagnes agricoles (année de récolte) sont classées par ordre décroissant de température cumulée (Données de 1999 à 2009). ....	38
Figure 8 : Évolution du coefficient de variation interannuelle des températures moyennes décadales au niveau national et au niveau de la station de Meknès (Données de 1999 à 2009). ....	39
Figure 9 : Moyennes des températures maximales (courbe en rouge), moyenne (courbe en jaune) et minimales (courbe en bleu) décadales au cours de la saison de culture des céréales. Les points correspondent aux valeurs des températures maximales (en rouge) et minimales (en bleu), de 1999 à 2009. ....	40
Figure 10 : Moyenne de la pluviométrie cumulée de septembre à avril (Carte réalisée à partir des données <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> ; Hijmans <i>et al.</i> , 2005). Les points en rouge indiquent les principales villes marocaines. ....	41
Figure 11 : Variation interannuelle de la pluviométrie cumulée entre septembre et mai, durant la période 1988-2012. ....	42
Figure 12 : Localisation des 35 stations synoptiques utilisées, sur fond de carte d'altitude réalisée à partir des données radar « <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> » ( <a href="http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/">http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/</a> ). ....	43
Figure 13 : Exemples de distribution de la pluviométrie décadaire au cours de la campagne agricole, pour quelques stations synoptiques contrastées (moyennes de 1988 à 2010). ...	44
Figure 14 : Distribution de la pluviométrie, au niveau national, pour 5 niveaux de fréquence (0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9) à partir des données de 1988 à 2011.....	46
Figure 15 : Distribution de la pluviométrie annuelle (de septembre à juin) à Meknès (1932-2004), Khémisset (1986-2004), Settat (1910-2004) et Safi (1901-2004). La courbe rouge représente l'ajustement de la distribution observée à la distribution théorique (Balaghi <i>et al.</i> , 2005). ....	47

Figure 16 : Pluviométrie décadaire cumulée de septembre à mai à l'échelle nationale. <i>Les campagnes agricoles sont classées par ordre décroissant de pluviométrie.</i> .....	48
Figure 17 : Rythme moyen d'accroissement ( $x$ , en mm/décade) de la pluviométrie décadaire de 1988 à 2011, pour 4 classes de pluviométrie (200 à 300, 300 à 400, 400 à 500 et > 500 mm), à l'échelle nationale. ....	50
Figure 18 : Distribution de la pluviométrie mensuelle en fonction du volume pluviométrique au cours de la campagne agricole au Maroc (données de 1988 à 2005). ....	51
Figure 19 : Distribution de la pluviométrie mensuelle au niveau des stations synoptiques de la côte Atlantique (données de 1988 à 2005). Les stations sont classées par ordre latitudinal. Les lignes rouges représentent les isohyètes. ....	52
Figure 20 : Diagramme ombrothermique à l'échelle nationale. ( <i>Pluviométrie et température moyennes de 1999 à 2009</i> ). ....	53
Figure 21 : Relation entre l'indice ombrothermique moyen (de septembre à mai) et la latitude, pour différentes stations synoptiques. ( <i>Pluviométrie et température moyennes mensuelles, de 1999 à 2009</i> ). ....	54
Figure 22 : Aires géographiques dans lesquelles la saison céréalière continue jusqu'en mars (ensemble des zones en couleurs bleu, vert et marron), en avril (ensemble des zones en couleurs vert et marron) et en mai (zone en couleur marron), selon l'indice ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953). (Carte réalisée à partir des données <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> ; Hijmans et al., 2005). ....	57
Figure 23 : Période de préparation du sol (W), période des semailles (S), période humide pendant laquelle s'effectue la levée (L), le tallage (T), et l'épiaison (E), et période de croissance où démarre le semis avant la période humide et la floraison (F) et remplissage du grain après ; la période de maturation du grain (M), leurs durées et dates de début et fin, respectives (Jlibene et Chafai, 2002). Les données utilisées sont celles de la station Arbaoua représentant le nord-ouest marocain. ....	58
Figure 24 : Production moyenne des céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) par province (x1000 tonnes) (Données de 1990 à 2010). ....	62
Figure 25 : Évolution du rendement du blé tendre au Maroc (en vert) (Source de données: FAOSTAT et DSS). ....	65
Figure 26 : Courbes de probabilité cumulative de réalisation des rendements du blé chez les agriculteurs en conditions potentielles et réelles à Meknès (Source : Boughlala <i>et al.</i> , 1994). ....	66
Figure 27 : Progrès technologique réalisé en 28 ans sur le blé tendre au Maroc. ....	67
Figure 28 : Progrès technologique réalisé en 28 ans sur le blé dur au Maroc. ....	67
Figure 29 : Évolution de l'évapotranspiration journalière réelle du blé tendre simulée à partir de la température seule (ETR-T°) et de plusieurs paramètres climatiques (ETR-T°, HR, Vent, Rayonnement) à Meknès (Balaghi, 2000). ....	69
Figure 30 : Schéma illustrant la relation entre la transpiration et la biomasse (Jlibene et Balaghi, 2009). ....	70
Figure 31 : Variation par rapport à la moyenne (%) du rendement des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et de la pluviométrie (cumulée de septembre à mai), à l'échelle nationale (Données de 1988 à 2011). ....	71



Figure 32 : Variation par rapport à la moyenne (%) de la superficie des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et de la pluviométrie (cumulée de septembre à mai) à l'échelle nationale.....	72
Figure 33 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre la superficie des céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et la pluviométrie cumulée au cours de la campagne agricole (à partir d'octobre), à l'échelle nationale (Données de 1988 à 2011). La pluviométrie décadaire moyenne est représentée en second axe, à titre d'illustration. ....	73
Figure 34 : Relation entre le rendement national du blé tendre (Kg/ha) et la pluviométrie de la campagne agricole (mm) (données de 1988 à 2011). La pente de la droite de régression traduite en termes de grammes par litre d'eau de pluie (g/l), indique la PEP moyenne (0,309 g/l). La courbe en gras indique la PEP maximale du blé tendre à l'échelle nationale (0,652 g/l). ....	75
Figure 35 : Relation entre le rendement national du blé dur (Kg/ha) et la pluviométrie de la campagne agricole (mm) (données de 1988 à 2011). La pente de la droite de régression traduite en termes de grammes par litre d'eau de pluie (g/l), indique la PEP (0,347 g/l). La courbe en gras indique la PEP maximale du blé dur à l'échelle nationale (0,653 g/l). ....	75
Figure 36 : Relation entre le rendement national de l'orge (Kg/ha) et la pluviométrie de la campagne agricole (mm) (données de 1988 à 2011). La pente de la droite de régression traduite en termes de grammes par litre d'eau de pluie (g/l), indique la PEP (0,277 g/l). La courbe en gras indique la PEP maximale de l'orge à l'échelle nationale (0,498 g/l).....	76
Figure 37 : Cumul de la pluviométrie décadaire entre septembre et mai, d'une série de campagnes agricoles sèches. Les périodes de sécheresse sont celles durant lesquelles les cumuls sont stagnants (en couleurs accentuées). Les sécheresses peuvent survenir à des phases variables du cycle de croissance et de développement des céréales.....	79
Figure 38 : Distribution spatiale de la pluviométrie décadaire cumulée (de septembre à mai) durant la campagne agricole 1996-1997, sur 23 provinces du Maroc (Source : Jlibene, 2011). ....	80
Figure 39 : Conditions climatiques typiques, durant la saison de croissance du blé. Moyennes décadaires de la pluviométrie (données de 1988 à 2011) et des températures (données de 1998 à 2009). ....	81
Figure 40 : Relation entre le NDVI (NOAA-AVHRR) moyen de février et avril (des zones agricoles) et la pluviométrie cumulée de septembre à mai au Maroc. Les 345 points sur cette figure représentent les données de 23 stations et pour les années de 1990 à 2004. ....	83
Figure 41 : Comparaison du NDVI (SPOT-VEGETATION) de la 3 <sup>ème</sup> décade de mars, entre une campagne agricole humide (2005-2006) et sèche (1999-2000). Les valeurs élevées de NDVI sont représentées en couleur vert foncé. ....	84
Figure 42 : Carte « GICropV2 » des terres agricoles (en vert) réalisée pour le Maroc, à une résolution spatiale de 250 mètres, dans le cadre du projet E-AGRI. ....	85
Figure 43: Profil de NDVI moyen national (SPOT-VEGETATION) des zones agricoles, au cours de la campagne agricole, pour les campagnes agricoles de 1999-2000 à 2010-2011. <i>Les campagnes sont classées par ordre décroissant de rendement moyen des céréales d'automne.</i> .....	87
Figure 44 : Profil moyen de NDVI (SPOT-VEGETATION) des zones agro-écologiques du Maroc (NDVI des pixels agricoles uniquement), au cours de la campagne agricole (données de 1999-2000 à 2010-2011). ....	88

Figure 45 : Classement des campagnes agricoles depuis 1988, en termes de cumul pluviométrique, du 1 <sup>er</sup> septembre au 10 avril (Source : Balaghi <i>et al.</i> , 2012). Les années de récolte sont indiquées sur l'axe horizontal.....	93
Figure 46 : Pluviométrie cumulée (septembre à mai) de la campagne agricole 1994-1995 à Meknès, comparée à l'historique de 1960 à 1994. Les campagnes agricoles sont classées par ordre croissant de pluviométrie.....	94
Figure 47 : Dendrogramme de classification des campagnes agricoles (1960 à 2000) selon la pluviométrie mensuelle des huit mois, de septembre à avril, à Meknès (Source : Balaghi, 2000). .....	95
Figure 48 : Analyse par analogie de la campagne agricole 2007-2008 sur la base de la pluviométrie décadaire durant la saison de culture, à l'échelle nationale au Maroc. ....	96
Figure 49 : Prédiction du rendement national du blé tendre pour les campagnes agricoles 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011, sur la base de l'analyse par analogie de la pluviométrie cumulée à partir du mois d'octobre.....	98
Figure 50 : L'application Web "MARSOP3" pour l'analyse agro-climatique. La différence de NDVI à la première décade d'avril par rapport à la normale est un moyen additionnel d'analyse offert par l'application. La base de comparaison peut être changée. Résolution 25x25 km <sup>2</sup> (Source : Balaghi <i>et al.</i> , 2012). .....	99
Figure 51 : Analyse par analogie de la campagne agricole 2011-2012, sur la base de l'indice de végétation (NDVI-SPOT VEGETATION) des zones agricoles, à l'échelle nationale. La campagne agricole 2011-2012 (en orange) est comparée aux campagnes précédentes. La campagne agricole 2000-2001 est celle qui est la plus ressemblante du point de vue du profil du NDVI, suivie de 2007-2008 et de 2004-2005 (Source : Balaghi <i>et al.</i> , 2012).....	100
Figure 52 : Prédiction du rendement national du blé tendre pour les campagnes agricoles 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011, sur la base de l'analyse par analogie du NDVI (données NOAA-AVHRR, de 1988 à 2011) moyen décadaire à compter de février. .	101
Figure 53 : Le logiciel "CGMS Statistical Toolbox" d'analyse statistique pour la prédiction des rendements céréaliers adapté au Maroc. ....	103
Figure 54 : Analyse par analogie de la campagne agricole 2010-2011 réalisée par Analyse en Composantes Principales avec le logiciel "CGMS Statistical Toolbox". .....	104
Figure 55 : Prédiction par analogie des campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011, sur la base de l'indice de végétation NDVI (données NOAA-AVHRR, de 1988 à 2011) et de la pluviométrie, à l'échelle nationale. ....	105
Figure 56 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la régression linéaire entre les rendements des céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et la pluviométrie décadaire cumulée, par décade d'octobre à mai, au niveau national. La pluviométrie moyenne cumulée d'octobre à mai est représentée à d'illustration (Données de 1988 à 2011). ....	108
Figure 57 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la régression linéaire entre le rendement du blé tendre et la pluviométrie décadaire cumulée, par périodes au cours de la campagne agricole, à l'échelle nationale (Données de 1988 à 2011). Pour les périodes de 2 et 3 mois, les barres de différentes couleurs représentent les $R^2$ partiels des modèles de régression. ....	110
Figure 58 : Relation entre le rendement du blé tendre, du blé dur, de l'orge et la pluviométrie cumulée de septembre à mars au niveau national (Données de 1988 à 2008). ....	112

Figure 59 : Corrélation entre le rendement du blé et les indices agrométéorologiques dérivés du programme AgroMetShell de la FAO, à Meknès (Source : Balaghi, 2006). .....	114
Figure 60 : Corrélation entre les rendements des trois céréales d'automne et les valeurs décennales de NDVI (SPOT-VEGETATION), à l'échelle nationale (Données de 1999 à 2011). .....	115
Figure 61 : Coefficient de détermination de la régression entre les rendements des trois céréales d'automne et le NDVI moyen sur plusieurs décades, à partir du mois de février (SPOT-VEGETATION), à l'échelle nationale (Données de 1999 à 2011). .....	116
Figure 62 : Relation entre le rendement des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et le NDVI (SPOT-VEGETATION) moyen de février à mars et de février à avril, à l'échelle nationale (Données de 1999 à 2011). .....	118
Figure 63 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre le rendement du blé tendre, blé dur et orge et le NDVI (SPOT-VEGETATION) moyen de février à mars et de février à avril, à l'échelle des provinces.....	120
Figure 64 : Précision de la prédiction du rendement du blé tendre par le NDVI (SPOT-VEGETATION), à l'approche de la fin de campagne agricole, à l'échelle nationale. Exemples des campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011.....	122
Figure 65 : Relation entre les rendements prédits et observés du blé tendre au niveau national par un modèle de régression multiple associant le NDVI, la pluviométrie et la température saisonnières, à Meknès et Settat. (Source : Balaghi <i>et al.</i> , 2008).....	124

## ACRONYMES

°C	Degré Celsius
ACP	Analyse en Composantes Principales
AFI	Area Fraction Image
AGRIMA	AGRIculture MARoc
AgroMetShell	Outil de suivi et de prévision des cultures développé par la FAO <a href="ftp://ext-ftp.fao.org/sd/reserved/agromet/AgroMetShell/">ftp://ext-ftp.fao.org/sd/reserved/agromet/AgroMetShell/</a>
Alterra	Institution de recherche qui fait partie de l'Université de Wageningen, aux Pays Bas <a href="http://www.alterra.wur.nl">http://www.alterra.wur.nl</a>
AURELHY	Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydro-météorologie
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CGMS	Crop Growth Monitoring System <a href="http://www.marsop.info/marsopdoc/cgms92/1_en.htm">www.marsop.info/marsopdoc/cgms92/1_en.htm</a>
CRTS	Centre Royal de Télédétection Spatiale <a href="http://www.crts.gov.ma">www.crts.gov.ma</a>
CV	Coefficient de Variation
DMN	Direction de la Météorologie Nationale <a href="http://www.marocmeteo.ma">www.marocmeteo.ma</a>
DMP	Dry Matter Productivity <a href="http://www.geoland2.eu">www.geoland2.eu</a>
DPA	Direction Provinciale de l'Agriculture
DPAE	Direction de la Programmation et des Affaires Économiques (nouvellement réorganisée en DSS)
DSS	Direction de la Stratégie et des Statistiques <a href="http://www.agriculture.gov.ma">www.agriculture.gov.ma</a>
E-AGRI	Projet <i>Crop Monitoring as an E-agriculture tool in Developing Countries</i> <a href="http://www.e-agri.info">www.e-agri.info</a>
ENSO	El Niño–Southern Oscillation, or El Niño/La Niña–Southern Oscillation
ENVISAT	ENVIronment SATellite, est un satellite d'observation de la Terre de l'Agence spatiale européenne lancé en 2002
ETR	Evapo-transpiration réelle
EUEp	Efficience d'Utilisation de l'Eau de pluie
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture <a href="http://www.fao.org">http://www.fao.org</a>
FAOCLIM	Base de données mensuelle de la FAO contenant des paramètres agro-climatiques observés et calculés <a href="http://www.fao.org/nr/climpag/pub/EN1102_en.asp">http://www.fao.org/nr/climpag/pub/EN1102_en.asp</a>
fAPAR	Fraction de rayonnement solaire absorbée par les plantes dans le domaine spectral permettant la photosynthèse
GHCN	Global Historical Climatology Network
GLC2000	Global Land Cover classification for the year 2000
GLCropV2	Carte d'occupation des terres réalisée en collaboration avec l'Institut flamand pour la recherche technologique (VITO)
g	Gramme
ha	Hectare (1 hectare = 10.000 m <sup>2</sup> )
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique <a href="http://www.inra.org.ma">www.inra.org.ma</a>
JRC	Centre Commun de Recherches de la Commission Européenne (Joint Research Centre) <a href="http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm">http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm</a>
Kg	Kilogramme
Km	Kilomètre

I	Litre
LAI	Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)
MAPM	Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime <a href="http://www.agriculture.gov.ma">www.agriculture.gov.ma</a>
MARS	Monitoring Agricultural ResourceS <a href="http://mars.jrc.ec.europa.eu">mars.jrc.ec.europa.eu</a>
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer, spectromètre pour l'imagerie de moyenne résolution.
MIAC	MidAmerica International Agricultural Consortium
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/">http://modis.gsfc.nasa.gov/</a>
mm	Millimètre
NAO	Oscillation Nord Atlantique
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA-AVHRR	The Advanced Very High Resolution Radiometer sensor carried by the National Oceanic and Atmospheric Administration satellite
ONICL	Office National Interprofessionnel des Céréales et Légumineuses <a href="http://www.onicl.org.ma">www.onicl.org.ma</a>
ONSSA	Office National de la Sécurité Sanitaire des produits Alimentaires <a href="http://www.onssa.gov.ma">www.onssa.gov.ma</a>
ORMVA	Office Régional de Mise en Valeur Agricole
PEP	Productivité de l'Eau de Pluie
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
Proba-V	Project for On-Board Autonomy – VEGETATION. Capteur qui devra être lancé en 2013, embarquant une version allégée de l'instrument VEGETATION <a href="http://www.vgt.vito.be/">http://www.vgt.vito.be/</a>
PSDA	Projet de Soutien au Développement Agricole dans les ORMVA
Qx	Quintaux (1 quintal = 100 Kg)
R <sup>2</sup>	Coefficient de détermination
SEEE	Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement <a href="http://www.minenv.gov.ma">http://www.minenv.gov.ma</a>
SIG	Système d'Information Géographique
SPOT-VEGETATION	Programme de capture des images de la végétation sur terre à partir des satellites français « Satellite Pour l'Observation de la Terre »
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission <a href="http://www2.jpl.nasa.gov/srtm">www2.jpl.nasa.gov/srtm</a>
UE	Union Européenne
VITO	Flemish Institute for Technological Research, Belgium <a href="http://www.vito.be">www.vito.be</a>
WMO	Organisation Mondiale de la Météorologie <a href="http://www.wmo.int">http://www.wmo.int</a>
WOFOST	World Food Studies : modèle de simulation de croissance des cultures annuelles <a href="http://www.wofost.wur.nl/UK/">www.wofost.wur.nl/UK/</a>



## I. INTRODUCTION

*L'intérêt d'étudier le climat et son impact sur la céréaliculture, pour prédire les rendements céréaliers, a été suscité, pour la première fois à l'Institut National de la Recherche Agronomique, par la sécheresse du siècle survenue durant la campagne agricole 1994-1995. Pour analyser les scénarii des conséquences de cette sécheresse sur les rendements céréaliers, le climat avait été alors analysé de manière à identifier la ou les campagnes agricoles climatiquement analogues entre les mois de septembre et janvier parmi la série historique des campagnes. Il s'est avéré plus tard que la campagne 1994-1995 était exceptionnelle, ne présentant aucune similitude avec les campagnes antérieures. Cette sécheresse avait failli provoquer un désastre économique au Maroc, qui a été évité grâce aux récoltes exceptionnelles de la campagne agricole suivante. Le climat qui était relativement stable, durant la période antérieure à 1980, avait changé, dévoilant de fortes fluctuations inter- et intra-annuelles de la pluviométrie et de la température qui semblaient s'accroître avec le temps. La fréquence et la sévérité des aléas climatiques se sont amplifiées, se répercutant sur les ressources hydriques ainsi que l'agriculture et, par voie de conséquence, sur l'économie toute entière du pays. Pour mieux se préparer à l'avance aux conséquences des fluctuations climatiques sur l'agriculture, il devenait donc nécessaire d'investir dans la recherche agrométéorologique afin de développer des méthodologies et des outils de prédiction des récoltes céréalières, qui soient peu coûteux, efficaces et rapides. Le présent document relate le processus de réflexion et de recherches ayant conduit à l'élaboration d'une approche globale de prédiction des rendements céréaliers au Maroc. Il livre aussi quelques pistes qu'il serait intéressant d'explorer afin d'améliorer la prédiction dans le futur.*

Les plantes cultivées sont sous l'influence de facteurs météorologiques comme la température, la pluviométrie, l'ensoleillement, ou l'hygrométrie. Le développement de méthodes de prédiction des récoltes nécessite de comprendre l'interaction de ces facteurs avec les cultures. L'étude de ces interactions, appelée agrométéorologie, est le résultat d'un processus de mûrissement d'une science qui a débuté par la « biogéographie » puis la « bioclimatologie ». Le terme agrométéorologie<sup>1</sup> (ou météorologie agricole) a fait son apparition vers les années 1920 (WMO, 2006), puis est devenue une science à part entière dans les années 1950 (Seemann *et al.*, 1979). L'agrométéorologie opérationnelle, a pour but de prédire la réponse des cultures aux conditions externes d'origine naturelle (climat, sols, maladies, parasites) ou humaine (techniques culturales).

---

<sup>1</sup> La météorologie agricole peut être définie de manière très large comme « une discipline qui s'intéresse à l'eau, à la chaleur, à l'air et à la biomasse dans le sol et au-dessus du sol dans les milieux affectés à la production agricole, ainsi qu'à l'incidence des parasites et des maladies sur les végétaux et sur les animaux, incidence qui est elle-même fonction de ces divers facteurs » (WMO, 2006).

L'agrométéorologie opérationnelle a débuté à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), plus précisément au Centre Régional de la Recherche Agronomique de Meknès, à la suite de la « sécheresse du siècle » de la campagne agricole 1994-1995, qui a déclenché une prise de conscience de la nécessité de prédire la récolte céréalière. À Meknès, durant la campagne agricole de 1994-1995, la pluviométrie totale sur la période de croissance des céréales (septembre à mai) n'a été que de 228 mm, contre une moyenne de 530 mm calculée sur la période 1960-1994. La campagne de 1994-1995 avait commencé avec un début de saison (septembre à novembre) déficitaire (85,7 mm) par rapport à la moyenne 1960-1994 (126,5 mm). Ensuite, il n'y eut presque pas de pluie jusqu'à début février (7,6 mm) et des pluies très insuffisantes (134,8 mm), à partir de la deuxième décennie de février jusque fin mai, qui n'ont pas permis de rattraper le déficit.

En raison de la persistance de la sécheresse exceptionnelle durant les mois de décembre et janvier, la Direction Provinciale de l'Agriculture (DPA) de Meknès sollicita le conseil du Centre Régional de la Recherche Agronomique de Meknès pour établir des scénarii de déroulement de la campagne agricole 1994-1995. En absence de méthodologies et d'outils de prédiction des récoltes, il fut entrepris une comparaison de la situation par rapport à l'historique des données pluviométriques, disponibles auprès de la Direction de la Météorologie Nationale, de 1960 à 1994. De l'analyse de cet historique, il apparut que l'année 1974-1975 présentait un profil similaire de distribution de la pluviométrie entre les mois de septembre et janvier. Durant la campagne 1974-1975, malgré la sécheresse automnale, la quantité totale de pluie reçue en fin de campagne agricole (522 mm) avait été proche de la moyenne pluviométrique de Meknès (530 mm). L'analyse fréquentielle<sup>2</sup> de la série chronologique disponible (1960-1995) montra qu'il y avait une forte probabilité (90%) que la pluviométrie totale en fin de campagne 1994-1995 soit supérieure à 445 mm, et qu'il y avait une chance sur deux (50%) qu'elle soit au moins égale à la moyenne. De ces deux scénarii (probabilités 90% et 50%), deux prédictions possibles de la récolte céréalière ont été fournies à la DPA de Meknès. Dans le scénario le plus probable (90%, pluviométrie supérieure à 445 mm), le rendement national de blé tendre pouvait être de 11 Qx/ha (22 Qx/ha à Meknès). Dans le scénario à probabilité 50% (pluviométrie supérieure à 530 mm), le rendement de blé tendre pouvait être de 14 Qx/ha à l'échelle nationale et de 27 Qx/ha dans la région de Meknès. Malheureusement, en fin de campagne aucun de ces scénarii n'a permis de prédire le résultat de la campagne agricole 1994-1995 qui a finalement été exceptionnelle et sans aucune similitude avec les campagnes passées. La sécheresse s'était prolongée sur les deux premiers tiers du cycle des céréales et le rendement national de blé tendre a finalement été de 4,8 Qx/ha et de 5,7 Qx/ha à Meknès (selon les chiffres officiels du Ministère de l'Agriculture), une situation jamais vécue de mémoire au Maroc.

---

<sup>2</sup> L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à établir les probabilités futures d'un processus donné (climatique, hydrologique, etc.), à partir des événements passés. Elle repose sur l'hypothèse de stationnarité ou d'homogénéité du processus étudié.



De ce résultat inattendu on comprit que l'hypothèse de stationnarité du climat, c'est à dire de conservation des fréquences pluviométriques historiques, n'était plus valable au Maroc car le climat avait changé depuis 1980. Il fallait donc inventer d'autres outils méthodologiques pour la prédiction des récoltes céréalières basés sur une approche agrométéorologique issue d'une étude fine du climat et de son interaction avec le comportement des céréales.

L'analyse préliminaire du climat indique, qu'en caractéristiques générales, le Maroc jouit d'un climat modéré, de type méditerranéen<sup>3</sup> à influence océanique, continentale et désertique, déterminé essentiellement par son extension en latitude (entre 21°N et 36°N), sa longue façade maritime, ses étendues sahariennes, et par ses chaînes de montagnes. La latitude détermine la température qui diminue, en raison de la courbure du globe et de l'inclinaison des rayons solaires par rapport au tropique, qui font que les régions au nord sont plus tempérées que celles au sud. La présence de la mer Méditerranée au nord sur une côte de 512 Km, de Saïdia au Cap Spartel, et de l'océan Atlantique à l'ouest sur une côte de 2.934 Km, de Cap Spartel à Lagouira, atténue les écarts de température et tempère les saisons. En été, les températures sont douces, similaires à celles de la montagne, et modérées en hiver, ce qui crée un environnement de faible amplitude thermique. En s'éloignant de la mer vers l'intérieur du pays, de l'ouest vers l'est, le climat devient continental, se rafraichissant en montant en altitude. Le désert du Sahara au sud du pays à climat aride, avec moins de 150 mm de précipitations annuelles, influence le climat à l'intérieur du pays par la remontée de l'air tropical, chaud et sec, du sud vers le nord et de l'est vers l'ouest. En montagne (sur les chaînes de l'Atlas et du Rif) les températures sont plus faibles, à cause de la baisse de l'altitude. En raison de ces faibles températures en montagne, les neiges précipitent en hiver et parfois au printemps.

L'anticyclone des Açores, basé sur l'océan Atlantique en face du Portugal et la dépression saharienne exercent des actions antagonistes sur le climat marocain. Le déplacement de l'anticyclone des Açores en hiver vers l'ouest ou le sud-ouest, laisse passer l'air froid et humide venant de l'Atlantique qui est accompagné de précipitations importantes et de neige en montagne. Au printemps et en été, l'anticyclone des Açores se déplace vers des latitudes plus élevées, rejetant les perturbations au nord du 45<sup>ème</sup> parallèle. On assiste alors à une remontée d'air tropical sec et à une baisse très nette des précipitations. D'autres anticyclones de moindre importance influencent le climat marocain, en particulier l'anticyclone Atlantique sud et Méditerranéen.

Les précipitations au Maroc suivent un gradient décroissant du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est, avec une amplification sur les reliefs du Rif et de l'Atlas, du fait de l'influence océanique et de l'effet de barrière des montagnes de l'Atlas. L'approvisionnement en eau du Maroc dépend entièrement des précipitations.

---

<sup>3</sup> Dans le climat méditerranéen, la saison des pluies se situe en automne et en hiver. Les étés sont chauds et secs; les températures hivernales sont douces.

Le pays n'est alimenté ni par des sources d'eau en dehors de ses frontières, comme c'est le cas pour l'Égypte, la Syrie et l'Irak, ni par des lacs comme le cas des Grands lacs en Afrique Centrale. Pour cette raison, tout déficit de précipitation se répercute sur les ressources hydriques et l'agriculture et, par voie de conséquence, sur l'économie du pays. Cette grande dépendance de l'économie nationale à l'égard de la pluie a été comprise très tôt par le Maréchal Louis Hubert Lyautey, à qui revient la fameuse déclaration: « *Au Maroc, gouverner c'est pleuvoir* ».

Le gradient d'humidité croissant du sud vers le nord, permet de distinguer six zones d'aridités relativement homogènes (Tableau 1) :

1. La zone désertique saharienne, à pluviométrie annuelle inférieure à 150 mm ;
2. La zone présaharienne, à pluviométrie annuelle comprise entre 151 et 250 mm ;
3. La zone aride, à pluviométrie annuelle comprise entre 251 et 350 mm ;
4. La zone semi-aride, à pluviométrie annuelle comprise entre 351 et 450 mm ;
5. La zone subhumide, à pluviométrie annuelle comprise entre 451 et 550 mm ;
6. La zone humide, à pluviométrie annuelle supérieure à 551 mm.

**Tableau 1 : Classement des provinces du Maroc par classes pluviométriques et niveau d'aridité. (Moyenne de 1988 à 2005).**

Pluviométrie annuelle (mm)	Niveau d'aridité	Provinces
<150	Désertique ou saharien	Dakhla, Lâayoune, Tantan, Errachidia, Ouarzazate, Bouarfa, Tiznit, Sidi Ifni
151-250	Pré Saharien	Midelt, Taroudante, Marrakech, Oujda, Agadir
251-350	Aride	Settat, Nador, Al Hoceima, Essaouira, Beni Mellal, Nouasser, Khouribga, Kasba Tadla
351-450	Semi-aride	El Jadida, Safi, Casablanca, Sidi Slimane
451-550	Subhumide	Rabat-Salé, Kenitra, Tounate, Meknès, Fès, Taza
> 551	Humide	Larache, Tétouan, Tanger, Chefchaouen, Ifrane

Les montagnes de l'Atlas longent le pays diagonalement selon l'axe nord-est à sud-ouest et dressent une barrière contre l'influence désertique dans les versants sud et l'influence atlantique dans le versant ouest. L'humidité océanique, stoppée par les chaînes montagneuses (le Rif, le Moyen Atlas et/ou le Haut Atlas), précipite sous forme de pluie en automne et de neige ou de pluie, en fonction de la rigueur des températures hivernales. De ce fait, les montagnes de l'Atlas sont assimilées au château d'eau du pays. L'altitude peut atteindre 4.165 mètres au point culminant (Jbel Toubkal) du pays. Au-delà de cette barrière naturelle, à l'est et au sud du pays, le climat est par conséquent aride et présaharien.

La pluie et la fonte des neiges dans des chaînes montagneuses constituent la source des principaux fleuves du pays qui se jettent ensuite dans l'océan Atlantique pour la plupart (Loukkos, Bouregreg, Sebou, Oum Rbia, Souss), dans la mer méditerranée (Moulouya) ou dans le désert (Ziz et Draâ). Le Moyen-Atlas, massif montagneux allongé sur quelques 350 km, du sud-ouest au nord-est, est la montagne nord-africaine la plus riche en zones humides, notamment en lacs naturels, en rivières et sources fraîches.

Étant donné sa configuration géographique, l'agriculture au Maroc se trouve confinée entre la montagne et la mer et étroitement dépendante des facteurs climatiques. La disponibilité de l'eau, qui est le facteur vital pour l'agriculture, se fait de plus en plus rare, à cause de la pression conjuguée de la demande urbaine, industrielle, touristique et du changement climatique. La régression des précipitations, l'augmentation des températures, et l'intensification des phénomènes extrêmes (sécheresse, coup de chaleur, gelée, inondation, etc.), sont parmi les manifestations attendues du changement climatique (Gommes *et al.*, 2009 ; SEEE, 2010).

En raison de son poids économique (15 à 20% du PIB, et 40% d'emplois), toute variation temporelle ou saisonnière du climat se répercute immédiatement sur la production agricole du pays, surtout en ce qui concerne les cultures à la base de la sécurité alimentaire comme les céréales. La différence de pluviométrie enregistrée entre les campagnes successives de 1994-1995 et de 1995-1996, dans un rapport de 1 à 3, s'est répercutée sur le rendement des céréales d'automne dans un rapport de 1 à 3,61 et sur la production dans un rapport de 1 à 5,74. La pluviométrie cumulée le long du cycle (septembre à mai) de la campagne 1994-1995 a été de 198 mm et celle de la campagne 1995-1996 a été de 591 mm, alors que les rendements ont été respectivement de 4,79 et 17,27 Qx/ha et les productions de 17,27 et 98,00 millions de quintaux. La récolte imprévue de 1994-1995 aurait été un désastre sur l'économie du pays si la campagne suivante n'avait pas été productive.

Les importations des céréales d'automne sont chroniques depuis le début des années 1980. Elles représentent les factures les plus lourdes parmi les importations totales de produits agricoles et alimentaires. Les importations sont en moyenne de 26 millions de quintaux sur la période 1980-2011 (Source : ONICL, 2012). Elles représentent, en moyenne sur cette période, près de la moitié (48,7%) de la production nationale. La très grande majorité des importations vient du blé tendre (77%), suivi du blé dur (12%) et de l'orge (11%). Les importations sont en constante augmentation, surtout pour les blés, depuis le début des années 1990. Cette part des importations est très variable selon les années, pouvant varier de 10% (en 1994-1995, après la bonne récolte de 1993-1994) à 244% (en 2000-2001, après la sécheresse de 1999-2000). Toutefois, même après une année de récolte record, comme en 2008-2009 (102 millions quintaux), les importations sont restées significatives (25,6 millions Qx en 2009-2010, soit 25% de la production de 2008-2009). Le total des importations et de la production, qui peut représenter les besoins en consommation (humaine et animale), en faisant abstraction des stocks, augmente en dents de scie, en moyenne de 1,6 millions de quintaux par année depuis le début des années 1990.

Cette dépendance élevée des importations cérésières expose le pays aux risques de pénurie et de hausse des prix des denrées alimentaires sur le marché mondial, qui sont la résultante de la variation de la production mondiale, des embargos sur les exportations et de la spéculation.

Les 5,3 millions d'hectares d'agriculture cérésière ont été, par commodité, subdivisés par le ministère de l'agriculture en six classes : *Favorable*, *Intermédiaire*, *Défavorable Sud*, *Défavorable Orientale*, *Montagne* et *Saharienne*. La zone *Favorable* se situe au nord du pays, limitée au sud par l'axe Kénitra-Taza. La zone *Intermédiaire* se situe au centre du pays, limitée au sud par l'axe Casablanca-Benslimane. La zone *Défavorable Sud* est située au sud de l'axe Casablanca-Benslimane et limitée plus au sud par la province d'Agadir. La zone *Saharienne* se situe au sud d'Agadir, et celle *Défavorable Orientale* se situe à l'extrême est du pays. La zone de montagne est localisée en majorité au sein des chaînes de l'Atlas. Les zones *Favorable*, *Intermédiaire* et *Défavorable Sud* produisent plus de trois quarts des céréales d'automne, sur trois quarts de la superficie totale cérésière. La zone *Montagne* contribue à 12% de la production nationale et s'étend sur 10% de la superficie cérésière. Les rendements (moyenne de 1991 à 2011, Source : DSS) sont plus élevés dans les zones *Favorable* (13,9 Qx/ha) et *Montagne* (14,1 Qx/ha) que dans les zones, *Intermédiaire* (11,9 Qx/ha) ou *Défavorable Sud* (7,6 Qx/ha).

Les rendements réalisés à l'échelle nationale ne représentent que la moitié des rendements obtenus en stations expérimentales de l'INRA (Jlibene, 2009), indiquant une marge importante d'amélioration des rendements cérésières au Maroc. Ils ont évolué lentement au cours des années. À titre d'exemple, le blé tendre est passé de 7 Qx/ha durant la décennie 40, à 9 Qx/ha durant la décennie 50 puis stagné autour de ce chiffre durant la décennie 60 en dépit de la mise en œuvre par l'état marocain des grandes opérations de développement agricole telles que les opérations « *labour* », « *engrais* » et « *semence* » (Jlibene, 2009). Durant les trois décennies suivantes, la progression du rendement national a été plus significative, passant de 9 Qx/ha à 14 Qx/ha, malgré la conjoncture défavorable marquée par une augmentation de l'aridité et d'épisodes de sécheresse. Cependant, cette progression reste insuffisante pour assurer les besoins de la population qui s'accroît de façon exponentielle.

La sécheresse peut avoir lieu au début du cycle, au milieu ou à la fin ou en combinaison de ces trois, avec en plus la variation de température, et de stress biotiques imposés par les parasites des céréales. Les variations de la pluviométrie, en quantité et en distribution au sein du cycle, et de la température et des parasites, engendrent une multitude de situations agro-climatiques que les chercheurs ont eu du mal à modéliser.

Les études sur le comportement des céréales vis-à-vis du climat au Maroc restent fragmentaires et manquent de données précises sur le suivi rigoureux au cours du cycle à la fois des paramètres climatiques et culturaux. Le rendement grain est souvent la variable étudiée, en relation avec la pluviométrie totale comme élément climatique important. L'influence du climat sur la croissance et la production cérésière est une réalité, connue des marocains, devenue presque une évidence dont on ne recherche pas les mécanismes.

Les agriculteurs attendent les premières pluies d'automne pour préparer les sols, sèment entre novembre et décembre juste avant les pluies hivernales et entretiennent les cultures du printemps à la récolte. C'est une transmission qui est restée stable au cours des siècles. Les recherches ont donc porté sur les méthodes d'améliorer les rendements, plutôt que de comprendre leur élaboration en fonction du climat. Sans l'étude de l'interaction entre la culture et le climat, il est difficile de prédire les récoltes.

La prédiction<sup>4</sup> des récoltes permet de se préparer aux conséquences d'une pénurie agricole, par des actions de réduction de la vulnérabilité face aux aléas climatiques. La prédiction des récoltes est donc un outil de grand intérêt pour la prise de décision au Maroc. Elle permet de planifier à l'avance les aides aux agriculteurs, les importations céréalières et permet aussi de quantifier les impacts des sécheresses lorsqu'elles surviennent en prédiction d'indemnisations (assurance agricole). La prédiction des récoltes est passée du stade de la recherche appliquée au stade opérationnel grâce aux travaux de recherche réalisés à l'INRA, en collaboration avec des institutions nationales et internationales.

D'un point de vue pratique, la prédiction des récoltes peut être réalisée à différentes échelles spatiales, depuis la parcelle jusqu'au pays tout entier. L'approche à utiliser est fonction de l'échelle à laquelle se fera la prédiction, des informations de base disponibles et de la précision recherchée. D'un point de vue scientifique, les approches peuvent être regroupées en trois grands groupes selon le degré de conceptualisation (Gommes *et al.*, 2010) :

- L'approche dite discrétionnaire (expert), basée soit sur l'expérience ou les opinions du prévisionniste ou des agriculteurs lorsque les facteurs économiques entrent en jeu. C'est notamment le cas de l'approche Delphi de prédiction des récoltes (Moricochi *et al.*, 1995) ;
- L'approche dite d'extrapolation, basée soit sur des analyses statistiques très variées (régression simple ou multiple, analyse en composantes principales, réseaux de neurones, etc.) entre la production agricole et les facteurs environnementaux, de production et les facteurs économiques (climat, fertilisants, prix, etc.), soit sur des modèles semi-empiriques ou de simulation<sup>5</sup>. Cette approche est souvent utilisée en agrométéorologie opérationnelle ;
- L'approche dite intermédiaire, qui est une combinaison de l'approche « expert » et l'approche d'extrapolation.

Les approches empiriques se basent le plus souvent sur des relations statistiques entre le climat et la végétation, qu'elle soit naturelle ou cultivée. Ces relations peuvent aussi être étudiées, à partir de paramètres climatiques directement mesurés, par l'approche statistique paramétrique ou d'appréciations subjectives des saisons par l'expert agronome.

---

<sup>4</sup> La prédiction est la science qui permet de prévoir les rendements sur la base de modèles mathématiques.

<sup>5</sup> Les modèles agrométéorologiques de simulation de la croissance et du développement des plantes cultivées permettent de comprendre la réponse des plantes aux variations de l'environnement.

Les relations qui utilisent l'approche empirique ne sont valables que pour des contextes similaires à ceux pour lesquelles elles ont été élaborées. Toutefois, les approches statistiques ont un grand intérêt d'un point de vue pratique car elles permettent de pouvoir rapidement reconnaître les principaux éléments climatiques qui agissent sur les cultures. Cependant, elles ne sont valables que lorsque les processus sont stationnaires dans le temps, c'est-à-dire lorsque les phénomènes climatiques restent inchangés sur la période considérée. Au Maroc, on a observé depuis le début des années 1980, un changement du climat conduisant à des sécheresses plus fréquentes et à une augmentation de l'aridité. Les approches statistiques doivent donc s'appliquer sur les séries climatiques postérieures aux années 1980.

La prédiction agrométéorologique des récoltes agricoles à l'échelle de pays ou de régions, qui est une branche de l'agrométéorologie opérationnelle, se réfère à deux grandes écoles de pensée : l'école de l'approche de modélisation de l'interaction des plantes cultivées avec l'environnement (bilan en eau, processus physiologiques, absorption de l'énergie lumineuse, etc.) et l'école que l'on peut qualifier de « pragmatique », qui s'appuie sur des méthodes utilisant des modèles statistiques liant la production agricole à des facteurs agronomiques, climatiques ou à des indices<sup>6</sup> environnementaux ou économiques.

L'approche pragmatique est adoptée par la FAO pour la prédiction des récoltes, dans le monde, en raison de son efficacité et de sa simplicité de mise en œuvre (Gommes, 2001). L'approche de prédiction agrométéorologique des récoltes agricoles, qui est préconisée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (WMO, 2010), est une combinaison de modèles de simulation et de modèles statistiques. De la même manière, la méthodologie utilisée par la FAO pour réaliser des estimations de rendements agricoles repose sur des régressions linéaires entre les statistiques officielles et les sorties du modèle AgroMetShell<sup>7</sup> de bilan en eau des sols cultivés. La régression linéaire des sorties des modèles avec les statistiques agricoles permet de prendre en compte le progrès technologique ainsi que les conditions réelles de culture chez les agriculteurs, de résoudre les problèmes d'échelle spatiale<sup>8</sup> et de corriger les erreurs de simulation intrinsèques à tous les modèles.

L'approche pragmatique a également été utilisée pour proposer des systèmes indiciaires pour la gestion de l'assurance agricole au Maroc pour les céréales (Skees *et al.*, 2001 ; Stoppa et Hess, 2003) et la betterave à sucre (Koch, 2011).

<sup>6</sup> Les indices sont utiles pour la modélisation car ils constituent des synthèses ou combinaisons d'un ensemble de paramètres de l'environnement (Pluie, température, humidité, teneur en eau des sols, etc.) permettant d'expliquer le comportement des plantes. Un indice est donc une simplification pratique de l'environnement des plantes.

<sup>7</sup> AgroMetShell est un outil de suivi et de prévision des cultures développé par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) (<ftp://ext-ftp.fao.org/sd/reserved/agromet/AgroMetShell/>)

<sup>8</sup> Le problème majeur des modèles agrométéorologiques de simulation est la remontée d'échelle spatiale, de la parcelle expérimentale vers la région administrative. La grande partie des variables utilisées en modélisation, dans des conditions contrôlées, sont difficilement disponibles ou mesurables aux échelles régionales.

La prédiction opérationnelle du rendement des céréales a été tentée pour la première fois au Maroc en 1994 (Bazza et Tayaa, 1998), à l'échelle de la province de Settat, dans le cadre du projet « AGRIMA » (AGRICulture Maroc), lancé conjointement par le Ministère de l'agriculture et le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS), avec l'appui du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). Dans le cadre de ce projet, des modèles statistiques de prédiction des rendements des céréales sur la base de l'évapotranspiration réelle (ETR) ont été proposés, à l'échelle de la région de la Chaouia (Settat). Parallèlement, l'utilisation d'un modèle de simulation a été expérimentée pour simuler l'ETR à l'échelle régionale afin de l'utiliser comme prédicteur. Cependant, cette expérience n'a été réalisée que sur une seule année et n'a pas débouché sur un système de prédiction. Sur le plan de la recherche, de nombreux travaux, que l'on ne peut pas tous citer, font référence à l'utilisation des modèles de simulation au Maroc pour : la recherche de caractères de sélection variétale des blés (Confalonieri *et al.*, 2012), la simulation du rendement en grain des céréales à l'échelle des parcelles expérimentales (El Mourid, 1991 ; Bennani *et al.*, 1993), l'analyse des risques climatiques en fonction du choix des variétés d'orge et des dates de semis (Hanchane, 1998 et 2009), pour l'aide à l'amélioration de la productivité du blé par la gestion du génotype et de l'irrigation (Debaeke et Aboudrare, 2004), la gestion de l'irrigation du blé (Hadria *et al.*, 2006) et de la betterave à sucre (Taky, 2008), etc.

Actuellement, les deux seules institutions publiques qui réalisent de façon opérationnelle la prédiction agrométéorologique des rendements céréaliers, à l'échelle nationale sont d'un côté le consortium composé de l'INRA, la DSS et la DMN et de l'autre Bank Al Maghrib (<http://www.bkam.ma/>). C'est l'approche pragmatique qui est adoptée par ces institutions, pour réaliser ces prédictions, mais avec des méthodologies et des outils qui diffèrent.

L'objectif du présent document est de faire la synthèse des travaux sur la prédiction agrométéorologique des rendements céréaliers au Maroc, aussi bien sur les approches élaborées que sur les résultats obtenus par ses auteurs.

## II. APPROCHES D'ANALYSE

*Le développement de l'approche combinée de prédiction des rendements céréaliers, a nécessité (1) la collecte et la gestion d'une base de données météorologiques, biologiques, agricoles, géographiques, satellitaires et administratives, et (2) la recherche d'indicateurs agro-climatiques corrélés statistiquement aux rendements. Excepté les données satellitaires qui proviennent de nos partenaires européens, les autres données sont disponibles au Maroc, à l'état fragmentaire et brut, nécessitant un traitement. La recherche d'indicateurs a tout d'abord porté sur ceux dérivés de la pluviométrie et de la température, indépendamment des cultures céréalières, comme les statistiques portant sur les moyennes et les variations inter régionales, inter et intra-annuelles, ou encore les probabilités d'occurrence de la pluviométrie. A l'instar des analyses climatiques, celles de la production céréalière ont été également réalisées indépendamment du climat. De la même manière, les moyennes et variations régionales et interannuelles ont été calculées. Il s'est avéré que ces analyses séparées restaient descriptives, suggérant la recherche et la validation d'autres indicateurs de prédiction des rendements céréaliers plus performants qui intègrent à la fois le climat et la culture. Les possibilités d'utilisation d'indicateurs mieux corrélés aux rendements céréaliers ont été explorées, comme les indices du bilan hydrique ou l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) issu des images satellitaires. Le NDVI provient d'images livrées sous forme « raster » (pixel) sans distinction des différentes occupations de terres. Pour cela, une carte d'occupation des terres agricoles a été spécifiquement réalisée pour le Maroc, à partir de différentes cartes disponibles à l'échelle internationale, et améliorée en y ajoutant une information supplémentaire indiquant la proportion de terres agricoles dans chaque pixel. Le développement des outils informatiques, comme les systèmes d'information géographique et la récente disponibilité en images satellitaires à meilleure résolution spatiale et à faible coût ont ouvert une nouvelle voie pour l'analyse des interactions entre le climat et les cultures en général et la prédiction des rendements céréaliers en particulier.*

### 1. BASES DE DONNÉES UTILISÉES

L'agrométéorologie nécessite la collecte de données météorologiques, pédologiques, hydrologiques, biologiques, culturelles, satellitaires, géographiques, etc., qui soient de qualité et de précision satisfaisantes et en quantité suffisante, de manière à déceler les interrelations entre l'environnement agricole et le comportement des cultures. Ces différentes données doivent se chevaucher, spatialement et temporellement, de manière à pouvoir être analysées de façon croisée. La constitution, l'archivage, la mise à jour et la gestion des bases de données, y compris le contrôle de la qualité, font donc partie du travail en amont de l'agrométéorologue<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> La collecte et la gestion des bases de données agrométéorologiques (climatiques, images satellitaires, géographiques, pédologiques, etc.) a besoin d'une gouvernance nationale à même de permettre un essor de l'agrométéorologie opérationnelle.



Les données utilisées dans ce document sont :

- Les données d'observation météorologique (précipitations, ensoleillement / rayonnement solaire, température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent) ;
- Les images NDVI, provenant de l'Institut flamand pour la recherche technologique (VITO, Belgique) ;
- Les données de l'historique de l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique<sup>10</sup> (Hurrell, 1995) ;
- Les limites administratives en format vecteur (SIG) du Maroc : pays, zones agro-écologiques et provinces ;
- La carte d'occupation des terres du Maroc « GICropV2 » réalisée en collaboration avec le VITO en 2012 ;
- Les données de statistiques agricoles, comprenant l'historique des rendements et superficies des céréales pour chaque province.

Ces différentes données sont archivées dans une base de données entretenue au niveau du Département de l'Environnement et des Ressources Naturelles de l'INRA.

---

### 1.1. DONNÉES CLIMATIQUES

Les bases de données climatiques utilisées dans ce document proviennent de plusieurs sources :

- Les bases de données historiques de 35 stations synoptiques, disponibles auprès du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM). Ces stations font partie du total des 44 stations synoptiques de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Ces bases contiennent les données de pluviométrie (1987 à 2011) et de températures maximum et minimum décennales (1999 à 2009). Ces 35 stations sont situées chacune dans une province du Maroc. Pour cette raison, leurs noms sont confondus avec les noms des provinces dans lesquelles elles se situent. Les stations synoptiques de la DMN fonctionnent pour la plupart 24h/24h et produisent des observations horaires des principales variables météorologiques : pression atmosphérique, température, humidité relative, force et direction du vent, nébulosité, quantité et intensité des précipitations, durée d'insolation et rayonnement. Le maillage de ce réseau est relativement faible et couvre davantage les plaines côtières que les régions montagneuses, orientales ou sahariennes ;

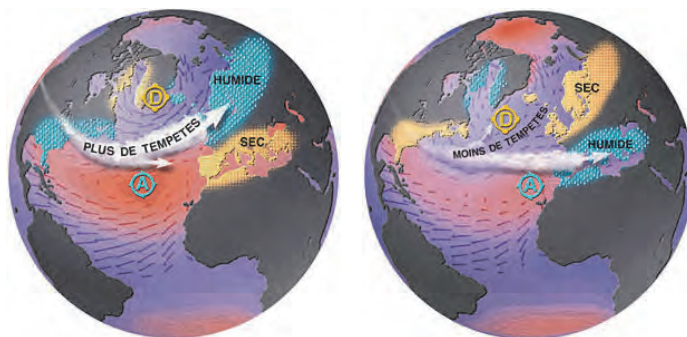
---

<sup>10</sup> L'Oscillation Nord Atlantique est généralement décrite à l'aide de l'indice NAO. Cet indice est calculé à partir de la différence de pression au niveau de la mer, entre deux stations météorologiques situées près des centres respectifs de la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores.

- Les données historiques journalières à très long terme de pluviométrie et de température de certaines stations synoptiques, collectées auprès de la DMN. Certaines de ces données remontent au début du siècle ;
- Les données du Réseau Historique et Global de Climatologie (GHCN) <http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/> (Peterson et Vose, 1997). Ce réseau permet de collecter une base de données journalières de température, précipitations et pression de l'air. Il est géré par le Centre de Données Climatiques Nationales de l'Université d'Arizona (USA) et le Carbon Dioxide Information Analysis Center (USA). Les données sont collectées en continu à partir d'un grand nombre de stations fixes à la surface de la terre (environ 6.000 stations de température, 7.500 stations pluviométriques et 2.000 stations de pression) ;
- Les données journalières de pluviométrie, de températures maximum et minimum, de vitesse du vent et d'humidité relative provenant du site [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net) qui reprend les données du Réseau Historique et Global de Climatologie ;
- La base de données climatiques « FAOCLIM 2.0 » de la FAO ([http://www.fao.org/nr/climpag/pub/EN1102\\_en.asp](http://www.fao.org/nr/climpag/pub/EN1102_en.asp) ; FAO, 2001). Elle contient les données climatiques journalières mondiales, y compris pour le Maroc, sur la période allant de 1960 à 1990 ;
- Les données météorologiques décennales sur 70 ans de la Commune Rurale d'Arbaoua, gracieusement fournies par l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole du Loukkos, dans le cadre du Projet de Soutien au Développement Agricole dans les ORMVA (PSDA) (Jlibene et Chafai, 2002). Ces données ont été utilisées pour la délimitation des périodes d'intervention culturale dans la région du Loukkos selon la méthode FAO ;
- La base de données climatiques Worldclim ([www.worldclim.org/](http://www.worldclim.org/) ; Hijmans *et al.*, 2005). Cette base contient, entre autres, les données de précipitations mensuelles, de températures moyennes, minimales et maximales (pour les normales sur la période 1950-2000) interpolées à une résolution spatiale de 30 secondes d'arc ( $\approx 1$  km) ;
- Les données météorologiques des stations météorologiques automatiques de l'INRA, et particulièrement celle du Centre Régional de la Recherche Agronomique de Meknès (en service du 23 novembre 1995 au 23 octobre 2000). Cette station permettait de collecter de manière automatique les données horaires de pluviométrie, température, humidité relative, vitesse du vent, direction du vent, point de rosée et rayonnement solaire.

### 1.2. INDICE DE L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE

L'historique de l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique, ou Indice ONA, est disponible en téléchargement sur le site Web de l'University of East Anglia, au Royaume Uni (<http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/datapages/naoi.htm>). L'indice est disponible pour tous les mois de l'année, sans discontinuité à partir de l'année 1821, ce qui permet de reconstituer des événements climatiques passés. Il a été utilisé pour montrer l'influence de l'ONA sur le régime des précipitations au Maroc. L'indice de l'ONA relie l'intensité de la dépression d'Islande à celle de l'anticyclone des Açores. Ses fluctuations ont des conséquences directes sur le climat du Maroc (Figure 1).



**Figure 1 : Phases positive (à gauche) et négative (à droite) de l'Oscillation Nord Atlantique.**

*En phase positive, la sécheresse règne en Méditerranée alors que les tempêtes sont plus nombreuses en Europe. A l'inverse, en phase négative, la Méditerranée bénéficie d'un temps humide alors que le temps en Europe est moins humide.*

*(Source : <http://www.ideo.columbia.edu/res/pi/NAO/>).*

### 1.3. INDICE DE VÉGÉTATION ISSU DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE

Le développement de l'imagerie satellitaire a permis de développer des indices agrométéorologiques, à partir de la réflectance spectrale de la végétation. Ces indices peuvent être utilisés pour la prédiction des récoltes agricoles, soit directement comme facteurs de prédiction dans des équations de régression (Kogan, 2000 ; Maselli *et al.*, 2000; Balaghi *et al.*, 2008), soit indirectement pour estimer des variables biophysiques (LAI<sup>11</sup>, fAPAR<sup>12</sup>, etc.) d'entrée de modèles de simulation de la croissance des plantes cultivées (Duchemin *et al.*, 2006 ; De Wit *et al.*, 2012).

<sup>11</sup> L'indice de surface foliaire (du terme anglais Leaf Area Index ou LAI) est la surface projetée des feuilles du peuplement par unité de surface au sol (Watson, 1947).

Il a été démontré que la performance des modèles peut être améliorée lorsque les données de télédétection sont combinées dans des modèles de culture (Boegh *et al.* 2004; Bouman, 1994 ; Doraiswamy et Cook, 1995 ; Maas, 1988). Cependant, l'un des principaux obstacles à l'utilisation des indices issus de la télédétection spatiale dans les modèles de simulation réside dans la disparité d'échelle de l'information géographique entre les processus physiologiques (la croissance des cultures sur de petites parcelles) et les images satellitaires utilisées de façon opérationnelle (et économique) qui ne sont disponibles que sur de grandes surfaces lorsqu'elles sont acquises à une fréquence élevée nécessaire pour un bon suivi agrométéorologique (Balaghi *et al.*, 2010).

L'indice de végétation par différence normalisée (en anglais « Normalized Difference Vegetation Index » ou NDVI), tel que dérivé du capteur NOAA-AVHRR depuis 1980, SPOT-VEGETATION depuis 1998 ou MODIS<sup>13</sup> depuis 2001 est l'un des indices les plus utilisés pour la mesure de vitalité de la végétation. Le NDVI a été largement utilisé pour le suivi de la végétation et la prédiction des rendements des cultures dans le monde. Il se calcule comme suit :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Où NIR et RED sont respectivement les mesures du rayonnement réfléchi dans le proche infrarouge et le rouge, respectivement.

Le NDVI augmente progressivement avec la densité végétale d'une valeur de 0,15 (valeur moyenne) pour les sols nus à 0,75 (valeur moyenne) pour les couverts denses. L'un des principaux intérêts du NDVI est son caractère intégrateur des facteurs environnementaux, en ce sens qu'il reflète l'état de stress environnemental global de la végétation, au-delà de ce que peuvent exprimer des variables climatiques séparément ou des modèles de simulation (Balaghi *et al.*, 2010). Par exemple, le stress hydrique résultant d'un déficit de bilan hydrique prolongé, se traduit par des valeurs de NDVI faibles. La diminution de NDVI peut aussi être causée par d'autres stress abiotiques (carence en éléments fertilisants) ou biotiques (ravageurs et maladies).

Les valeurs de NDVI sont livrées par décade (10 jours) pour les images NOAA-AVHRR (à partir de 1982) et SPOT-VEGETATION (à partir de 1999) et, par quinzaine pour les images MODIS (à partir de 2001). Ces images ont été prétraitées (corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques) par le VITO.

---

<sup>12</sup> fAPAR est la fraction de rayonnement solaire absorbée par les plantes dans le domaine spectral permettant la photosynthèse.

<sup>13</sup> Capteur « Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer » (MODIS), à bord des satellites *Terra* et *Aqua* de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), utilisé pour le suivi de la végétation (NDVI et EVI), à 250 mètres de résolution spatiale.

#### 1.4. LIMITES ADMINISTRATIVES DU MAROC EN FORMAT SIG

En raison de la disponibilité des statistiques agricoles à l'échelle des provinces, la plus petite unité territoriale considérée est la province administrative, selon le découpage en vigueur. Les polygones délimitant les provinces sont numérisés en format SIG. Ceux des communes sont aussi numérisés et pourront être utilisés comme unité de prédiction lorsque les statistiques agricoles par commune seront disponibles.

#### 1.5. CARTES D'OCCUPATION DES TERRES

Différentes cartes d'occupation des terres, dérivées de la télédétection spatiale, sont disponibles en libre utilisation, au niveau international, avec des qualités et des degrés de précision variables, en particulier : Global Land Cover-2000 (GLC2000 version 5.0, Mayaux *et al.*, 2004), CORINE-2000 et GlobCover (Tchente *et al.*, 2011 ; Neumann *et al.*, 2007). Le programme européen CORINE Land Cover (CORINE-2000) est un inventaire, dans les 29 États de l'Union Européenne, de l'occupation des terres à partir de l'imagerie satellitaire. Elle ne couvre qu'une très faible partie du Maroc. La carte d'occupation des terres CORINE-2000, qui a une précision géométrique supérieure à 100 mètres (la résolution spatiale des satellites utilisés pour l'élaboration de cette carte est inférieure à 30 mètres), a été mise à jour en 2006 dans le cadre de l'initiative *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) (<http://sia.eionet.europa.eu/CLC2000>). L'initiative GlobCover de l'Agence Spatiale Européenne vise à produire une carte globale d'occupation des terres, en utilisant les données à 300 mètres de résolution spatiale du capteur MERIS embarqué à bord de la plateforme satellitaire ENVISAT (<http://postel.mediasfrance.org/fr/PROJETS/Pre-operationnels-GMES/GLOBCOVER/>). La carte digitale d'occupation des terres GlobCover, élaborée en 2008, est l'unique référence à moyenne résolution qui intègre le Maroc dans sa zone de couverture. Une carte élaborée pour le continent africain par le « Southern African Development Community (SADC)» (<http://www.sadc.int/>) est aussi disponible en libre utilisation.

Pour développer une carte des terres agricoles de référence spécifique au Maroc, ces différentes cartes (GlobCover V2.2, CORINE-2000, AfriCover<sup>14</sup> et SADC) ont été groupées en une seule carte pour couvrir l'ensemble du territoire agricole puis améliorées par la superposition d'une autre carte développée par l'USGS qui tient compte de l'intensité d'utilisation des terres agricoles, permettant de réduire la variabilité intra pixel.

<sup>14</sup> Le but du projet Africover est d'établir une base de données numérique géo-référencée sur la couverture terrestre et un référentiel géographique pour l'ensemble de l'Afrique, y compris : Géodésique référentiel, toponymie, routes, hydrographie. La base de données polyvalente Africover pour les ressources environnementales est produite à une échelle 1:200.000 (1:100.000 pour les petits pays et les zones spécifiques). [www.africover.org/](http://www.africover.org/).

Les zones agricoles de cette nouvelle carte, appelée GICropV2, sont extraites pour servir de masque aux images NDVI. Ainsi, seules les valeurs de NDVI des zones agricoles sont conservées pour servir à l'établissement des relations entre le NDVI et les rendements céréaliers.

## 1.6. STATISTIQUES AGRICOLES

Les données de rendement et de superficie de chacune des trois céréales d'automne<sup>15</sup>, blé tendre (*Triticum aestivum*), blé dur (*Triticum durum*) et orge (*Hordeum Vulgare*), ont été gracieusement fournies par la Direction de la Stratégie et des Statistiques<sup>16</sup> (DSS). Elles sont disponibles pour 40 provinces du pays et pour les campagnes agricoles allant de 1978-1979 à 2010-2011. La production par province est obtenue en multipliant le rendement par la superficie.

L'estimation des superficies céréalières au Maroc est réalisée chaque année par la DSS à partir d'un échantillonnage de terrain dit « aréolaire » sur 3.000 unités secondaires (19 millions d'hectares) de sondage, dites aussi segments, entre le 10 février et le 30 mars. Depuis 2008, la DSS a renouvelé cet échantillon, en y intégrant les techniques modernes de la géomatique (télédétection et système d'information géographique) qui permettent une amélioration de la précision des estimateurs. Une application SIG a été spécifiquement développée à cet effet par la DSS permettant d'automatiser toutes les étapes du développement de l'échantillonnage.

Sur les mêmes segments, le rendement est estimé en utilisant la méthode classique directe de récolte de parcelles représentatives ré-échantillonnées au sein des segments. La production céréalière pour chaque segment est le produit de sa superficie par son rendement. Les données de production et de superficie sont ensuite agrégées par province.

La DSS réalise le suivi de la végétation, l'estimation des superficies et des rendements céréaliers en 3 phases, au cours de la campagne agricole :

- **Phase 1 :** « *Enquête de suivi de la récolte* », en février, pour évaluer les phases de croissances des cultures et l'état des semis ;
- **Phase 2 :** « *Enquête d'occupation des sols* », de février à juin, pour estimer les superficies céréalières ;
- **Phase 3 :** « *Enquête production prévisionnelle* », en avril (1 à 2 mois avant la récolte), pour estimer la production des trois principales céréales : blé tendre, blé dur et orge.

<sup>15</sup> Ces céréales sont appelées céréales d'automne parce qu'elles sont semées durant cette saison, contrairement aux céréales de printemps comme le maïs ou le sorgho.

<sup>16</sup> Anciennement, nommée Direction de la Programmation et des Affaires Économiques (DPAE).

## 2. MÉTHODES ET ANALYSES

### 2.1. TRAITEMENT EXPLORATOIRE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES

En agrométéorologie opérationnelle, les premières étapes de modélisation consistent en le calcul des moyennes et de la variation des variables agro-climatiques (pluie, température, rendement, etc.). Des statistiques simples comme la moyenne, le minimum, le maximum, ou l'écart-type, d'une série de campagnes agricoles ou d'une série de stations météorologiques, ont été calculées à partir des données brutes journalières ou décadaires disponibles par campagne agricole et par station météorologique. Pour la température, la moyenne journalière est obtenue à partir des températures minimale et maximale. La moyenne des températures journalières sur un mois donne la température moyenne du mois. La moyenne des températures moyennes de 12 mois de l'année donne la température moyenne annuelle. La moyenne des températures annuelles sur une longue période donne la moyenne des températures à long terme. L'amplitude thermique est égale à l'écart de température entre le minimum et le maximum de chaque moyenne.

Pour la pluviométrie, la moyenne journalière est égale au cumul des pluies reçues durant la journée ; les moyennes décadaire, mensuelle ou annuelle sont égales au cumul de 10 jours, un mois ou une année de pluviométrie. La pluviométrie décadaire ou journalière a été accumulée pour faciliter l'interprétation des courbes graphiques, car la représentation graphique de la pluviométrie répartie dans le temps (au pas d'une journée ou d'une décade<sup>17</sup>) de plusieurs stations météorologiques ou plusieurs campagnes agricoles, est apparemment si chaotique qu'il est difficile d'en tirer une interprétation pratique. Un exemple de cette représentation est montré dans la Figure 2. Il est donc nécessaire de procéder à un traitement préalable des données pour en faciliter l'interprétation.

---

<sup>17</sup> Toutes les analyses ont été réalisées au pas de temps décadaire, car les données pluviométriques provinciales et satellitaires sont disponibles à cette échelle de temps commune. Cette échelle est généralement suffisante en prédiction agrométéorologique opérationnelle des productions agricoles.

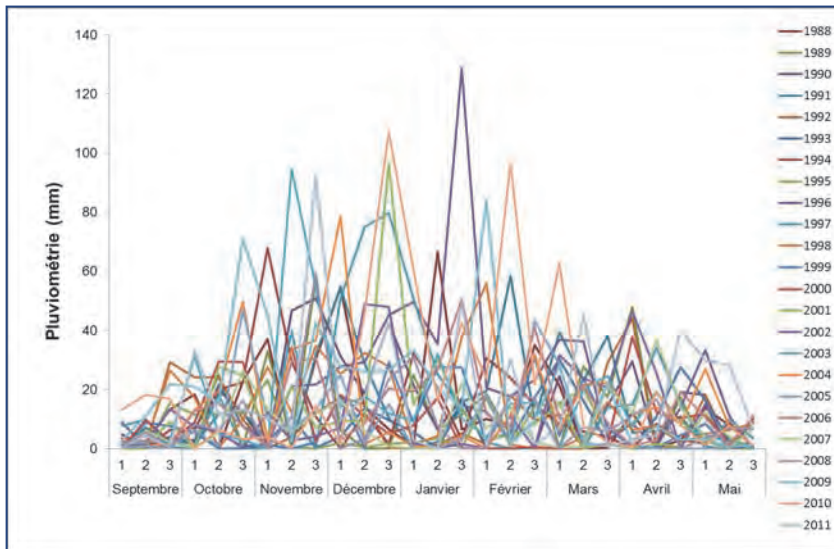


Figure 2 : Pluviométrie décadaire nationale durant la campagne agricole, de 1988 à 2011.

Le premier traitement exploratoire des données pluviométriques consiste ainsi en la représentation graphique simple des valeurs moyennes de ces données sous forme de climatogrammes. Les climatogrammes indiquent, pour chaque mois ou décade de la saison agricole, les hauteurs de précipitations moyennes (ou médianes).

Le deuxième traitement qui consiste à cumuler la pluviométrie sur les décades tout au long de la saison agricole donne une courbe lisible, interprétable et même modélisable. La méthode du cumul permet de :

- **Représenter** sur une même courbe aussi bien la quantité annuelle que sa distribution intra-annuelle ;
- **Modéliser** la forme de la courbe de cumul pluviométrique, par des équations linéaires, logarithmique ou sigmoïdes ;
- **Repérer et délimiter** dans le temps les périodes de sécheresse, à partir des segments plats horizontaux visibles sur la courbe de cumul pluviométrique ;
- **Comparer** des campagnes agricoles et des régions sur base de la quantité totale de pluie reçue ainsi que sur celle de la distribution saisonnière.



## 2.2. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE LA PLUVIOMÉTRIE

L'analyse fréquentielle se justifie lorsque la variable à traiter suit une distribution non Gaussienne (Nicholson, 1986), comme c'est le cas pour la pluviométrie mensuelle ou décadaire dans les régions semi-arides. Cette méthode d'analyse des fréquences (ou probabilités) des précipitations a été utilisée par Gibbs et Maher (1967) pour étudier la sécheresse en Australie. Dans cette méthode, les valeurs dans la série des données pluviométriques sont ordonnées (rangées dans l'ordre croissant). Ensuite, les limites de chaque décile de la distribution sont calculées à partir d'une courbe de fréquence ou un tableau de données. Le premier décile est égal à la pluviométrie en dessous de laquelle  $1/10^{\text{ème}}$  des données de la série lui sont inférieures. Le deuxième décile est égal à la pluviométrie en dessous de laquelle  $2/10^{\text{ème}}$  des données de la série lui sont inférieures, et ainsi de suite. Le cinquième décile ou médiane est égal à la quantité de pluie pouvant être reçue 1 année sur 2, c'est-à-dire la quantité partageant la série en deux groupes de même effectif.

La distribution de fréquence permet de faire apparaître la forme générale de la pluviométrie intra-annuelle. Elle permet également de comparer une année particulière par rapport à la valeur médiane, considérée comme valeur normale. Par exemple, les valeurs inférieures au premier décile indiquent des situations de forte sécheresse et les valeurs supérieures au neuvième décile indiquent des situations de forte humidité. La limitation de cette méthode d'analyse réside dans le fait que les déciles (ou probabilités) sont calculées pour chaque période (généralement la décade ou le mois) indépendamment des autres périodes. Elle ne permet donc pas de déduire des probabilités futures des pluies à partir des observations courantes.

## 2.3. INDICE OMBROTHERMIQUE DE BAGNOULS ET GAUSSEN

L'indice ombrothermique, développé par Bagnouls et Gaussen (1953), est un indice climatique permettant d'identifier les mois secs et humides de l'année. Il est égal au rapport ( $P/T$ ) de la pluviométrie ( $P$ , en millimètres) et de la température moyenne ( $T$ , en degrés Celsius), calculé pour chaque mois. Cet indice a été établi par ces auteurs en considérant les travaux d'écologie végétale réalisés par de nombreux auteurs dans les différentes parties du monde où se manifeste une période sèche. Lorsque ce rapport est inférieur ou égale à 2 ( $P/T \leq 2$ ), le mois est considéré comme sec pour les plantes. On suppose ainsi, que la demande évaporative<sup>18</sup> de l'air est supérieure aux apports pluviométriques lorsque l'indice ombrothermique est inférieur ou égal à 2. Inversement, les périodes de l'année durant lesquelles les valeurs de pluviométrie dépassent deux fois celles de la température moyenne ( $P/T > 2$ ) sont considérées comme étant humides.

<sup>18</sup> Capacité de l'air à extraire la vapeur d'eau du système sol-plante.

Les mois secs ou humides peuvent être identifiés graphiquement à partir d'un « *diagramme ombrothermique*<sup>19</sup> » dans lequel les variations de températures et des précipitations sont représentées selon une gradation standardisée: une gradation de l'échelle des précipitations (mm) correspond à deux gradations de l'échelle des températures (°C). Ce diagramme permet également de comparer facilement les climats de différents endroits du globe (Gausсен, 1956 ; Bagnouls et Gausсен, 1957). Il est cependant mieux adapté aux climats méditerranéens où la pluviométrie est variable au cours de l'année, engendrant des périodes humides et sèches. Le diagramme ombrothermique a été réalisé dans ce document, sur la période 1999 à 2009, en raison de la disponibilité simultanée en données de températures décennales, uniquement sur cette période.

#### 2.4. LONGUEUR DE LA PÉRIODE DE CROISSANCE

Le concept de Longueur de la Période de Croissance<sup>20</sup> (LPC) de la FAO (1978) permet d'identifier la période de l'année durant laquelle les conditions d'humidité et de température sont adéquates pour permettre la croissance et le développement des cultures. Ce concept a été utilisé par la FAO dans le cadre de la « *classification des zones agro-écologiques globales* » pour évaluer les ressources et le potentiel agricoles (FAO, 1996; IIASA/FAO, 2012). C'est une version moderne du diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен (1953) qui permet de prendre en compte la capacité de rétention en eau du sol et de mieux estimer l'évaporation réelle de l'eau.

Ce concept a été aussi utilisé au Maroc (Jlibene et Chafai, 2002 ; Jlibene et Balaghi, 2009) pour optimiser le positionnement du cycle cultural, de manière à réduire les risques de pénurie (sécheresse) ou excès d'eau (engorgement) et à améliorer la productivité agricole. Les données décennales de la pluviométrie et de la température de la station météorologique d'Arbaoua, relevant de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Loukkos, ont été utilisées à cet effet.

La méthode de calcul de la LPC consiste à réaliser des classes de pluviométrie, délimitées en fonction de l'évapotranspiration (ET), en supposant que :

- Une pluviométrie comprise entre la moitié et le dixième de l'évapotranspiration est suffisante pour entamer les préparations du sol ;
- Une pluviométrie comprise entre l'ET et la moitié de l'ET est favorable à la croissance des plantes ;
- Une pluviométrie supérieure à l'ET correspond à la période humide ;

<sup>19</sup> Un diagramme ombrothermique représente simultanément la pluie (*ombros* en grec) et la température.

<sup>20</sup> Le concept de la Longueur de la Période de Croissance", tel que défini par la FAO (1978), est la période (en jours) au cours de l'année durant laquelle les précipitations dépassent la moitié de l'évapotranspiration potentielle. Une période de temps nécessaire pour évapotranspirer 100 mm d'eau accumulée dans le sol est parfois ajoutée en fin de cycle.

- Une quantité de 100 mm d'eau est disponible au niveau du sol à la fin de la période de croissance.

Sur la base de ces hypothèses, on peut déterminer les différentes périodes d'intervention : préparation du sol, semailles, croissance, début et fin de chaque période.

## 2.5. ANALYSE DE RUPTURE DE SÉRIE CHRONOLOGIQUE DE LA PLUVIOMÉTRIE

Les séries de pluviométrie mensuelle de 15 stations météorologiques, pour lesquelles de longues séries sont disponibles, ont été utilisées. Elles proviennent du Réseau Climatologique Historique Global (en anglais, Global Historical Climatology Network) produit par le Centre de Données Climatologiques Nationales des États Unis d'Amérique ([www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov)) et qui regroupe les données climatologiques mondiales. Les séries couvrent près de 53 années de données, mais pour des périodes de temps qui varient selon les stations.

L'analyse de rupture a été réalisée par des tests rupture (dits aussi tests d'homogénéité) des séries de pluviométrie cumulée entre septembre et mai (Balaghi, 2006). Trois tests différents ont été utilisés pour tester cette rupture, les tests de Mann et Pettitt (Pettitt, 1979), Buishand (1982) et Lee et Heghinian (Lee et Heghinian, 1977).

## 2.6. PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DE PLUIE

La Productivité de l'Eau de pluie (PEP) par les cultures peut être définie comme la quantité de grain produite par unité de surface et d'eau de pluie (grammes/litre). Elle est égale au rendement en grammes au mètre carré (grammes/m<sup>2</sup>) divisé par la quantité de pluie (en millimètres) reçue durant la saison de culture (d'octobre à avril). La PEP fait référence à la productivité de l'eau verte<sup>21</sup> en agriculture et qui concerne 87% des terres agricoles au Maroc qui ne sont pas irriguées (MAPM, 2011). La PEP diffère selon le mode de culture, les espèces, les régions et les années. La PEP est plus importante pour les cultures conduites dans les conditions optimales des techniques culturales (fertilisation, protection phytosanitaire, travail du sol, précédent cultural, etc.) et bénéficiant de l'irrigation de complément<sup>22</sup>. La PEP est plus importante pour les espèces ayant bénéficié d'amélioration génétique.

<sup>21</sup> Le concept « *d'eau verte* », introduit par Falkenmark (1995), est l'eau de pluie qui est évapo-transpirée à partir du sol par les cultures non-irriguées. Elle peut donc être soit consommée par les plantes soit être évaporée par les sols. En opposition, « *l'eau bleue* » qui provient des écoulements de surface et dans les nappes est utilisée pour les besoins agricoles et non agricoles.

<sup>22</sup> L'irrigation est en général apportée en complément de la pluviométrie au Maroc, durant les périodes sèches de la campagne agricole, en raison de la faiblesse des ressources hydriques.

En particulier, en milieux arides et semi-arides, les objectifs d'amélioration génétique consistent surtout à créer des variétés résistantes à la sécheresse, c'est-à-dire valorisant l'eau de pluie disponible. La PEP est appelée Efficience d'Utilisation de l'Eau de pluie (EUEp) lorsque la partie de la pluviométrie réellement évapotranspirée par la culture, au cours de son cycle de développement, est prise en compte. L'EUEp potentielle des nouvelles variétés dans la zone agro-écologique « *Bour Défavorable*<sup>23</sup> », a été estimée à 2,2 grammes/litre, permettant une économie d'eau de 0,77 mm par an et par hectare par rapport à la variété Nasma (Jlibene, 2011). Cela correspond à une économie d'eau de 25 mm par hectare grâce à l'utilisation de ces nouvelles variétés.

La PEP diffère selon les régions en raison de la topographie et surtout des différences de température et des différences de type de sol. Les régions à sols profonds, non accidentés et à climat frais valorisent mieux l'eau. La PEP diffère selon les années en raison de la répartition intra-annuelle de la pluie et de la température. La PEP est plus importante lorsque la répartition intra-annuelle de la pluie est relativement uniforme sur tout le cycle de la culture. Elle est aussi plus importante lorsque les températures sont relativement plus douces, réduisant ainsi les pertes par évaporation.

En fonction de leur action sur l'EUEp, les sols peuvent être classés en trois grandes catégories de réserve en eau selon Roux (1938) :

1. Les sols sableux, à réserve en eau légère : riches en sable grossier ou fin, pauvres en limon et argile, à hygroscopicité minimale ;
2. Les sols argileux, à réserve en eau élevée : contenant une forte proportion d'éléments colloïdaux ou fins, à hygroscopicité élevée. Les quantités d'eau retenues sont considérables, mais la fraction disponible (réserve utile) pour les plantes est moyenne, voire faible ;
3. Réserves en eau des sols à texture moyenne : à composition physique bien équilibrée et à hygroscopicité moyenne. Les quantités d'eau retenues sont grandes et la réserve utile pour les plantes est élevée.

Ces trois catégories peuvent encore être subdivisées suivant la profondeur des sols, la nature du sous-sol (perméable ou non) et l'existence d'une nappe phréatique plus ou moins proche de la surface et plus ou moins durable.

La PEP a été calculée pour les céréales d'automne, à l'échelle nationale et des zones agro-écologiques, à partir des statistiques agricoles provenant de la DSS et des données de pluviométrie provenant de la DMN, toutes deux à l'échelle provinciale, sur la période 1987-2011.

---

<sup>23</sup> Le terme vernaculaire « *bour* » désigne l'agriculture pluviale, dont la superficie est d'environ 7,9 millions d'hectares au Maroc.

## 2.7. PRÉTRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

La prédiction des rendements céréaliers par le NDVI est grandement améliorée par deux traitements préalables des images NDVI :

1. Le premier traitement qui consiste à apporter des corrections radiométriques, atmosphériques et géométriques aux images est réalisé automatiquement par la chaîne de traitement et de production des images ;
2. Le second traitement consiste à éliminer les zones non agricoles, dites aussi « masquage » ; il est davantage du ressort des agro-climatologues. Le principe consiste à ne garder de l'image NDVI que la partie qui couvre les zones agricoles de manière à filtrer le "bruit" provenant des terres non agricoles.

Le « masque agricole » est extrait à partir de cartes numériques d'occupation des terres, en éliminant les plages de la carte qui ne correspondent pas aux terres agricoles comme les forêts, les parcours, les villes, les étendues d'eau, les massifs rocheux, etc. Les masques agricoles disponibles actuellement sont généralement de faible résolution (1x1 Km<sup>2</sup>).

Étant donné la taille des pixels (100 ha), ceux identifiés comme agricoles, peuvent ne pas être entièrement couverts par des terres agricoles. Une précision est apportée à ce masque en attribuant à chacun de ses pixels une valeur de la fraction de terres agricoles, appelé "Area Fraction Image" (AFI), par la superposition des images de résolutions plus élevées.

Le fait de ne travailler par la suite, que sur des pixels à dominance agricole a permis d'améliorer la relation entre les rendements de chacune des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et le NDVI, en dépit du fait que le masque représente toute la zone agricole, sans distinction des espèces cultivées. Trois raisons essentielles à cela : La première est que la superficie céréalière couvre la majeure partie des terres agricoles (5 sur les 8,7 millions d'hectares) ; la deuxième est que les trois espèces (blé tendre, blé dur et orge) réagissent de manière quasi simultanée à la variation de la pluviométrie ; la troisième est que la végétation spontanée (ou mauvaises herbes) suit une croissance parallèle aux cultures cérésières en fonction de la pluviométrie. Cependant, le masque peut encore être précisé davantage pour ne contenir que les zones couvertes par les céréales, ce qui est en cours de réalisation par l'INRA, la DSS, et la DMN dans le cadre du projet « *Crop Monitoring as an E-agriculture tool in Developing Countries* » (E-AGRI, <http://www.e-agri.info/>), financé par l'Union Européenne dans son 7<sup>ème</sup> Programme Cadre de recherche, de développement technologique et de démonstration.

Les images NDVI masquées sont ensuite découpées en superposant la carte des limites des différentes couches administratives ou géographiques (pays, provinces, zones agro-écologiques, etc.). La résolution spatiale utilisée dépend de l'échelle spatiale pour laquelle la prédiction est recherchée. La moyenne de l'ensemble des NDVI des pixels masqués au sein de ces différentes limites administratives est calculée pour produire des prédicteurs du rendement par unité administrative.

## 2.8. APPROCHE POUR LA PRÉDICTION DE LA RÉCOLTE CÉRÉALIÈRE

La prédiction des récoltes céréaliers développée par l'INRA, en collaboration avec l'Université de Liège, le VITO et le JRC se base sur une approche dite combinée. On entend par approche combinée, la combinaison de plusieurs méthodologies de prédictions des rendements, en particulier :

- L'analyse par analogie, réalisée sur la base de la pluviométrie ou de l'indice de végétation (NDVI) ;
- L'analyse de régression linéaire<sup>24</sup> simple ou multiple, réalisée sur la base de la pluviométrie ou de l'indice de végétation (NDVI) ;
- L'analyse par les modèles de simulation de la croissance et du développement des cultures. Le modèle WOFOST<sup>25</sup> ([www.wofost.wur.nl/UK/](http://www.wofost.wur.nl/UK/)), de simulation quantitative de la croissance et la production des cultures annuelles, a été utilisé pour la prédiction des rendements céréaliers.

Contrairement aux modèles de simulation, davantage destinés à la recherche de base et les publications scientifiques, la prédiction opérationnelle des récoltes a des implications économiques, sociales et politiques qui laissent très peu de place à l'erreur. Face à un décideur, une erreur de prédiction peut ruiner la crédibilité, voire la carrière du prévisionniste. L'estimation de l'erreur de prédiction est donc une qualité indispensable des systèmes de prédiction des cultures. À titre indicatif, le JRC considère que l'erreur de prédiction est faible lorsqu'elle est inférieure à 3% mais peut aller jusqu'à 6% (Genovese et Bettio, 2004). Le système européen de prédiction des récoltes CGMS prédit les rendements des principales cultures en Europe avec 3 à 5% d'erreur (8,6% pour le blé dur).

Cela représente en termes absolus entre 2 et 4 Qx/ha pour le blé à l'échelle des pays européens (Genovese, 2001). Le système CGMS, de son nom en anglais « Crop Growth Monitoring System », a été développé par le projet « Monitoring Agricultural Resources » (MARS) hébergé par le Centre de Recherche Commun de la Commission Européenne (JRC) de la Direction Générale de l'Agriculture et du Développement Rural de la Commission européenne. Le système CGMS réalise de façon opérationnelle des prédictions des récoltes agricoles sur l'Europe, en temps opportun, de manière quantitative, aux échelles régionale et nationale.

Le système CGMS surveille le développement des cultures, à partir des conditions météorologiques, des caractéristiques des sols et des paramètres des cultures.

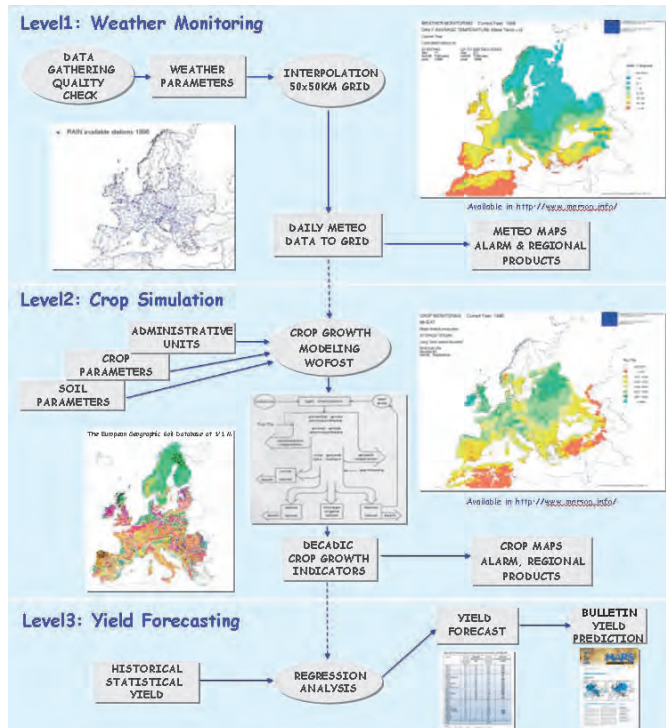
---

<sup>24</sup> Une excellente lecture pédagogique des modèles de régression linéaire est donnée par Kutner *et al.* (2005).

<sup>25</sup> WOFOST est un modèle de simulation de la croissance et du développement des cultures. C'est un modèle de la « famille Wageningen » (van Diepen *et al.* 1989 ; Supit *et al.* 1994 ; Hijmans *et al.* 1994 ; Van Kraalingen *et al.* 1991). Ce modèle est générique, mais les paramètres sont fournis pour le blé, le maïs-grain, orge, riz, betteraves à sucre, pomme de terre, haricot, le soja, le colza et le tournesol.

Le cœur du système CGMS est basé sur le modèle déterministe de croissance des cultures, et WOFOST. Le système CGMS est constitué de trois niveaux (level en anglais, Figure 3) :

1. **Niveau 1** : La collecte des données météorologiques et leur interpolation sur une grille carrée ;
2. **Niveau 2** : La simulation de la croissance des cultures ;
3. **Niveau 3** : La prédiction des récoltes.



**Figure 3 : Le système Crop Growth Monitoring System (CGMS) de prédiction des récoltes.**  
<http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/About-us/AGRI4CAST/Crop-yield-forecast/The-Crop-Growth-Monitoring-System-CGMS>

L'approche combinée permet de prédire le rendement des cultures, de différentes manières, grâce à l'utilisation simultanée de différentes méthodologies indépendantes. Elle est utilisée lorsqu'aucune approche, empirique ou de simulation, prise séparément ne permet d'avoir une précision de prédiction satisfaisante. C'est le cas justement en prédiction opérationnelle, lorsque les facteurs qui affectent les cultures sont complexes, difficilement modélisables ou mesurables. L'approche combinée se base sur l'expertise agronomique de façon à adapter la méthodologie en fonction de la disponibilité en données de base et des facteurs limitants pour chaque contexte (pluie, température, sols, maladies, etc.).

L'approche combinée est une alternative, notamment à l'approche de simulation qui ne fournit pas toujours une estimation de l'erreur de prédiction<sup>26</sup>. L'approche de simulation n'est pas totalement adaptée aux procédures de calibration et de validation car elle produit en général des estimations non-répliquées qui ne peuvent donc pas être comparées, par les tests statistiques usuels, à des échantillons issus d'observations (Sinclair et Seligman, 2000 ; Van Oijen, 2002).

### 2.8.1. PROGRÈS TECHNOLOGIQUE

L'un des problèmes épineux en agrométéorologie opérationnelle, de façon générale, et en prédiction des récoltes agricoles, de manière particulière, est la séparation entre les facteurs environnementaux qui influencent la variabilité interannuelle des rendements agricoles et les facteurs technologiques (fertilisation, irrigation, variétés sélectionnées, traitement phytosanitaire), économiques ou politiques qui influencent la tendance (progression ou régression) des rendements sur plusieurs années (Gommes *et al.*, 2010). Un exemple hypothétique est illustré en Figure 4 : le progrès technologique (courbe F1) agit directement sur l'augmentation des rendements à long terme (courbe F3). Les politiques économiques (telles que les prix) qui peuvent encourager ou dissuader l'utilisation d'intrants influencent aussi la tendance des rendements (courbe F2). Des facteurs météorologiques extrêmes peuvent aussi influencer instantanément les rendements agricoles (courbe F4), tels que les inondations, la grêle, etc.

Au Maroc, le progrès technologique est difficile à quantifier car les statistiques agricoles sont agrégées par province, régions ou zones d'Offices de Mise en Valeur Agricole, englobant donc une multitude de situations agronomiques différentes inextricables.

Il est donc difficile dans les statistiques agricoles de séparer le progrès technologique de l'influence des prix, des facteurs extrêmes, etc. Par simplification, le progrès technologique est donc assimilé à la tendance des rendements agricoles sur le long terme.

---

<sup>26</sup> L'inconvénient des modèles déterministes de simulations réside dans le fait qu'ils ne permettent pas de produire des prédictions accompagnées de leurs erreurs. Une solution a été trouvée à travers l'approche « ensemble » qui permet de faire tourner un modèle de simulation sur des variables climatiques et des paramètres auxquels une perturbation probabilistique est apportée afin d'obtenir un « ensemble » de prédictions et leur distribution statistique (Allard *et al.*, 2009). C'est une manière indirecte de mesurer l'erreur de prédiction des modèles déterministes.



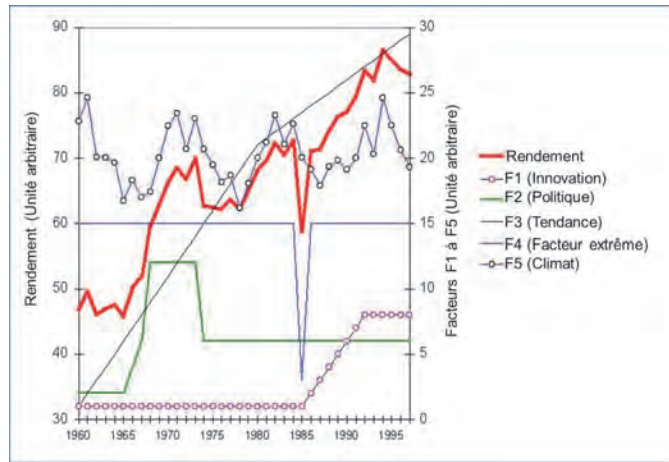


Figure 4 : Exemple hypothétique montrant comment le rendement des cultures peut être influencé par des facteurs externes (Source : Gommès *et al.*, 2010).

### 2.8.2. ANALYSE PAR ANALOGIE

L'analyse par analogie<sup>27</sup> (ou par similarité) est un moyen efficace, rapide et facile de prédiction des rendements céréaliers. L'analyse par analogie consiste à retrouver, parmi les campagnes agricoles passées, celles qui ressemblent, du point de vue agro-climatique, à la campagne pour laquelle on veut prédire le rendement agricole. C'est une méthode d'analyse statistique qui suppose que le résultat de la campagne agricole en cours sera égal à celui ou celles des campagnes précédentes dont les conditions agro-climatiques sont analogues. Cette approche ne peut donc être utilisée que si, dans l'historique, il existe des campagnes plus ou moins analogues. Il est indispensable pour cela de disposer des séries chronologiques les plus longues possibles afin d'englober la plus grande diversité possible de situations agro-climatiques. Il est évident que les campagnes agricoles très particulières, par exemple très pluvieuses ou très froides, auront peu de chances de se trouver dans l'historique et seront donc prédites avec plus d'erreur. C'est donc une approche qui fait référence à un vécu, nécessitant toutefois de tenir compte du progrès technologique (variétés, engrais, mécanisation, irrigation, etc.) réalisé entre-temps, lorsque les campagnes analogues remontent loin dans le passé. Le résultat de l'analyse par analogie doit donc être ajusté pour tenir compte du progrès technologique réalisé depuis.

<sup>27</sup> Le concept d'analyse par analogie est utilisé par les météorologues pour la prévision quantitative des précipitations. Le concept part de l'hypothèse que l'évolution de l'atmosphère n'est pas aléatoire mais qu'elle est régie par des lois physiques. Donc, si on connaît l'état initial, on peut en déduire l'état futur. À partir de là, on peut prévoir le climat à partir de modèles qui peuvent être déterministes, probabilistes ou analogiques. Lire la thèse de Bontron (2004) à ce sujet.

Il est également possible par ce type d'analyse d'associer une probabilité à la prédiction, en considérant que les années analogues sont un échantillon représentatif de l'année en cours pour laquelle on veut prédire le rendement.

L'approche par analogie met à contribution aussi bien l'analyse graphique visuelle, des techniques simples d'analyse statistique telles que le calcul des distances euclidiennes, que des techniques d'analyse en composantes principales ou des analyses de partitionnement de données (analyse de classification automatique ou *cluster analysis* en anglais) à partir d'un ou plusieurs facteurs climatiques (pluie, température, humidité, etc.) ou indicateurs de l'état de la végétation (NDVI, DMP<sup>28</sup>, etc.). Ces types d'analyse sont aisément réalisables, soit à partir de tableurs ou bien par l'intermédiaire de logiciels statistiques usuels. L'approche par analogie est utilisée à l'INRA, pour la prédiction précoce des récoltes, dès le mois de février sur la base des données pluviométriques et des conditions de végétation (NDVI) détectées par l'imagerie satellitaire. En effet, les prémises de la campagne céréalière apparaissent à partir de fin février, bien que les conditions climatiques de mars et avril soient déterminantes pour la production agricole finale. La technique simple mais très efficace d'analyse par analogie consiste à calculer, pour chaque décade (10 jours), la différence absolue de valeur de la variable utilisée (pluviométrie ou bien NDVI) entre la campagne pour laquelle on veut réaliser la prédiction et chacune des campagnes antérieures disponibles dans la série de données. Lorsqu'il s'agit de la variable pluviométrique, on utilise le cumul pluviométrique décadaire à partir du 1<sup>er</sup> septembre. Lorsqu'il s'agit du NDVI, on utilise la moyenne des NDVI décadaires à partir de février. On obtient alors un tableau des différences (absolues) avec, pour colonnes, les décades et, pour lignes, les campagnes antérieures. À partir de ce tableau, on calcule ensuite pour chaque décade, de février à avril, la différence moyenne qui est égale à la moyenne des différences de toutes les décades antérieures. Les campagnes agricoles qui sont analogues peuvent changer, à chaque décade au fur et à mesure de l'avancement de la campagne, en fonction de leur ressemblance, en termes de NDVI moyen ou de pluviométrie cumulée. Une fois que les campagnes analogues sont identifiées, il est possible alors de calculer un rendement prévisionnel, qui est égal à la moyenne des rendements de ces campagnes, pondérés par leurs distances relatives par rapport à la campagne en cours que l'on veut prédire. Il est également possible de calculer un intervalle de confiance de cette prédiction. L'approche par analogie fonctionnant sur le principe des plus proches voisins, il n'y a pas de seuil absolu d'analogie entre les campagnes. Le choix du nombre de campagnes analogues à considérer est donc laissé à l'appréciation du prévisionniste, en fonction de son expertise, pour juger de leur degré d'analogie (similitude) avec la situation vécue.

---

<sup>28</sup> Dry Matter Productivity (DMP, <http://www.geoland2.eu/>) est un indicateur du taux de croissance de la biomasse végétale qui est issu de la télédétection spatiale. Il est dérivé des images SPOT-VEGETATION et de données météorologiques, à intervalles de 10 jours à la résolution spatiale de 1 km. Il s'exprime en kilogramme par hectare et par jour. Les résultats préliminaires de son utilisation au Maroc, dans le cadre du projet [E-AGRI](#), montrent un fort potentiel pour la prédiction des rendements céréaliers.

### 2.8.3. ANALYSE PAR LA RÉGRESSION LINÉAIRE

L'analyse de la régression, par la méthode ordinaire des moindres carrés, permet de rechercher des relations entre les rendements des cultures et des prédicteurs agronomiques, environnementaux ou économiques. Les prédicteurs peuvent en effet être soit des facteurs agronomiques (variété, température, engrais, irrigation, etc.), des facteurs climatiques (pluie, température, humidité, etc.), des indicateurs environnementaux (NDVI, bilan hydrique, etc.) ou des indicateurs économiques (prix, coûts, accessibilité, etc.). Les indicateurs sont utilisés en prédiction des récoltes car ils peuvent avantageusement compléter les facteurs agronomiques et climatiques utilisés directement. Par exemple, le NDVI qui est une mesure de la vitalité de la végétation, est la résultante des conditions pluviométriques, de température, du bilan en eau des sols, des techniques agronomiques utilisées, etc. Cependant, la contribution de chacun de ces facteurs au NDVI est difficile à quantifier. Les prédicteurs peuvent être soit des variables quantitatives (pluviométrie, température, NDVI, etc.) soit des variables qualitatives (présence ou absence de sécheresse, phénomène d'alternance de certains arbres fruitiers, etc.), utilisées séparément ou bien de façon combinée. Au Maroc, les prédicteurs pertinents à prendre en compte pour la prédiction du rendement des céréales sont : la pluviométrie, la température et les indices de végétation (NDVI et dérivés), sur une ou plusieurs périodes de temps au cours de la campagne agricole. Ils peuvent être utilisés séparément ou combinés dans des équations de régressions multiples (Balaghi *et al.*, 2008) après un processus de sélection de variable (« *Stepwise* », « *Forward* » ou « *Backward* ») de manière à éviter les problèmes de multicolinéarité<sup>29</sup> (Kutner *et al.*, 2005).

---

<sup>29</sup> Les problèmes de multicolinéarité sont souvent rencontrés en agrométéorologie car les variables climatiques ou environnementales ne sont jamais complètement indépendantes les unes des autres. On peut, en effet, considérer que ces variables sont les mesures de manifestations différentes d'un même climat local, régional ou global.

### III. ANALYSES DU CLIMAT DU MAROC

La recherche d'indicateurs climatiques de prédiction des rendements céréaliers s'est focalisée sur les caractéristiques de la pluviométrie, de la température et de leurs dérivés. Au début, les indicateurs ont porté sur les moyennes annuelles à long terme. La pluviométrie à l'échelle du pays s'est avérée être fortement influencée par l'Oscillation Nord Atlantique. Cette influence est citée dans la littérature pour les précipitations d'hiver et a été vérifiée pour la pluviométrie totale d'automne et d'hiver à l'échelle nationale en utilisant les données historiques. La pluviométrie annuelle est variable d'une année à l'autre, mais relativement homogène sur le long terme jusqu'à 1980 date à laquelle on a observé statistiquement des ruptures montrant une baisse des moyennes dans la série chronologique dans de nombreuses stations synoptiques du pays. En conséquence de ce changement climatique, l'analyse du climat ainsi que le pronostic des comportements des cultures en fonction du climat, ne peuvent donc être réalisées que sur les séries chronologiques récentes postérieures à 1979-1980. L'analyse détaillée de la répartition intra-annuelle de la pluviométrie et de la température a été réalisée en utilisant les données récentes postérieures au point de rupture climatique (i.e. 1980). La pluviométrie suit en moyenne un gradient croissant en fonction de la latitude et de l'altitude dans les zones agricoles. La température suit le gradient opposé, diminuant en moyenne en fonction de la latitude et de l'altitude. Les températures les plus faibles se rencontrent en montagne, les plus élevées au sud dans les provinces sahariennes et les plus modérées aux voisinages des côtes maritimes. La moyenne de température au niveau national varie relativement peu d'une année à l'autre. La répartition intra-annuelle de la température varie peu d'une campagne à l'autre, avec les températures printanières plus stables que les températures hivernales. En revanche, la pluviométrie varie énormément d'une année à l'autre. De façon générale, la distribution annuelle de la pluviométrie ne suit pas une loi statistique normale ou gaussienne. La moyenne pluviométrique est éloignée de la médiane qui est davantage positionnée sur les campagnes sèches. La distribution de la pluviométrie annuelle est par exemple de type Gamma dans la région de Meknès où la pluviométrie moyenne est voisine de la médiane, et de type Log-Logistique dans les régions plus au sud (Khémisset, Settat et Safi). Malgré cette variation interannuelle, la distribution, intra-annuelle de la pluviométrie est relativement régulière, avec un cumul décadaire qui peut être approché par une droite de régression linéaire, dont la pente est indicatrice de la pluviométrie totale de la saison. La longueur du cycle cultural a été étudiée à travers l'indice ombrothermique et la Longueur de la Période de Croissance définie par la FAO. L'indice ombrothermique montre, en fonction de la pluviométrie et de la température, une saison de croissance moyenne nationale de 6 mois, se situant entre les mois d'octobre et de mars, mais variable selon les localités, pouvant être longue de 8 mois en montagne, à moins de 2 mois dans les régions sahariennes. La méthode FAO permet d'évaluer la longueur de la période de croissance ainsi que les stades d'interventions culturales, en tenant compte aussi de la capacité de rétention en eau des sols. Cependant, en raison du changement climatique, la longueur de la période de croissance et son positionnement dans la saison risquent d'être modifiés.

## 1. INFLUENCE DE L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE

Le climat au Maroc est sous l'influence des modes de circulation extratropicale (Ward *et al.*, 1999 ; Glueck et Stockton, 2001 ; Herrera *et al.*, 2001 ; Knippertz *et al.*, 2003). Géographiquement, il y a trois régions relativement homogènes du point de vue des précipitations (Knippertz *et al.*, 2003) :

1. La région de l'Atlantique comprenant les parties nord et ouest du Maroc ;
2. La région Méditerranéenne comprenant le nord-est marocain et le nord-ouest algérien sur la côte méditerranéenne ;
3. La région au sud de l'Atlas comprenant les stations marocaines et algériennes.

Les différences dans le comportement des précipitations entre les trois régions sont probablement dues à l'orographie, car les trois régions sont séparées les unes des autres par les grandes chaînes de montagne (le Haut Atlas, Moyen Atlas, Anti-Atlas, et Rif). La Région de l'Atlantique a une pluviométrie hivernale, influencée, en plus de l'Oscillation Nord Atlantique, par le déplacement vers le sud des perturbations des moyennes latitudes, par les dépressions locales et par les advections d'ouest ramenant de l'air humide. Les précipitations hivernales de la région Méditerranéenne résultent des dépressions ouest-méditerranéennes et des advections d'air humide provenant du nord-ouest. La région au sud de l'Atlas a une pluviométrie hivernale plus complexe, résultant du transport d'humidité de l'Atlantique le long du flanc sud des montagnes Atlas via un flux de sud, de l'activité cyclonique renforcée sur les îles Canaries et de l'occurrence de cyclones au sud-ouest de la péninsule ibérique (Driouech, 2010).

L'Oscillation Nord Atlantique (ONA) exerce une grande influence sur les précipitations au Maroc, comme indiquée dans la Figure 5 par la forte corrélation négative entre l'indice ONA et la pluviométrie. L'indice moyen de l'Oscillation Nord Atlantique (indice ONA), des mois de septembre à février, explique les trois quarts ( $R^2=74\%$ ) de la variation de la pluviométrie moyenne nationale (cumulée de septembre à mai) (Figure 5).

L'oscillation australe El Niño (ENSO) exerce aussi une certaine influence sur les précipitations du Maroc. La phase chaude (positive) du phénomène ENSO favoriserait une réduction des précipitations notamment printanières (Nicholson et Kim, 1997 ; Ward *et al.*, 1999).

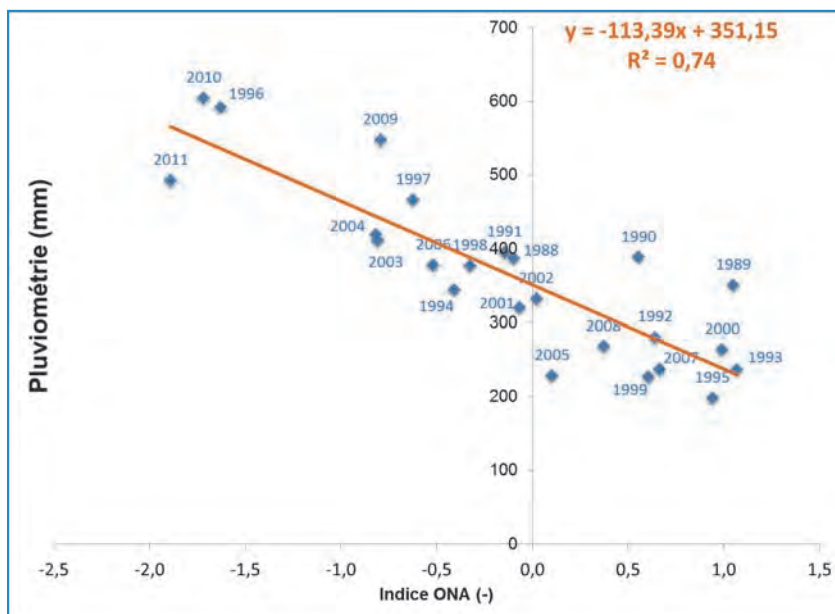


Figure 5 : Relation entre la pluviométrie sur la campagne agricole (cumul de septembre à mai) et l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) moyen des mois de septembre à février (données de 1979 à 2011).

## 2. CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les ruptures dans la série chronologique des données pluviométriques ont été détectées, aux alentours de 1978 et 1981, pour 5 des 15 stations étudiées (Tableau 2). Pour certaines stations (Tanger, Kenitra et Ouarzazate) la rupture a été détectée à des dates plus anciennes. La pluviométrie annuelle a chuté de façon brutale après 1980, de 151 mm à Meknès et à Oujda, 82 mm à Fès, correspondant à une réduction de la pluviométrie annuelle de plus de 25%.

**Tableau 2 : Analyse de rupture de série chronologique de la pluviométrie cumulée de septembre à mai au niveau provincial (Source : Balaghi, 2006).**

Province	Série	Pluviométrie Moyenne (mm)	Tests de rupture		
			Mann et Pettitt	Buishand	Lee et Heghinian
Tanger	1932-2004	770	1948 (0,0262)	(0,0001)	1948 (0,3214)
Tétouan	1938-2004	671	ns	ns	1971 (0,1669)
Kenitra	1951-2004	571	1972 (0,0375)	(0,1000)	1972 (0,1697)
Meknès	1932-2004	535	1980 (0,0009)	(0,0001)	1980 (0,2618)
Rabat	1931-2004	510	ns	ns	2002 (0,1435)
Fès	1915-2004	483	1978 (0,0846)	(0,1000)	1978 (0,0970)
Casablanca	1903-2004	399	ns	ns	1978 (0,0271)
El Jadida	1932-2004	371	ns	ns	2002 (0,0555)
Safi	1901-2004	353	ns	ns	2003 (0,0403)
Settat	1910-2004	353	1942 (0,0861)	(0,0500)	1980 (0,0781)
Essaouira	1894-2004	305	ns	(0,1000)	1898 (0,1362)
Oujda	1932-2004	297	1981 (0,0045)	(0,0001)	1981 (0,2376)
Agadir	1922-2004	232	ns	ns	ns
Marrakech	1919-2004	229	ns	ns	1919 (0,2433)
Ouarzazate	1932-2004	91	1950 (0,0842)	(0,1000)	1950 (0,1564)

ns: test non significatif.

Le Maroc semble très sensible à l'augmentation globale de température puisque ce changement de pluviométrie, qui est survenu au Maroc, a coïncidé avec l'augmentation rapide de la température de l'air à l'échelle du globe (Brohan *et al.*, 2006). Depuis 1979, le taux de réchauffement a été deux fois plus rapide sur la terre que sur l'océan et au cours du siècle dernier, l'Arctique s'est réchauffé de près de deux fois le taux moyen global (IPCC, 2007). En plus de la baisse de la pluviométrie, le climat s'est réchauffé de façon significative au Maroc, au cours de la période 1961-2008, de 0,2°C à 0,4 °C par décennie (Driouech, 2010).

Ce changement de pluviométrie a été également constaté pour le Maroc par Knippertz *et al.* (2003), Chaponniere et Smakhtin (2006), Driouech (2010) et par Sebbar *et al.* (2011). Les réductions ont surtout affecté les zones de montagnes du Moyen-Atlas et celles arides de l'Oriental. Knippertz *et al.* (2003) expliquent ce changement par les perturbations de l'Oscillation Nord Atlantique sans en expliquer les causes.

Cette rupture de la pluviométrie survenue vers 1980 au Maroc a eu des répercussions directes sur les orientations de recherche de l'INRA. L'institut a en effet lancé en 1981 un grand programme de recherche en zones arides et semi-arides, appelé « Aridoculture<sup>30</sup> », en collaboration avec le Mid-America International Agricultural Consortium composé de cinq universités américaines du Middle West (MIAC).

<sup>30</sup> Le terme « aridoculture » est plus ancien, remontant au moins aux années 1950, notamment cité par Varaldi-Conia (1953). Il a pour origine le terme anglais « dry farming » importé des États Unis d'Amérique. Déjà au début du siècle dernier, Augustin (1911) avait lancé un plaidoyer en faveur de ce type d'agriculture en Afrique du Nord.

Le programme Aridoculture avait pour objectifs d'augmenter et de stabiliser la production des céréales, des légumineuses alimentaires et des fourrages dans les environnements arides et semi-arides du Maroc (250 à 450 mm/an), tout en recherchant des systèmes de production performants afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation des pluies. Sur le plan de l'agrométéorologie en particulier, cette rupture a imposé à l'INRA une révision des méthodologies d'analyse du climat et la mise en place de projets de recherche sur la prédiction des récoltes cérésières dans le cadre de la sécurité alimentaire du pays. Une opportunité nouvelle s'offrait à la recherche agronomique dans le domaine de l'agrométéorologie durant la période de sécheresses récurrentes, entre 1980 et 2008, pendant laquelle la production agricole devenait plus que jamais dépendante des conditions pluviométriques.

L'analyse de rupture, réalisée sur 15 stations marocaines (Balaghi, 2006), a montré aussi que le climat est resté stationnaire, à partir des années 1980, d'un point de vue statistique. Bien entendu, les trois campagnes agricoles très pluvieuses qu'a connues le Maroc entre 2008-2009 et 2010-2011 restent exceptionnelles. Ces résultats sont également en accord avec les travaux de Hurrell et Van Loon (1997) d'analyse des anomalies de l'Oscillation Nord Atlantique sur la partie sud de l'Europe et la Méditerranée. Ces deux auteurs ont détecté des périodes particulièrement sèches entre 1981 et 1994, comparativement à la période 1951-1980. La rupture pluviométrique a aussi été observée, à partir des années 1970, dans les régions Ouest et Centrales d'Afrique, mais de façon plus marquée au nord-ouest de cette région (Paturel *et al.*, 1998).

La conclusion à tirer de tous ces travaux est que l'analyse du climat ne pouvait être désormais réalisée que sur la série homogène postérieure à l'année 1980, car le climat avait depuis changé au Maroc. La mise en évidence des ruptures voulait dire également qu'il devenait hasardeux de pronostiquer des comportements futurs du climat à partir de l'expérience passée, notamment par l'utilisation des études fréquentielles. La série recommandée pour l'analyse du climat présent doit tenir compte de cette rupture, et donc inclure uniquement les campagnes postérieures à 1980.

### 3. TEMPÉRATURE

#### 3.1. VARIATION SPATIALE DE LA TEMPÉRATURE

La **température moyenne** à long terme (1950-2000) varie géographiquement au Maroc de 22° à 24 °C en été et de 12° à 14°C en hiver, soit une gamme de variation de 1 à 2,25 (Figure 6A). Les plus faibles températures sont rencontrées en montagne, et les plus fortes dans le désert. Le cumul journalier des températures moyennes entre septembre et mai est maximal à Laâyoune, au Sahara (7.860 °C) et minimal à Ifrane, en montagne (5.110 °C). La variation de la moyenne des températures entre stations reste cependant faible, variant entre 11% au début de la campagne à 9% en fin de saison.



**La température minimale** à long terme (1950-2000) du mois le plus froid évolue de  $-15,0^{\circ}\text{C}$  à  $+13,6^{\circ}\text{C}$  (gamme de variation de 1 à 2) et diminue de la côte Atlantique vers la montagne (Figure 6B). En règle générale, les températures minimales les plus élevées se rencontrent dans les zones désertiques. Certaines variétés de céréales, dites d'hiver, n'arrivent pas à fleurir et produire du grain si elles n'accumulent pas du froid au début de leur cycle, et restent alors à l'état végétatif. Ce genre d'évènement s'est produit plusieurs fois au Maroc, lorsque l'orge, provenant du programme d'aide à la préservation au cheptel, a été semée par les agriculteurs. Il convient donc de s'assurer des besoins en froid des variétés introduites des régions froides, comme celles de l'hémisphère nord.

**La température maximale** à long terme (1950-2000) du mois le plus chaud, généralement le mois de juillet, évolue de  $22^{\circ}\text{C}$  à  $46^{\circ}\text{C}$ . En règle générale, les températures les plus élevées se rencontrent dans les régions désertiques et les températures maximales les plus faibles se rencontrent en montagne mais aussi sur la côte maritime (Figure 6C). Les hautes températures peuvent avoir des effets négatifs sur les céréales, comme sur la floraison, la surface photosynthétique ou le remplissage du grain. Au niveau métabolique, les protéines, en particulier les enzymes responsables de la synthèse, se dénaturent dans les conditions de hautes températures.

**L'amplitude thermique** à long terme (1950-2000) évolue de  $5,7^{\circ}\text{C}$  à  $17,5^{\circ}\text{C}$  (gamme de variation de 1 à 3), avec la plus élevée rencontrée en montagne et à leur voisinage (Figure 6D). La plus faible amplitude est rencontrée le long des côtes maritimes. La répartition géographique des cultures est influencée par cette amplitude.

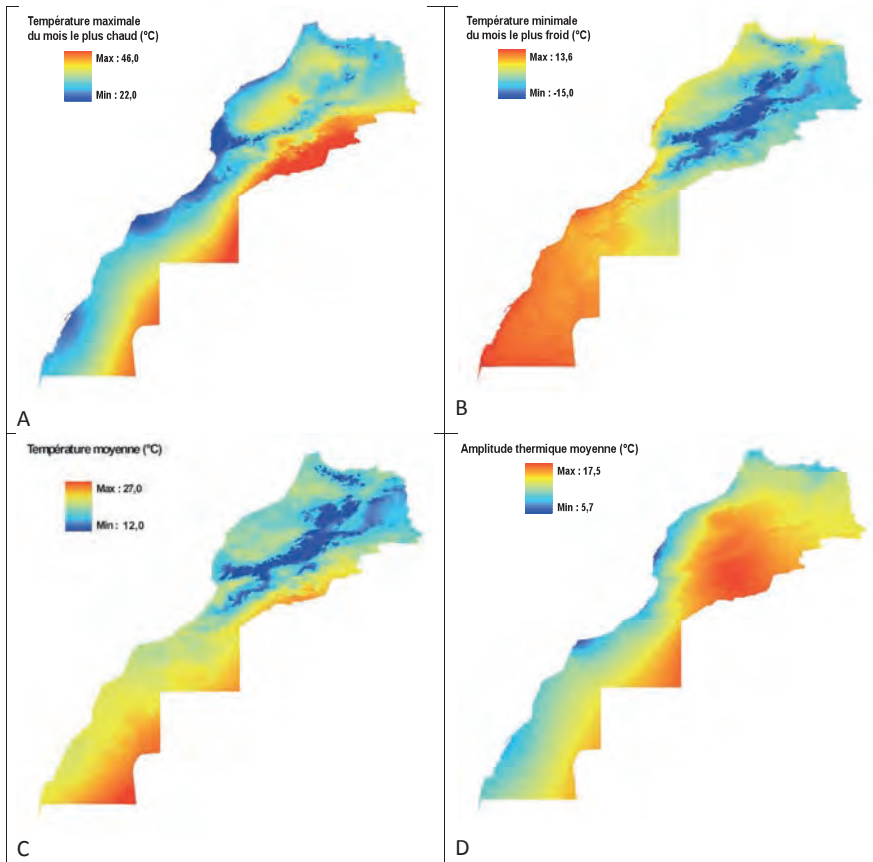


Figure 6 : Température maximale du mois le plus chaud (A), minimale du mois le plus froid (B), moyenne (C) et amplitude thermique moyenne (D) (cartes réalisées à partir des données [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org) à la résolution spatiale de 1 km, Série de 1950 à 2000, Hijmans et al., 2005).

La température agit également sur la date d'apparition des stades phénologiques. Les effets cumulés de la température sur le développement des stades phénologiques des plantes sont largement documentés dans la littérature scientifique, en particulier, ceux des blés qui exigent une somme de température spécifique. Au Maroc, le blé tendre atteint le stade floraison après 1.750 °C x jours environ et la maturité physiologique après 2.750 °C x jours, variables selon le régime hydrique et minéral des cultures. Il est évident que la variation de température d'une station à l'autre se répercute sur la variation de la date d'apparition des stades. Le cycle biologique du blé s'allonge suivant le gradient décroissant de la température, du sud vers le nord, et de la plaine vers la montagne.

La marge de variation pour les dates d'épiaison ou de maturité entre régions céréalières, est de trois mois, avec la montagne où les températures sont basses, qui enregistre le cycle le plus long. Les engins de récolte commencent au sud dans les provinces de Rhamna et Abda à partir de mi-mai et progressent vers le nord et la montagne.

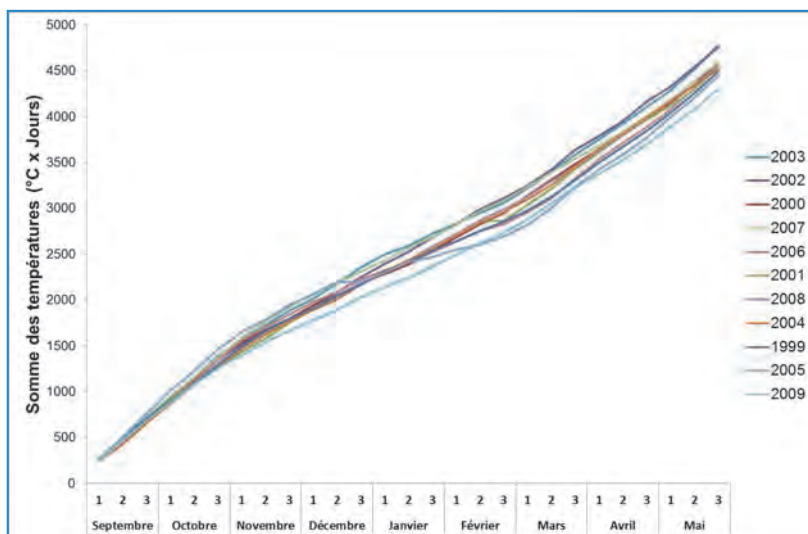
### 3.2. VARIATION INTERANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE

A l'instar du cumul pluviométrique, la variation interannuelle de la moyenne nationale des températures peut être appréhendée à travers le cumul des températures journalières<sup>31</sup>.

La somme des températures journalières (°C), cumulées entre septembre et mai (moyenne des données des 35 stations synoptiques utilisées), est très peu variable d'une année sur l'autre. La gamme de variation est de 500 degrés x jours à fin mai, variant entre un minimum de 4.300 °C x jours durant la campagne agricole 2008-2009 à un maximum de 4.775 °C x jours durant celle de 2002-2003, variant d'un facteur de 1 à 1,11 (Figure 7). Les différentes campagnes agricoles diffèrent par le cumul de températures entre le début et la moitié (mi-février) de la saison. Au-delà, le rythme d'augmentation de la température est presque identique d'une année à l'autre, schématisé par le parallélisme des courbes de cumul de température dans la Figure 7. Cela indique une stabilité de la température printanière, d'une campagne à l'autre, à l'inverse des températures automnale et hivernale.

---

<sup>31</sup> Le concept de somme des températures (ou degrés x jours) est lié au besoin d'accumulation d'une certaine quantité de chaleur par les plantes. Il est influencé par la variabilité génétique des plantes cultivées, l'influence possible des extrêmes chauds, le besoin en températures basses, la contrainte hydrique et le photopériodisme. Ce concept est utilisé dans de nombreux modèles de simulation agrométéorologique des cultures et des ravageurs.



**Figure 7 : Somme des températures moyennes journalières (en degrés x jours), au cours de la saison de culture des céréales. Les campagnes agricoles (année de récolte) sont classées par ordre décroissant de température cumulée (Données de 1999 à 2009).**

La variation interannuelle du cumul de température au Maroc est relativement faible, la différence entre le maximum et le minimum ne représente que 11% du cumul minimum.

Le coefficient de variation est relativement bas, avec un maximum de 35% atteint en hiver (à la troisième décennie de décembre) et un minimum de 5% enregistré au début de la campagne en septembre (première décennie). Cependant la série utilisée est limitée à la dernière décennie, correspondant à la période de 1999-2009. La campagne 2008-2009 a été exceptionnellement humide, à pluviométrie régulière le long du cycle, avec des températures douces.

À l'échelle des stations, la variation interannuelle est plus grande. Pour la ville de Meknès prise comme exemple, la variation augmente à partir de septembre, atteint un maximum en février et diminue ensuite (Figure 8). Le coefficient de variation fluctue entre un minimum de 7,5% en début de campagne (septembre) à un maximum de 42,5% en hiver (février). Cette augmentation de la variation entre septembre et février permet d'expliquer la divergence croissante des courbes de cumul des températures illustrée dans la Figure 7.

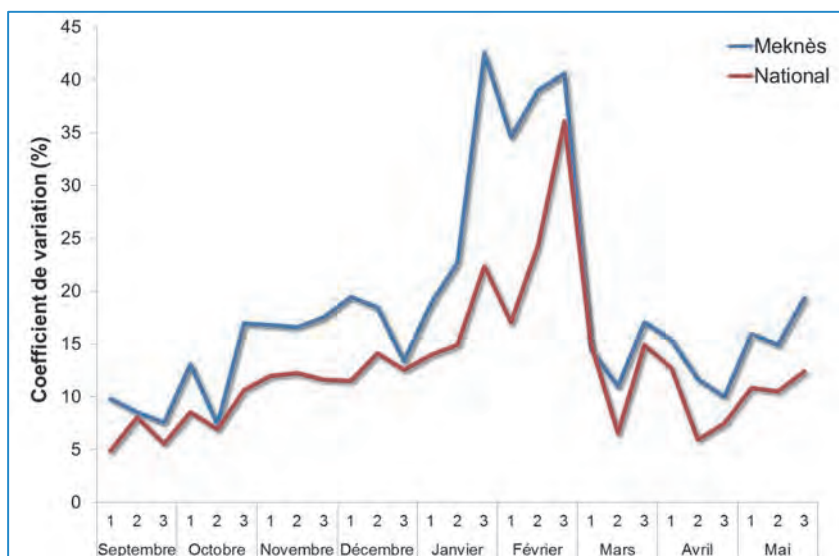


Figure 8 : Évolution du coefficient de variation interannuelle des températures moyennes décadaires au niveau national et au niveau de la station de Meknès (Données de 1999 à 2009).

### 3.3. VARIATION SAISONNIÈRE DE LA TEMPÉRATURE

Les températures au Maroc sont élevées en été (août et septembre), diminuent progressivement pour atteindre un minimum en hiver (décembre et janvier) puis augmentent au printemps, à partir de février. Durant la campagne céréalière les températures maximales décadaires varient en moyenne de 32,3°C en début septembre à 18,5°C en fin décembre (données de 1999 à 2009), soit une gamme de variation de 13,8°C (Figure 9) ; les températures minimales décadaires varient en moyenne de 17,2°C en début septembre à 3,8°C en fin janvier, soit une gamme de variation de 13,4°C qui est similaire à celle des températures maximales.

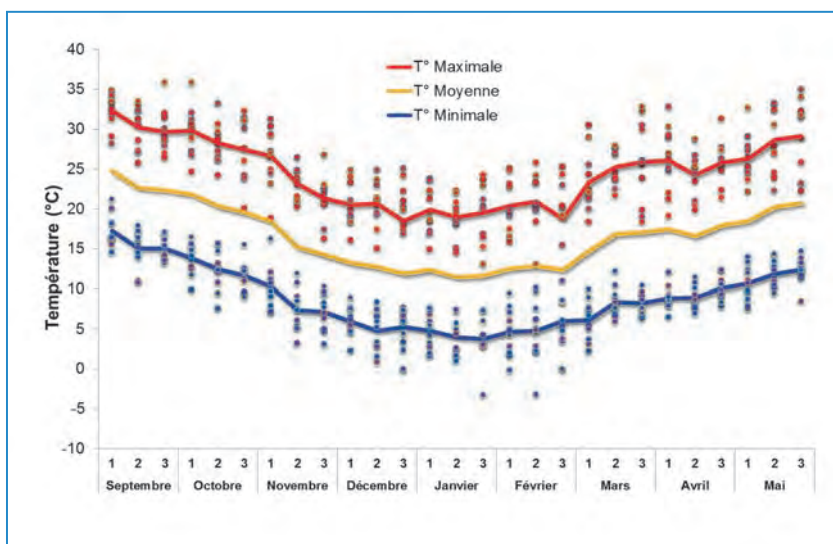


Figure 9 : Moyennes des températures maximales (courbe en rouge), moyenne (courbe en jaune) et minimales (courbe en bleu) décennales au cours de la saison de culture des céréales. Les points correspondent aux valeurs des températures maximales (en rouge) et minimales (en bleu), de 1999 à 2009.

#### 4. PLUVIOMÉTRIE

##### 4.1. VARIATION SPATIALE DE LA PLUVIOMÉTRIE

La première carte des pluies du Maroc, revient au géographe allemand Theobald Fischer, et date de 1900 (Fischer, 1900). Elle comprenait certaines erreurs dues au manque d'observations météorologiques et aux moyens techniques de l'époque. Plusieurs cartes pluviométriques ont été par la suite élaborées, avec divers degrés de précision (Augustin, 1921 ; Jury et Dedebar, 1924 ; Roux *et al.*, 1949). L'ensemble de ces cartes montre qu'il existe une très forte hétérogénéité spatiale de la pluviométrie annuelle au Maroc. Cette hétérogénéité était déjà illustrée dans le premier travail d'ensemble sur la pluviométrie du Maroc, réalisé par Augustin Bernard (1921).

Cet auteur a réalisé une classification de la végétation, en fonction de la pluviométrie totale de la saison : régions à végétation spontanée facilement cultivable pourvu que les conditions de sol et de relief soient favorables ( $> 400$  mm), régions intermédiaires cultivables lorsque la pluviométrie est bien répartie et les sols favorables ( $300 < < 400$  mm), régions steppiques ( $200 < < 300$  mm) et Sahara ( $< 200$  mm).

Une carte de pluviométrie annuelle à base de données interpolées, pour couvrir tout le territoire national sans discontinuité (Hijmans *et al.*, 2005), est présentée en Figure 10.

Cette figure montre l'hétérogénéité spatiale de la pluviométrie, pouvant varier de 13 mm au Sahara à plus de 1.000 mm à Tanger ainsi qu'une forte pluviométrie sur le moyen Atlas et le nord-ouest. Elle illustre une fois encore le gradient de pluviométrie croissant avec la latitude et l'altitude. Dans la Figure 10, la pluviométrie semble surestimée dans les hauts-plateaux du Maroc oriental, entre Oujda et Bouarfa. Dans cette zone, comme dans toutes les régions du globe qui sont accidentées et faiblement pourvues en stations climatiques, les erreurs d'interpolation de la pluviométrie sont élevées (Hijmans *et al.*, 2005).

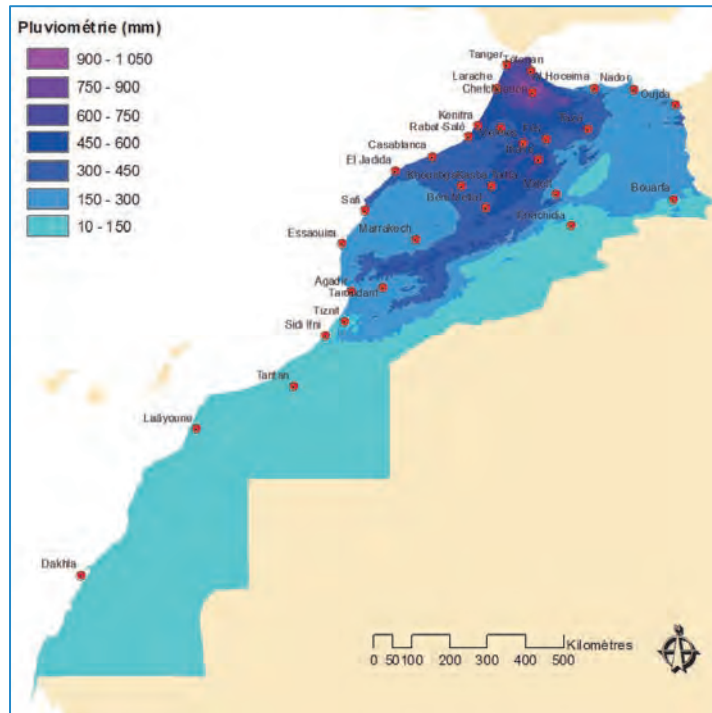


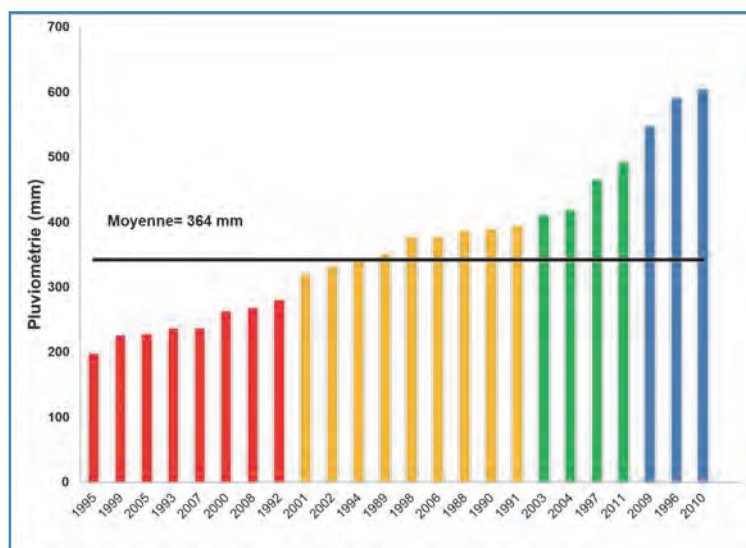
Figure 10 : Moyenne de la pluviométrie cumulée de septembre à avril (Carte réalisée à partir des données [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org) ; Hijmans *et al.*, 2005). Les points en rouge indiquent les principales villes marocaines.

#### 4.2. VARIATION INTERANNUELLE DE LA PLUVIOMÉTRIE

À l'échelle nationale, durant les 25 dernières années, de 1988 à 2011, la pluviométrie cumulée sur la campagne agricole, entre les mois de septembre à mai et calculée arithmétiquement à partir des données des 35 stations synoptiques utilisées, s'élève à 364 mm. Elle a varié de 198 mm (en 1994-1995) à 610 mm (en 2009-2010).

La variation de la moyenne nationale de la pluviométrie est très importante, d'un rapport de 1 à 3, soit 300% de variation (Figure 11). Les campagnes agricoles peuvent être groupées en 4 classes de pluviométrie ayant les fréquences suivantes:

1. De 200 à 300 mm : 8 campagnes (1991-1992, 1992-1993, 1994-1995, 1998-1999, 1999-2000, 2004-2005, 2006-2007 et 2007-2008) ;
2. De 300 à 400 mm : 9 campagnes (1987-1988, 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991, 1993-1994, 1997-1998, 2000-2001, 2001-2002 et 2005-2006) ;
3. De 400 à 500 mm : 4 campagnes (1996-1997, 2002-2003, 2003-2004 et 2010-2011) ;
4. Supérieure à 500 mm : 3 campagnes (1995-1996, 2008-2009 et 2009-2010).



**Figure 11 : Variation interannuelle de la pluviométrie cumulée entre septembre et mai, durant la période 1988-2012.**

*La campagne agricole démarre le premier septembre de l'année et se termine à la fin du mois de mai de l'année suivante. Les campagnes agricoles sont présentées par ordre croissant de pluviométrie, et groupées en 4 classes de pluviométrie (200 à 300 mm, 300 à 400 mm, 400 à 500 et, supérieur à 500 mm).*

Cependant, cette moyenne arithmétique nationale peut être biaisée car les 35 stations synoptiques utilisées ne sont pas toutes localisées dans les zones agricoles du Maroc, quelques-unes se trouvant en zones montagneuses, pastorales et sahariennes (Figure 12). Ces stations ne représentent donc pas uniquement les conditions climatiques régnant sur la céréaliculture. De plus, ces stations ne sont pas réparties de façon uniforme, beaucoup étant situées le long des côtes atlantiques.



Une meilleure couverture nationale en stations climatique améliorerait donc la connaissance du climat marocain et de ses effets sur l'agriculture.

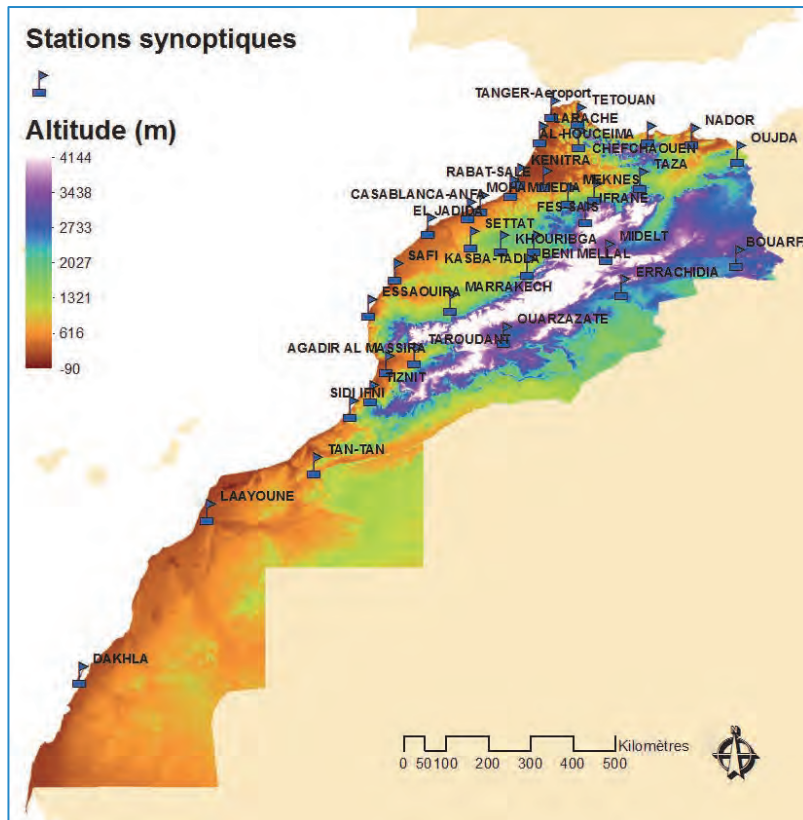


Figure 12 : Localisation des 35 stations synoptiques utilisées, sur fond de carte d'altitude réalisée à partir des données radar « Shuttle Radar Topography Mission » (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

Pour pallier en partie ce biais, la DMN a adapté pour le Maroc la méthode AURELHY<sup>32</sup> (Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydro-météorologie), d'interpolation et spatialisation des données de précipitation provenant des stations synoptiques afin de couvrir aussi les espaces entre les

<sup>32</sup> La méthode AURELHY utilise le relief pour améliorer la cartographie des précipitations. La méthode s'articule autour des 3 points suivants: (1) Reconnaissance automatique de la liaison statistique existant entre les précipitations et le relief environnant; (2) Utilisation optimale de cette liaison statistique aux points où l'on ne dispose pas de valeur mesurée; (3) Génération d'une carte régionale des précipitations, intégrant les effets dus au relief.

stations<sup>33</sup>. Initialement développée par Météo-France (Bénichou et Le Breton, 1987), la DMN l'a adaptée aux conditions marocaines, pour produire une cartographie de la pluviométrie à un pas de temps décadaire sur toute l'étendue du territoire national. Cette méthode est en cours d'intégration dans le système national de suivi de la campagne agricole et de prédiction de la récolte céréalière, appelé « CGMS\_MA » (voir chapitre VII). Il est possible alors à partir de cette interpolation de calculer la pluviométrie uniquement pour les zones agricoles en utilisant un masque agricole. De plus, la DMN est engagée dans un programme d'achat de stations synoptiques afin d'améliorer la couverture du pays.

#### 4.3 VARIATION SAISONNIÈRE DE LA PLUVIOMÉTRIE

L'essentiel de la pluviométrie au Maroc est reçu entre les mois de septembre et mai, les mois de juin, juillet et août étant en général secs (Figure 13). La distribution intra-annuelle de la pluviométrie est très aléatoire, avec une très grande disparité de pluviométrie saisonnière du sud vers le nord et de l'ouest vers l'est. La pluviométrie augmente proportionnellement et de manière plus importante en hiver que durant le reste de l'année, en allant des régions arides vers les régions humides.

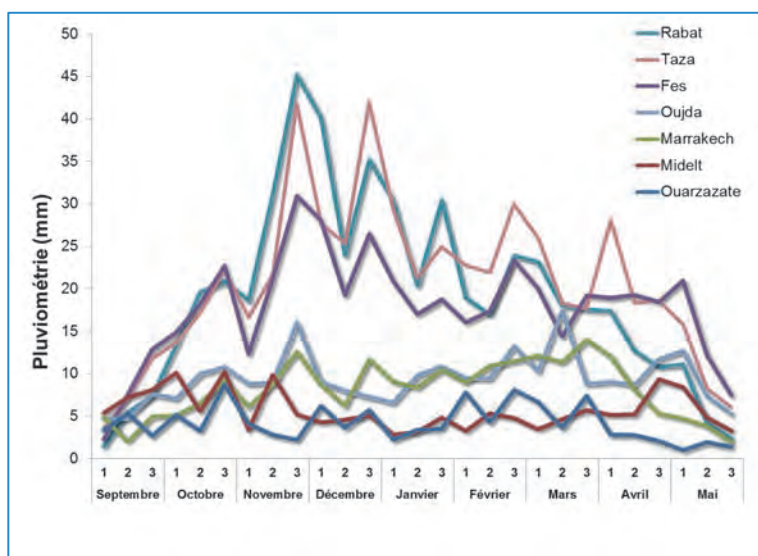


Figure 13 : Exemples de distribution de la pluviométrie décadaire au cours de la campagne agricole, pour quelques stations synoptiques contrastées (moyennes de 1988 à 2010).

<sup>33</sup> Il est à priori possible d'interpoler les données de pluviométrie provenant des stations climatiques au moyen des images NDVI, en raison de la forte corrélation entre ces deux variables. C'est le principe de la méthode « *Satellite enhanced data interpolation* » (SEDI) développée par la FAO dans le logiciel WinDisp (version 4).

<http://www.fao.org/gIEWS/french/windisp/hist.htm>.

#### 4.3. 1 ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE LA PLUVIOMÉTRIE DÉCADAIRE

La variation saisonnière de la pluviométrie peut être modélisée statistiquement, à partir de l'analyse fréquentielle de ses valeurs décadaires<sup>34</sup>. L'analyse fréquentielle est une approche statistique<sup>35</sup>, indépendante du type de culture considéré, qui permet de modéliser ou de capter les contours essentiels de la distribution de la pluviométrie. L'analyse fréquentielle de la pluviométrie détermine les probabilités (ou chances) qu'une valeur de la pluviométrie (décadaire ou mensuelle) se réalise sur la base d'une longue série d'observations pluviométriques. C'est donc un moyen purement statistique qui permet d'aider à la prise de décision en agriculture (Jlibene et Balaghi, 2009).

L'analyse fréquentielle décadaire montre que la distribution intra-annuelle de la pluviométrie est uni-modale, concentrée en hiver, avec un pic autour des mois de novembre, décembre et janvier (Figure 14). L'analyse fréquentielle permet aussi de constater que la pluviométrie est plutôt concentrée en automne, montrant ainsi l'importance de la réussite des opérations de semis pour la valorisation de l'eau de pluie et, par voie de conséquence, l'amélioration des rendements agricoles. Les pluies d'automne servent à reconstituer les réserves en eau des sols après la période sèche et chaude de l'été. La structure bimodale de la pluviométrie enregistrée avant la décennie 1980 (Balaghi, 2000) a disparu après le changement climatique des années 1980. Des pics moins importants sont observés aux mois d'octobre et mars. En été, les pluies sont très rares et surviennent sous forme d'orages, surtout à proximité des chaînes montagneuses de l'Atlas. L'utilité des fortes chutes pluies est proportionnelle à la capacité de conservation de l'eau dans les sols. Les pluies abondantes sont plus avantageuses dans les sols profonds, à texture moyenne ou lourde que dans les sols légers ou mal drainés (Roux, 1938). Dans ces derniers types de sol, la production agricole est meilleure lorsque la pluviométrie est bien répartie au cours de l'année, en raison de la faible capacité de rétention en eau.

---

<sup>34</sup> Il faut garder à l'esprit que les fréquences associées à la pluviométrie d'une décade donnée sont indépendantes de celles des autres décades.

<sup>35</sup> On considère en analyse fréquentielle, que les observations sont un échantillon représentatif du climat à étudier, hypothèse impliquant la stationnarité des séries chronologiques (Péguy, 1983).

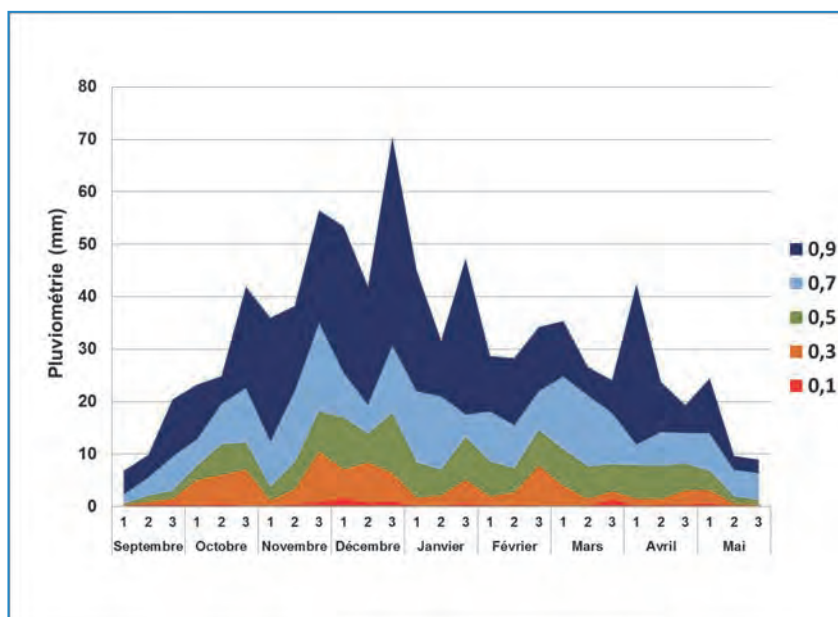


Figure 14 : Distribution de la pluviométrie, au niveau national, pour 5 niveaux de fréquence (0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9) à partir des données de 1988 à 2011.

Les précipitations sont distribuées de manière asymétrique par rapport à leur médiane, les campagnes peu pluvieuses étant plus nombreuses que les campagnes humides (distribution statistique non Gaussienne). Des exemples de distribution de la pluviométrie annuelle des stations de Meknès, Khémisset, Settat et Safi sont donnés en Figure 15 (Balaghi *et al.*, 2005). La pluviométrie durant la saison de culture (de septembre à juin), suit une loi de distribution théorique non Gaussienne, selon le test du  $\chi^2$  (Snedecor et Cochran, 1989). La distribution est de type Gamma pour Meknès (1932 à 2004) et Log-Logistique pour Khémisset (1986 à 2004), Settat (1910 à 2004) et Safi (1901 à 2004). La distribution de la pluviométrie est distribuée de façon plus uniforme à Meknès que dans les trois autres provinces. Les campagnes à pluviométrie faible sont plus fréquentes au fur et à mesure que l'on se dirige vers le sud du pays. La distribution asymétrique de la pluviométrie montre les limites de l'utilisation de la moyenne pluviométrique pour caractériser le climat à l'échelle provinciale au Maroc.

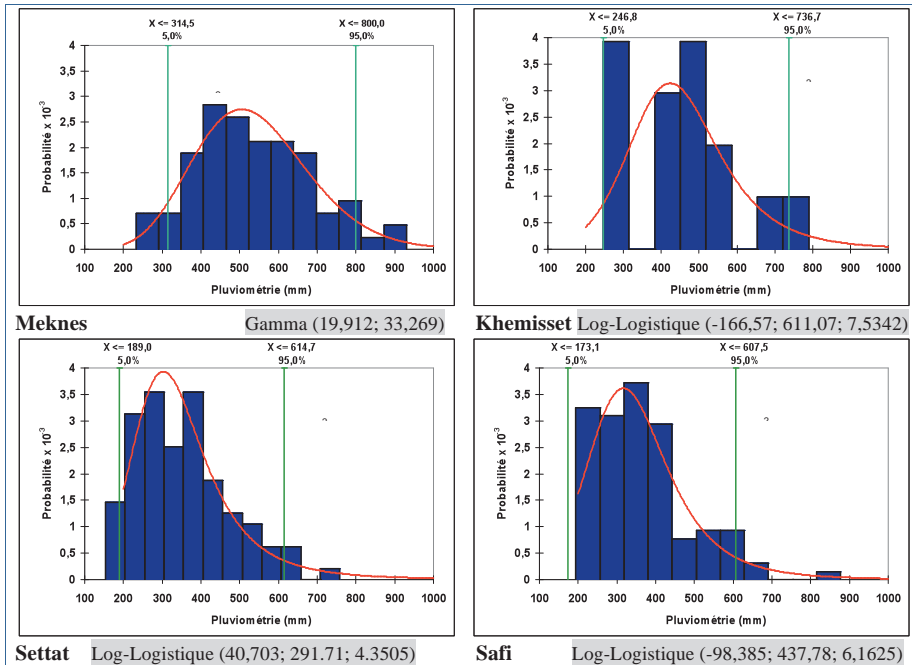


Figure 15 : Distribution de la pluviométrie annuelle (de septembre à juin) à Meknès (1932-2004), Khémisset (1986-2004), Settât (1910-2004) et Safi (1901-2004). La courbe rouge représente l'ajustement de la distribution observée à la distribution théorique (Balaghi *et al.*, 2005).

#### 4.3.2 APPROXIMATION LINÉAIRE DU CUMUL PLUVIOMÉTRIQUE DÉCADAIRE

La représentation de la pluviométrie décadaire en termes de cumul, à partir du début de la campagne agricole (en septembre), permet de procéder à sa modélisation. En effet, la pluviométrie décadaire, cumulée au cours de la saison agricole (à partir de septembre), progresse de façon quasi-linéaire (Figure 16), avec des coefficients de détermination ( $R^2$ ) supérieurs à 91%. Ce rythme d'accumulation détermine la pluviométrie totale de la campagne agricole, avec un coefficient de détermination proche de l'unité ( $R^2 = 97\%$ ).

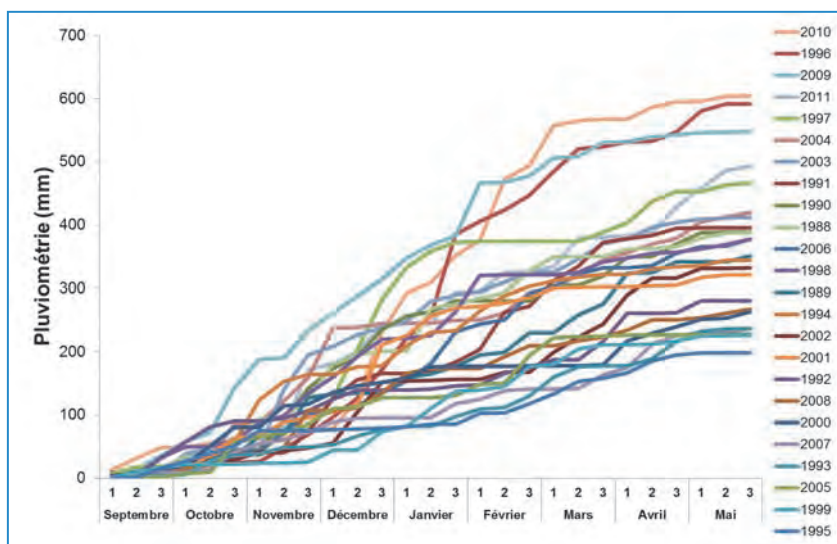


Figure 16 : Pluviométrie décadaire cumulée de septembre à mai à l'échelle nationale. Les campagnes agricoles sont classées par ordre décroissant de pluviométrie.

Étant donné la quasi-linéarité de la pluviométrie décadaire cumulée, il est possible d'ajuster un modèle de régression linéaire. Les  $R^2$  de ces modèles sont très élevés, dépassant les 90% (Tableau 3). À titre d'exemple, la campagne 1988-1989 a enregistré une pluviométrie qui s'accumule régulièrement au rythme de 14,94 mm/décade, avec  $R^2$  très élevé (99%). Des  $R^2$  relativement moins élevés, qui peuvent descendre en dessous de 95%, indiquent la présence d'épisodes de sécheresse.

Le rythme de l'accroissement décadaire de la pluviométrie, à partir de septembre, est mesuré par la pente de la droite de régression linéaire en fonction des décades. Il varie de 7,64 mm/décade dans le cas de la sécheresse historique de 1994-1995 à 28,63 mm/décade en 2009-2010 dans le cas de la campagne la plus pluvieuse dans la série des campagnes postérieures à 1980 (année de rupture et d'annonce du changement climatique au Maroc).

**Tableau 3 : Modèles de régression linéaire appliqués à la pluviométrie décadaire cumulée au cours de la campagne agricole (de septembre à mai) à l'échelle nationale.**

*Les campagnes agricoles (année de récolte) sont classées par ordre croissant de pluviométrie au totale.*

Campagne	Pluviométrie (mm)	Ordonnée à l'origine (mm)	Pente (mm/décade)	R <sup>2</sup>
1995	198,2	-4,89	7,64	0,96
1999	226,9	-34,77	10,50	0,95
2005	228,4	-12,22	10,30	0,95
1993	236,9	-31,75	9,73	0,97
2007	237,1	-18,29	9,29	0,98
2000	263,6	13,36	9,50	0,93
2008	268,1	-16,59	11,48	0,97
1992	280,3	7,73	10,28	0,96
2001	320,6	-13,33	14,61	0,91
2002	332,2	-47,55	14,20	0,96
1994	344,4	-2,77	14,91	0,94
1989	350,9	-36,57	14,94	0,99
1998	377,3	-5,67	16,07	0,95
2006	377,5	-45,51	16,80	0,98
1988	387,7	-17,09	17,04	0,96
1990	388,5	-20,02	16,75	0,95
1991	395,5	-60,24	18,36	0,97
2003	411,3	-12,26	17,80	0,95
2004	419,2	-10,44	16,84	0,95
1997	466,4	-37,47	21,02	0,91
2011	492,9	-34,67	19,85	0,98
2009	547,9	6,93	23,61	0,95
1996	591,3	-109,58	28,13	0,94
2010	604,8	-88,54	28,63	0,93

Le rythme d'accroissement de la pluviométrie décadaire est, en moyenne, de (Figure 17):

- **9,82 mm/décade** pour les campagnes agricoles à pluviométrie comprise entre 200 et 300 mm (1991-1992, 1992-1993, 1994-1995, 1998-1999, 1999-2000, 2004-2005, 2006-2007 et 2007-2008) ;
- **15,97 mm/décade** pour les campagnes agricoles à pluviométrie comprise entre 300 et 400 mm (1987-1988, 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991, 1993-1994, 1997-1998, 2000-2001, 2001-2002 et 2005-2006) ;
- **18,88 mm/décade** pour les campagnes agricoles à pluviométrie comprise entre 400 et 500 mm (1996-1997, 2002-2003, 2003-2004 et 2010-2011) ;
- **26,79 mm/décade** pour les campagnes agricoles à pluviométrie supérieure à 500 mm (1995-1996, 2008-2009 et 2009-2010).

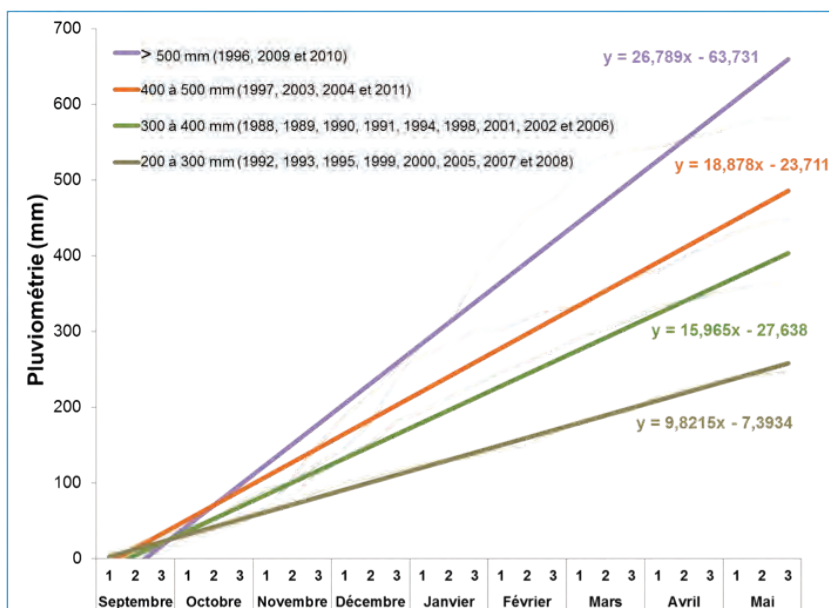


Figure 17 : Rythme moyen d'accroissement (x, en mm/décade) de la pluviométrie décadaire de 1988 à 2011, pour 4 classes de pluviométrie (200 à 300, 300 à 400, 400 à 500 et > 500 mm), à l'échelle nationale.



## 4.3.3 VARIATION SPATIO-SAISONNIÈRE DE LA PLUVIOMÉTRIE

Il est possible également de modéliser la distribution de la pluviométrie intra-annuelle en fonction du volume pluviométrique annuel ou bien de la latitude, la pluviométrie annuelle étant proportionnelle à la latitude. En Figure 18 est représentée la pluviométrie mensuelle, des années de 1988 à 2005, classées en ordre croissant de pluviométrie. Cette figure a été réalisée par interpolation spatiale sur Système d'Information Géographique (SIG). Sur le plan spatial, la pluviométrie annuelle varie avec la latitude, augmentant en volume du sud vers le nord. Quatre classes de pluviométrie sont distinguées, du sud vers le nord: l'aride (< 250 mm), le semi-aride (250 < < 350 mm), le subhumide (350 < < 450 mm), et l'humide (> 450 mm) (Jlibene, 2011).

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	Total
1996	9,9	14,3	44,5	101,7	212,8	60,7	76,3	22,6	44,4	587,2
1997	17,8	18,2	43	366,3	185,4	2,1	14,2	64	13,5	465,4
2004	2,9	82,8	73,1	257,7	5,6	43,6	50,3	33,9	41,3	419,2
2003	6,8	39,4	148,7	43,7	51,8	35	44,9	33,9	7,1	411,3
1991	10,8	25,1	35,1	33,2	17,8	87,2	100,6	21,9	0,7	392,4
1988	15,8	41,3	68,8	78,2	74,1	62,9	21,9	15,3	22,4	387,7
1990	9,2	34,8	94,8	91,8	45,4	7,1	39,4	49,3	19	384,9
1998	31,8	27,3	74,6	85,9	43,9	58,5	19,8	15,9	19,7	377,4
1989	2,4	31,2	93,9	6,3	42,8	53,8	45,4	66	9,1	350,9
1994	6,3	49,1	108,1	13,9	55,4	69,7	18,5	11,5	10,8	343,3
2002	15,4	13,4	19,2	104,4	3,7	11,5	76,3	72,3	16	332,2
2001	10,3	52,8	32,5	115,2	58,4	16,3	17	2,3	15,9	320,6
1992	32,4	59,1	15,8	32	6,5	29,2	40,9	45,8	17,7	279,4
2000	12,3	68	37	34,2	25,1	0,7	1,9	60,6	23,7	263,6
1993	3,5	31,5	13,5	26,8	20,1	32,2	48,6	37,8	19,8	233,9
2005	1,7	54,3	29,4	42,2	3,3	62,9	31,4	1,4	1,8	228,4
1999	16,8	5,4	3,4	47,5	64,1	38,9	35,4	5	10,3	226,9
1995	15,3	35,6	23,4	4	5,8	32,3	38,5	37,3	2,8	196,0

Figure 18 : Distribution de la pluviométrie mensuelle en fonction du volume pluviométrique au cours de la campagne agricole au Maroc (données de 1988 à 2005).

Les campagnes agricoles sont classées des plus humides aux plus sèches. Les isohyètes de pluviométrie sont représentés par des couleurs dégradées de bleu, du plus clair (faible pluviométrie) au plus foncé (forte pluviométrie).

De la même manière que pour la variation interannuelle, la variation spatiale de la distribution intra-annuelle a été modélisée. La Figure 19 montre la distribution intra-annuelle de la pluviométrie des stations se trouvant le long de la côte Atlantique du Maroc. On observe en caractéristique générale, que la forme de cette distribution ne change pas, quelle que soit la latitude. Il y a cependant un affaissement du pic de pluviométrie d'hiver en allant du nord vers le sud du pays.

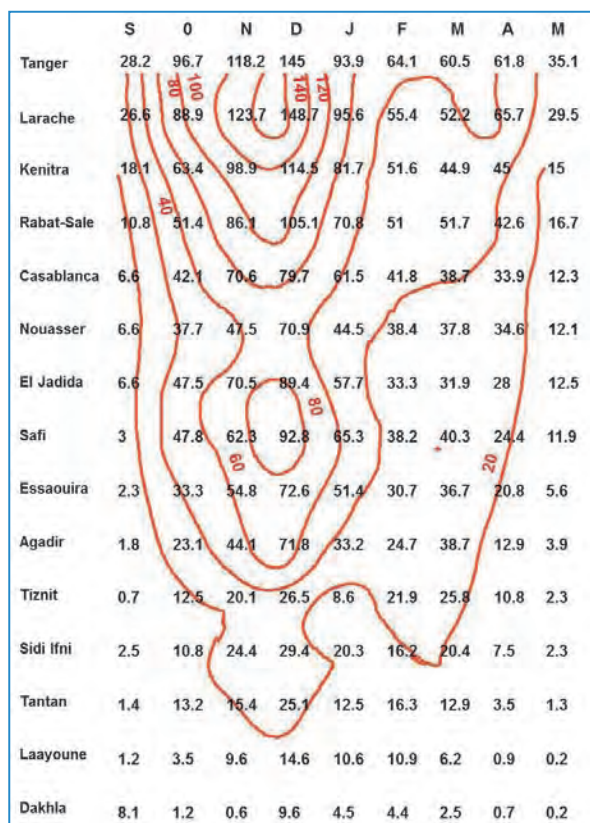


Figure 19 : Distribution de la pluviométrie mensuelle au niveau des stations synoptiques de la côte Atlantique (données de 1988 à 2005). Les stations sont classées par ordre latitudinal. Les lignes rouges représentent les isohyètes.

## 5. SAISON DE CULTURE

Selon le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussien (1953), la saison de croissance des cultures des céréales, s'étend en moyenne d'octobre à mars à l'échelle nationale, pour la période 1999 à 2009 (Figure 20). Selon ce diagramme, la saison de culture s'étend sur l'ensemble des mois pendant lesquels la pluviométrie (mm) est supérieure au double de la température (°C). Ce diagramme intègre donc à la fois la pluviométrie et la température, qui sont les deux facteurs climatiques essentiels qui déterminent la croissance et le développement des plantes au Maroc.

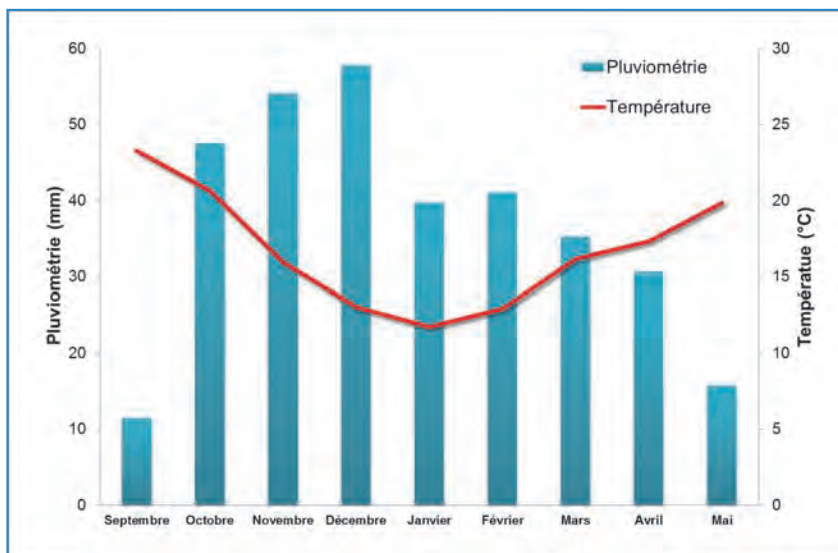


Figure 20 : Diagramme ombrothermique à l'échelle nationale. (Pluviométrie et température moyennes de 1999 à 2009).

Cependant, la durée de la saison de culture varie de façon importante selon la latitude (Figure 21). Dans la région Atlantique du pays, située entre les chaînes de montagnes et l'océan Atlantique, elle augmente de façon proportionnelle avec la latitude, du sud vers le nord du pays. L'indice ombrothermique augmente de façon exponentielle avec la latitude, variant de moins de 1 à Dakhla à plus de 6 à Chefchaouen. Le caractère exponentiel résulte de la réponse plus que proportionnelle de l'indice à la latitude, en raison de l'augmentation de la pluviométrie et de la diminution de la température. La saison de culture se rétrécit en allant vers le sud, jusqu'à devenir inexistante dans les provinces sahariennes (Tableau 4).

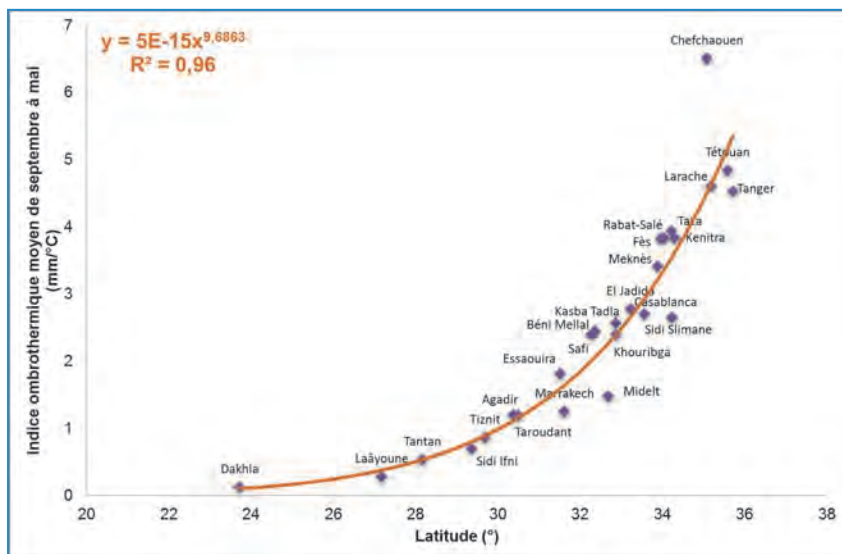


Figure 21 : Relation entre l'indice ombrothermique moyen (de septembre à mai) et la latitude, pour différentes stations synoptiques. (Pluviométrie et température moyennes mensuelles, de 1999 à 2009).

Dans les zones arides du sud marocain, la saison de croissance est quasi inexistante. Partout dans le reste du pays, elle commence en octobre, avec l'arrivée des premières pluies de la saison agricole (Tableau 4). Elle est de plus en plus longue, en allant du sud vers le nord, finissant, par exemple, en mars à Khouribga et en avril à Chefchaouen. La saison est également plus longue en altitude, finissant en mai à Ifrane (station de montagne).

**Tableau 4 : Indice ombrothermique (P/T, en mm/°C), à l'échelle des stations synoptiques.**

Les indices inférieurs à 2 indiquent des mois secs (en orange) et ceux qui sont supérieurs à 2 indiquent des mois humides (en vert). Les stations sont classées par ordre décroissant de l'indice. (Pluviométrie et température moyennes mensuelles, de 1999 à 2009).

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Latitude (Nord)	Longitude (Ouest)	Altitude (mètres)
Ifrane	1,3	6,8	15,7	33,1	26,3	20,3	10,5	9,1	4,1	33 ° 30'	5 ° 10'	1663
Chefchaouen	1,2	5,3	7,8	14,3	8,0	9,6	5,5	5,6	1,3	35 ° 05'	5 ° 18'	300
Tétouan	1,8	5,2	6,4	7,9	5,5	6,7	4,6	4,0	1,5	35 ° 35'	5 ° 20'	5
Larache	1,0	4,9	6,5	9,4	6,5	3,8	4,4	3,5	1,5	35 ° 11'	6 ° 08'	47
Tanger	1,4	5,0	5,8	8,1	6,4	4,7	4,4	3,5	1,6	35 ° 43'	5 ° 54'	15
Taza	0,8	3,1	4,7	7,2	6,3	5,7	3,0	3,3	1,3	34 ° 13'	4 ° 00'	509
Kenitra	0,7	3,3	6,4	7,1	6,1	4,3	3,3	2,3	1,1	34 ° 18'	6 ° 36'	5
Rabat-Salé	0,5	3,4	6,6	6,9	5,7	4,6	3,3	2,3	1,2	34 ° 03'	6 ° 46'	75
Fès	0,8	3,6	4,6	6,5	6,5	4,8	2,7	3,5	1,4	33 ° 58'	4 ° 59'	571
Meknès	0,5	2,8	4,0	6,9	5,4	4,6	2,7	2,7	1,2	33 ° 53'	5 ° 32'	548
El Jadida	0,3	2,7	4,1	6,3	3,7	3,3	2,4	1,5	0,7	33 ° 14'	8 ° 31'	27
Casablanca	0,4	2,6	4,5	4,3	4,5	3,2	2,3	2,0	0,6	33 ° 34'	7 ° 40'	56
Nador	0,6	3,2	4,3	3,1	2,6	3,7	2,9	2,5	1,0	35 ° 09'	2 ° 55'	7
Sidi Slimane	0,3	2,3	4,1	5,2	4,4	2,5	2,3	1,9	1,0	34 ° 14'	6 ° 03'	52
Al Hoceima	0,5	3,8	4,6	2,8	3,0	3,0	2,2	2,2	1,0	35 ° 11'	3 ° 51'	12
Kasba Tadla	0,2	1,6	3,5	4,2	4,6	3,8	2,4	1,8	1,1	32 ° 52'	6 ° 16'	507
Béni Mellal	0,2	1,8	3,6	4,3	3,7	3,3	2,5	1,8	0,9	32 ° 22'	6 ° 24'	468
Safi	0,1	2,1	3,6	5,1	3,0	3,7	2,2	1,3	0,5	32 ° 17'	9 ° 14'	43
Khouribga	0,2	1,3	3,3	5,2	4,0	3,6	2,0	1,2	0,7	32 ° 52'	6 ° 58'	770
Oujda	0,4	1,8	3,2	2,9	3,2	2,7	2,1	1,6	1,1	34 ° 47'	1 ° 56'	465
Essaouira	0,2	1,6	2,2	3,5	2,5	3,1	1,9	1,1	0,3	31 ° 31'	9 ° 47'	7
Midelt	0,8	2,1	1,7	2,7	1,2	1,9	1,0	1,0	0,9	32 ° 41'	4 ° 44'	1508
Marrakech	0,2	1,1	1,7	1,9	1,8	1,7	1,4	1,0	0,5	31 ° 37'	8 ° 02'	464
Agadir	0,1	0,9	1,8	2,6	1,2	2,1	1,5	0,6	0,1	30 ° 23'	9 ° 34'	23
Taroudant	0,1	0,8	1,8	2,7	0,9	2,2	1,3	0,7	0,1	30 ° 30'	8 ° 49'	264
Bouarfa	0,7	2,0	1,5	1,4	1,4	1,4	1,0	0,8	0,4	32 ° 34'	1 ° 57'	1142
Tiznit	0,1	0,6	1,2	1,6	1,0	1,5	1,1	0,6	0,1	29 ° 41'	9 ° 44'	260
Errachidia	0,4	1,6	1,1	0,6	1,2	1,2	0,6	0,5	0,4	31 ° 56'	4 ° 24'	1037
Sidi Ifni	0,1	0,7	1,4	1,1	0,8	1,1	0,8	0,3	0,1	29 ° 22'	10 ° 11'	50
Tantan	0,0	0,8	0,5	0,8	0,9	1,1	0,6	0,1	0,0	28 ° 10'	10 ° 56'	45
Laâyoune	0,0	0,1	0,2	0,6	0,6	0,8	0,1	0,1	0,0	27 ° 10'	13 ° 13'	64
Dakhla	0,4	0,2	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	23 ° 43'	15 ° 56'	11

L'indice ombrothermique, spatialisé sur tout le pays à l'aide d'un SIG, permet de cartographier la date de fin de saison agricole, qui varie avec la latitude, entre les mois de mars et mai (Figure 22). La saison agricole s'arrête en moyenne en mars, dans toute la zone située entre Agadir et Bouarfa. Elle s'arrête en avril dans une zone plus restreinte englobant les zones côtières, du nord jusque Safi, les plaines du centre du pays ainsi que les zones montagneuses. La saison continue jusqu'en mai, uniquement en altitude. Sur la Figure 22, on peut remarquer la fin de saison particulière dans les zones arides des Rehamna<sup>36</sup> et de Chemaia (limitrophe aux provinces de Marrakech, Safi et Chichaoua). Cette zone, qui correspond au plateau des phosphates du Maroc, se différencie dans les cartes pluviométriques ou agro-climatiques réalisées sur le Maroc (Göbel *et al.*, 2007 ; Sebbar *et al.*, 2011). On la voyait déjà dans la carte pluviométrique du Maroc réalisée par Augustin en 1921 (Augustin, 1921).

L'indice ombrothermique ne tient évidemment pas compte de la réserve en eau des sols qui est susceptible de modifier la durée pendant laquelle les cultures sont dans des conditions favorables d'humidité au niveau racinaire. Les sols à forte capacité de rétention en eau permettent de maintenir les cultures dans des conditions d'humidité favorable, au niveau des racines, sur une période plus longue que celle indiquée dans la Figure 22 et permettent donc de rallonger la saison de culture.

La saison de culture, déterminée par l'indice ombrothermique, correspond parfaitement à celles des cultures annuelles d'automne au Maroc, et celle des céréales en particulier. La campagne agricole peut être divisée en trois périodes de 4 mois chacune : (1) période de préparation des récoltes, du 1<sup>er</sup> septembre au 31 décembre ; (2) période de développement, du 1<sup>er</sup> janvier au 30 avril ; (3) période de récolte, du 1<sup>er</sup> mai au 31 août (Augustin, 1921). Les céréales sont semées en automne, vers le mois de novembre, complétant leur cycle de développement végétatif en hiver et reproductif au printemps. Bien que la saison pluvieuse démarre en octobre, le semis ne peut s'effectuer que durant le mois de novembre, pour des raisons pratiques liées à la facilité de travailler le sol et au bon positionnement du cycle des céréales au sein de la saison pluvieuse. Les semis trop précoces d'octobre, même dans des conditions d'humidité favorable, exposent en effet les céréales aux températures élevées des mois d'octobre et novembre, et donc à une accélération du développement conduisant à une diminution du nombre de talles et un raccourcissement du cycle. Ces deux raisons expliquent pourquoi les rendements sont faibles dans le cas des semis trop précoces d'octobre. En revanche, lorsque les semis sont réalisés en novembre, les précipitations de début de saison (en septembre et en octobre) favorisent l'émergence précoce des mauvaises herbes qui peuvent être ensuite éliminées par les opérations de labour.

La maturité physiologique des céréales, que l'on peut reconnaître par l'arrêt de croissance des grains et le début de leur dessiccation, est atteinte en fin de saison des pluies.

---

<sup>36</sup> Une belle description morphologique du massif de Rehamna et de l'aridité de son climat a été réalisée par De Martonne *et al.* (1924).

La gamme de maturité finale pour la récolte (12% d'humidité) s'étend sur plus de trois mois selon les régions, variant du mois de mai dans les régions du sud (ex. Haouz, Rehamna et Abda) à août dans les régions de montagne. Malheureusement, les agriculteurs ne sont pas suffisamment équipés pour récolter plus tôt dans la saison, à des niveaux d'humidité des grains supérieurs à 12%. En majorité, ils attendent l'arrivée des moissonneuses batteuses qui remontent du sud du pays, où les récoltes débutent au Maroc.

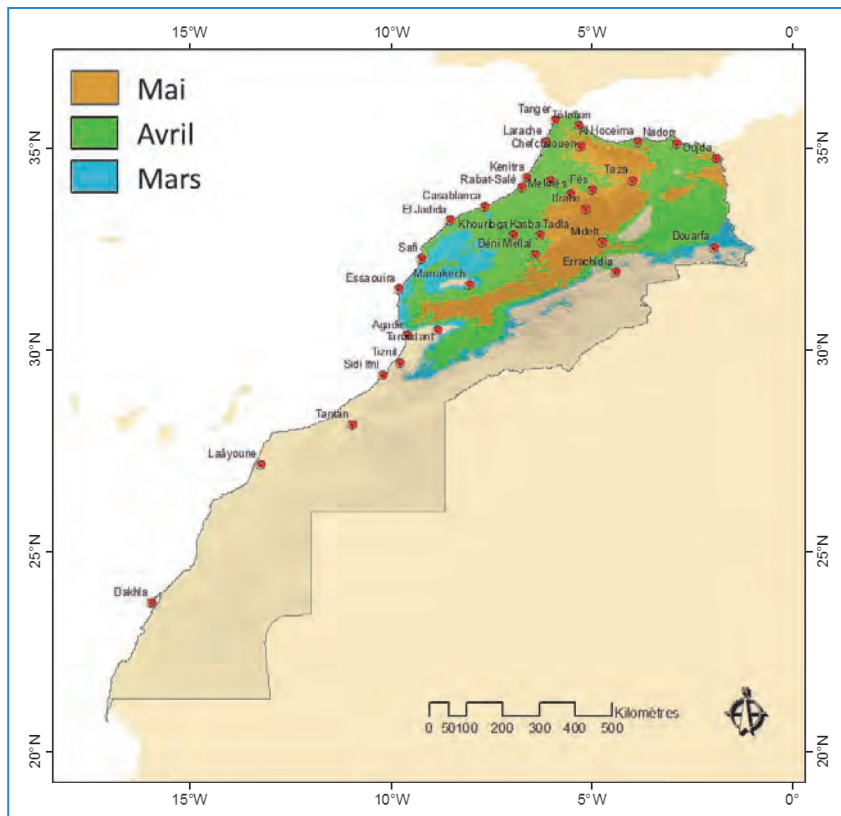
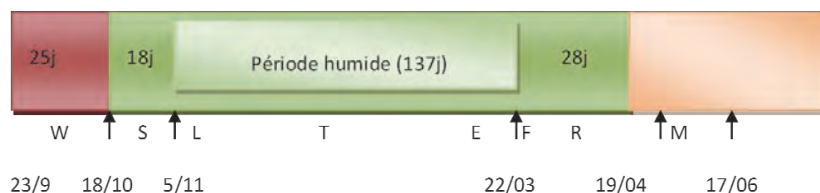


Figure 22 : Aires géographiques dans lesquelles la saison céréalière continue jusqu'en mars (ensemble des zones en couleurs bleu, vert et marron), en avril (ensemble des zones en couleurs vert et marron) et en mai (zone en couleur marron), selon l'indice ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1953). (Carte réalisée à partir des données [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org); Hijmans et al., 2005).

## 6. LONGUEUR DE LA PÉRIODE DE CROISSANCE

L'évapotranspiration a été utilisée par la FAO (1978) pour déterminer dans le temps les périodes d'intervention culturale, essentiellement le travail du sol, la période de croissance, la période humide, et les périodes de semis et de maturation du grain. Cette méthode a été utilisée par Jlibene et Chafai (2002) pour déterminer les phases culturales du blé dans le nord-ouest marocain.



**Figure 23 :** Période de préparation du sol (W), période des semailles (S), période humide pendant laquelle s'effectue la levée (L), le tallage (T), et l'épiaison (E), et période de croissance où démarre le semis avant la période humide et la floraison (F) et remplissage du grain après ; la période de maturation du grain (M), leurs durées et dates de début et fin, respectives (Jlibene et Chafai, 2002). Les données utilisées sont celles de la station Arbaoua représentant le nord-ouest marocain.

Il s'avère, selon cette étude, que pour la culture du blé dans la région du Loukkos (données climatiques d'Arbaoua, Source : ORMVA du Loukkos) les préparations du sol dans cette région doivent être réalisées avant le 18 octobre, les semailles avant le 5 novembre, pour éviter la période humide qui rend difficile l'accès au champ. La floraison du blé se situe vers la fin de la période humide qui commence vers le 5 novembre et se termine le 22 mars de l'année suivante. La croissance végétale démarre vers le 18 octobre et peut s'arrêter vers la troisième décennie du mois d'avril, car la pluviométrie cesse en cette période. Dans cette région, les sols mettent deux mois pour épuiser leurs réserves en eau après la fin de la période de croissance, en raison de la pluviométrie et des capacités de rétention des sols, toutes deux élevées.

Les différentes périodes de culture, déterminées selon la méthode FAO, se résument comme suit :

- Période du travail du sol : de 25 jours, entre le 23 septembre et le 18 octobre ;
- Période de semailles : de 18 jours, entre le 18 octobre et le 5 novembre ;
- Période humide : de 137 jours, entre le 5 novembre et le 22 mars ;
- Période de croissance : de 183 jours, entre le 18 octobre et le 19 avril.



#### IV. ANALYSES DE LA PRODUCTION CÉRÉALIÈRE

*Les trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) sont cultivées dans toutes les provinces et dans toutes les zones agro-écologiques du pays. Cependant, chacune de ces espèces se cultive davantage dans une région que dans une autre en raison, non seulement de sa propre faculté d'adaptation, mais également des critères de productivité et de qualité exigés par le marché. L'exigence de haute productivité a pour conséquence une concentration du blé tendre dans les zones favorables. L'exigence de qualité entraîne une concentration du blé dur dans les zones intermédiaires, et l'exigence de l'alimentation ovine et bovine entraîne une concentration de l'orge dans les zones défavorables où la durabilité du système céréalier est garantie par la diversification de la production. La tendance des rendements céréaliers au cours du temps, qui est la résultante du progrès ou du non-progrès technologique, est significativement positive pour le blé tendre et le blé dur et, négative pour l'orge. L'évolution négative des rendements de l'orge, observée dans les statistiques agricoles, n'est pas entièrement due au manque de progrès génétique réalisé sur cette espèce mais également à la dégradation des conditions de culture. Le progrès technologique, quantifié au niveau national ainsi qu'au niveau des zones agro-écologiques, est pris en compte dans les prédictions agrométéorologiques des rendements céréaliers, dans la suite de ce document.*

##### 1. DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE ET UTILISATION DES CÉRÉALES

La récolte de chacune des trois espèces de céréales d'automne (orge et blé dur et blé tendre) est destinée à des utilisations spécifiques différentes selon l'espèce. Les grains d'orge (*Hordeum vulgare*) sont utilisés principalement (à 97%) dans l'alimentation animale, avec une proportion faible (de 7%) utilisée en alimentation humaine sous forme de galette ou de semoule (Tableau 5). Les grains de blés sont utilisés exclusivement dans l'alimentation humaine, sous deux formes essentielles : le pain et biscuit d'une part et la pâte et semoule de l'autre. Sur le plan industriel, le blé tendre est destiné à la production de pain et de biscuit alors que le blé dur est destiné à la production du Couscous et des pâtes alimentaires. À l'échelle artisanale, les blés font l'objet d'autres utilisations secondaires ; une multitude de produits dérivés sont fabriqués à partir de la farine et du grain du blé.

En raison de la forte demande sur le pain, le blé tendre est l'espèce céréalière qui contribue le plus à la sécurité alimentaire du pays, dont deux tiers de la production est destinée à la consommation humaine, suivi du blé dur qui contribue au quart de la ration céréalière.

La forte demande sur le blé tendre en tant que source de pain a engendré une pression sur la superficie cultivée du blé dur et de l'orge qui ont vu leurs superficies rétrécir et migrer vers les zones plus arides. La forte demande de blé tendre continue de s'accroître en raison de la croissance démographique, alors que la superficie agricole est constante, ce qui limite les alternatives pour la sécurité céréalière du Maroc à la seule amélioration de la productivité.

**Tableau 5 : Les principales utilisations du grain des céréales d'automne (Source : ONICL, 2012).**

Espèce céréalière	Type de Consommation	Contribution à la consommation humaine	Utilisation Principale	Utilisation Secondaire
Blé tendre	100% humaine	67%	Pain et biscuit	Nouilles, autres produits locaux
Blé dur	100% humaine	25%	Pâte et semoule	Pain, autres produits locaux
Orge	93% animale	7%	Aliment de bétail	Semoule, galette

Les céréales d'automne possèdent de larges capacités d'adaptation aux conditions environnementales (climatiques, géographiques et de culture). Elles sont cultivées sur tout le territoire national, principalement dans les zones « *Bour* » des plaines atlantiques, occupant plus de deux tiers des superficies agricoles (Figure 24). Bien qu'elles soient cultivées dans 36 provinces, la production est concentrée dans les régions côtières suivies des régions centrales et montagneuses. Les céréales font partie de la plupart des rotations culturales, en plus de rotations céréales sur céréales, et sont cultivées sur une large gamme de sols, de systèmes de production et d'environnements.

La répartition des superficies céréalières par agrosystème de production se résume comme suit:

- Oasis : les superficies sont insignifiantes ;
- Zones arides et semi-arides : 40% des superficies totales ;
- Zones subhumides et humides : 40% des superficies totales ;
- Zones irrigués : 10% des superficies totales ;
- Zone montagneuses : 10% des superficies totales.

La production est surtout concentrée dans la zone agro-écologique *Favorable* pour le blé tendre (53%) et le blé dur (41%) (Tableau 6). Pour l'orge, la production est répartie sur les zones *Défavorable Sud* (28%), *Favorable* (22%), *Intermédiaire* (21%) et *Défavorable Orientale* (16%). Les superficies suivent la même répartition que la production pour les trois céréales. En revanche, la productivité suit le gradient pluviométrique et le taux d'irrigation.

**Tableau 6 : Répartition des céréales en termes de production, superficie et productivité, à l'échelle des zones agro-écologiques (moyenne de 1990 à 2011).**

Zone agro-écologique	Production (%)			Superficie (%)			Rendement (Qx/ha)		
	Blé tendre	Blé dur	Orge	Blé tendre	Blé dur	Orge	Blé tendre	Blé dur	Orge
Favorable	53	41	22	46	39	17	15,9	13,7	11,7
Intermédiaire	13	25	21	13	23	18	12,7	13,7	10,4
Défavorable Orientale	5	4	16	7	5	15	10,0	8,7	9,3
Défavorable Sud	11	15	28	18	19	36	8,4	9,6	6,9
Montagne	15	12	9	13	12	8	16,8	13,2	10,8
Saharienne	3	3	5	3	2	6	12,9	20,2	6,7

La productivité céréalière (blé tendre, blé dur et orge) est fortement influencée par la pluviométrie, variant dans l'espace et dans le temps : dans l'espace, les régions du nord sont plus productives que celles du sud, variant de l'ordre de 1 à 3,5 ; et dans le temps, le rendement varie de l'ordre de 1 à 5 : 3,6 Qx/ha enregistré durant la campagne agricole 1999-2000 à 18,5 Qx/ha enregistré en 2008-2009 (statistiques agricoles, 1979-2011).

Parmi les provinces les plus représentatives<sup>37</sup> de la productivité des trois céréales à l'échelle nationale on trouve, dans l'ordre : Settat ( $R^2=95\%$ ), El Jadida ( $R^2=92\%$ ), Casablanca ( $R^2=92\%$ ), et Khouribga ( $R^2=87\%$ ). Pour le blé tendre, il s'agit de : Settat ( $R^2=93\%$ ), Casablanca ( $R^2=89\%$ ), Benslimane ( $R^2=89\%$ ) et Taounate ( $R^2=84\%$ ). Pour le blé dur, il s'agit de : Settat ( $R^2=92\%$ ), Casablanca ( $R^2=89\%$ ), Benslimane ( $R^2=86\%$ ) et Rabat ( $R^2=85\%$ ). Pour l'orge, il s'agit de : Khouribga ( $R^2=92\%$ ), Azilal ( $R^2=90\%$ ), Safi ( $R^2=89\%$ ) et Settat ( $R^2=88\%$ ). La production dans ces provinces peut ainsi servir d'indicateurs de la production nationale.

<sup>37</sup> La représentativité est ici mesurée comme la corrélation ( $R^2$ ) entre le rendement des céréales de chaque province avec le rendement national, sur la période récente de 1999-2000 à 2010-2011.

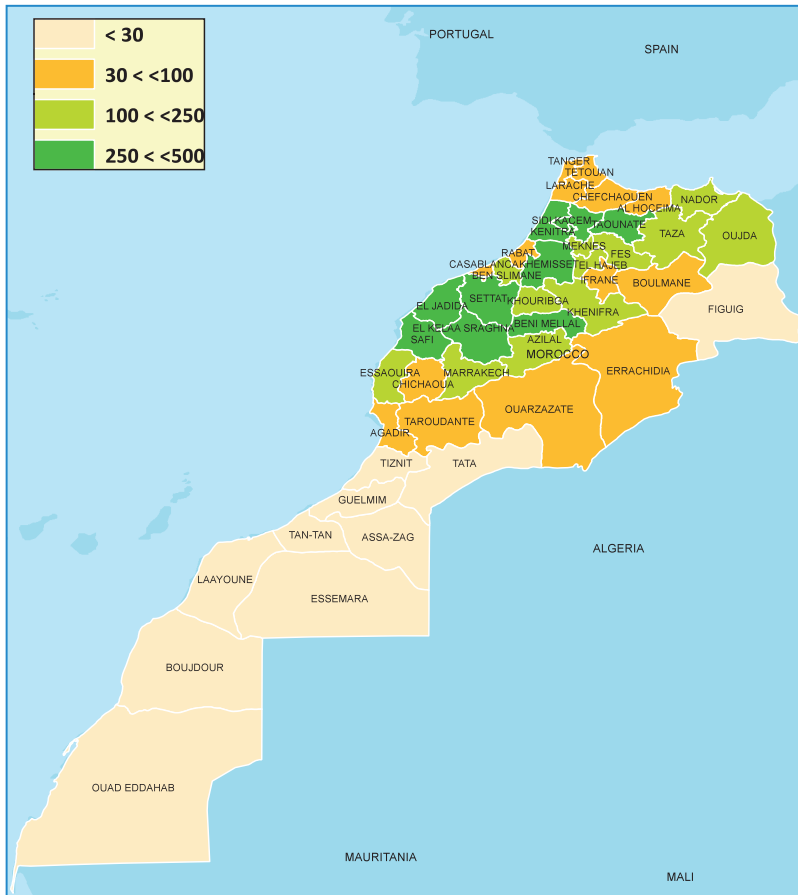


Figure 24 : Production moyenne des céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) par province (x1000 tonnes) (Données de 1990 à 2010).

- La production de blé tendre est concentrée dans les plaines atlantiques du pays, des zones arides jusqu'aux zones humides. Les provinces qui contribuent le plus à la production de blé tendre sont : Béni Mellal (11.4%), Sidi Kacem (10.0%), Kénitra (8.9%), Khémisset (6.7%), El Kalâa des Sraghna (6.0%) El Jadida (5.7%), Settat (5.5%), Taounate (5.3%), Meknès (4.9%) et Fès (4.4%) (Données de 1990 à 2010). Ces dix provinces contribuent à plus de deux tiers (69%) de la production nationale en blé tendre, alors que les autres provinces contribuent chacune à moins de 4 % de la production.

- La production de blé dur est concentrée dans les plaines atlantiques du sud-ouest, en zones semi-arides. Les provinces qui contribuent le plus à la production nationale sont : Settat (12.4%), El Jadida (10.9%), Taounate (9.3%), Taza (7.1%), El Kalâa des Sraghna (6.1%), Safi (6.1%), Beni Mellal (5.1%) et Sidi Kacem (4.4%) (Données de 1990 à 2010). Ces huit provinces assurent 61% de la production nationale en blé dur, alors que les autres provinces contribuent chacune à moins de 4 % de la production.
- La production d'orge est concentrée dans les zones arides et semi-arides et en zones de montagne et marginales. Les provinces qui contribuent le plus à la production nationale sont : Settat (8.4%), El Jadida (7.2%), Safi (6.8%), Nador (6.6%), El Kalâa des Sraghna (6.1%), Essaouira (5.3%), Oujda (4.6%), Khouribga (4.5%), Taza (4.4%) et Marrakech (4.2%) (Données de 1990 à 2010). Ces dix provinces apportent 58% de la production nationale en orge, alors que les autres provinces contribuent chacune à moins de 4 % de la production.

La destination finale du grain produit par chacune de ces trois céréales influence leurs aires géographiques de culture. Le blé tendre est concentré dans les régions où l'humidité est favorable et où la haute productivité est recherchée pour répondre à la forte demande du marché. Le blé dur est concentré dans les régions à climat moins humide, dans la zone agro-écologique *Intermédiaire*, qui est favorable à la production de grain de qualité pastière et semoulière. Une humidité excessive lors de la formation du grain du blé dur, provoque le « mitadinage » un phénomène qui transforme le grain d'un état vitreux (adapté à la production de semoule) à un état farineux. L'orge est ainsi concentrée dans les régions où l'élevage ovin est dominant, c'est-à-dire dans les zones agro-écologiques *Défavorable Sud, Défavorable Orientale et Intermédiaire*.

## 2. PROGRÈS TECHNOLOGIQUE

Le progrès technologique réalisé sur les céréales est indéniable au Maroc. En 1914-1915, année de très forte pluviométrie, Augustin (1921) notait que les rendements des trois céréales d'automne, atteignirent chez les colons Européens : 10 à 12 Qx/ha en blé dur et orge, et 8 à 10 Qx/ha en blé tendre. À l'époque, la faiblesse des rendements du blé tendre, par rapport à ceux de l'orge et du blé dur, était due à l'inadaptation des variétés importées d'Europe aux conditions locales (Jlibene, 2009). Le blé tendre était traditionnellement cultivé dans les oasis saharienne du pays. Depuis 1921, le progrès technologique a permis de relever significativement la productivité des céréales. À titre d'exemple, durant l'année extrêmement pluvieuse de 2009, les rendements nationaux ont été de 21,0 Qx/ha en blé dur, 21,6 Qx/ha en blé tendre et 17,3 Qx/ha en orge, à l'échelle nationale.

Si l'on considère uniquement la période post changement climatique (à partir de 1980), les statistiques agricoles de 1979 à 2006 (Source : Direction de la Stratégie et des Statistiques), montrent qu'il y a eu une progression annuelle moyenne des rendements nationaux de près de 0,2 quintal par hectare en blés (0,19 en blé tendre et 0,18 en blé dur), alors que pour l'orge, le progrès

technologique a été négatif (Tableau 7). Ce progrès a été plus important pour les blés que pour l'orge, malgré un investissement identique en recherche agronomique au Maroc. Pour l'orge, les rendements n'ont pas progressé au niveau national en raison notamment du faible taux d'utilisation (moins de 1%) des semences sélectionnées, et du recul des superficies de l'orge vers les zones défavorables en faveur du blé tendre, suite à l'opération dite « *l'Opération promotion de blé tendre* » lancée en 1985.

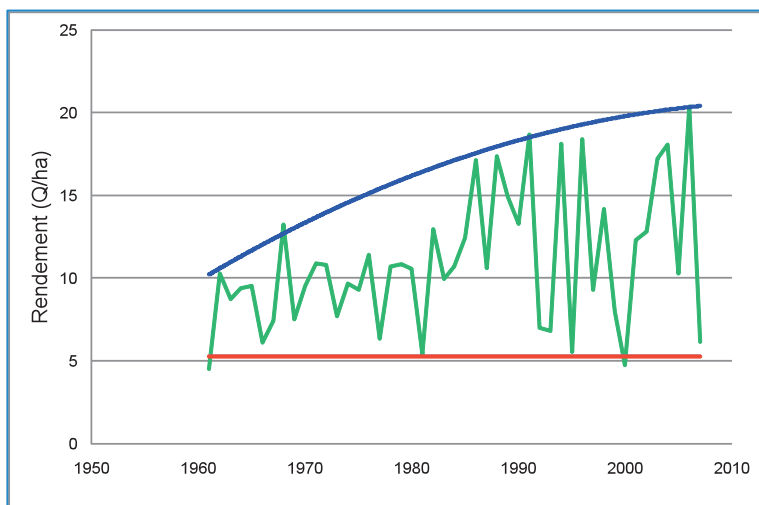
Le progrès technologique n'est pas identique sur toutes les zones agro-écologiques du Maroc. En particulier, le progrès est plus important dans les zones agro-écologiques *Favorable* et *Intermédiaire*. Ce progrès est le fruit d'un effort important fourni par l'INRA pour créer des technologies nouvelles telles que les variétés productives et résistantes aux maladies et pour améliorer les systèmes de production en climat aride.

**Tableau 7 : Progression annuelle des rendements à l'hectare (Quintal/ha.an), des principales céréales avec leurs coefficients de détermination ( $R^2$ ) pour chaque zone agro-écologique (série de 1979 à 2006 ; Source : Balaghi et Jlibene, 2009).**

Zone agro-écologique	Blé tendre		Blé dur		Orge	
	Progrès	$R^2$	Progrès	$R^2$	Progrès	$R^2$
Favorable	0,24	0,79	0,19	0,71	-0,15	0,12
Intermédiaire	0,22	0,73	0,26	0,85	0,01	0,00
Défavorable Sud	0,11	0,48	0,15	0,70	-0,01	0,00
Défavorable Orientale	0,06	0,20	0,08	0,37	-0,09	0,08
Montagne	0,17	0,60	0,13	0,70	-0,32	0,02
Saharienne	0,05	0,08	0,13	0,20	-0,04	0,03
<b>National</b>	<b>0,19</b>	<b>0,87</b>	<b>0,18</b>	<b>0,86</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,03</b>

La forte variabilité des rendements, qui est due à un climat très aléatoire surtout à partir de 1980, ne permet pas de distinguer visuellement le progrès technologique accompli. En faisant passer une courbe à travers les records de rendements nationaux de blé enregistrés successivement, durant les campagnes agricoles 1961-1962, 1967-1968, 1985-1986, 1987-1988, 1990-1991 et 2005-2006, on peut mettre en relief le progrès technologique significatif réalisé en environnements favorables (Figure 25). On constate aussi que les rendements du blé rechutent à des niveaux très bas, lors des années de sécheresse agricole extrême, aux alentours d'une moyenne de 5 Qx/ha à l'échelle nationale qui n'a pas changé avec le temps.

Cette limite inférieure des rendements, qui n'a pas pu être relevée depuis 1961, continue de peser sur la sécurité alimentaire du pays. On peut relativiser la faible performance en années de sécheresses, on considérant que les rendements ne sont tout de même pas descendus en dessous de cette limite inférieure de 5 Qx/ha malgré la régression de la pluviométrie observée durant les décennies 1990 et 2000.



**Figure 25 : Évolution du rendement du blé tendre au Maroc (en vert) (Source de données: FAOSTAT et DSS).**

*La courbe tracée en bleu montre l'évolution importante des six records de rendement réalisés successivement en 50 ans (1961-62, 1967-68, 1985-86, 1987-88, 1990-91 et 2005-06). La droite en rouge montre le niveau moyen des rendements obtenus lors des campagnes agricoles d'extrême sécheresse (1960-61, 1980-81, 1994-95, 1999-2000 et 2006-07).*

Le gap potentiel entre les rendements enregistrés au niveau des stations expérimentales et ceux réalisés au niveau des champs des agriculteurs avait été constaté à travers une étude de modélisation réalisée en 1994 à l'INRA, dans les régions de Meknès, Annoceur et Douyet (Boughlala *et al.*, 1994). Cette étude a montré que le gap potentiel est d'autant plus important que les conditions de production sont favorables, variant de 20 Qx/ha en conditions défavorables à 50 Qx/ha en conditions extrêmement favorables (Figure 26). D'un côté, les pertes de rendement en mauvaises années sont importantes et, d'un autre côté, les bonnes années ne sont pas exploitées à leur potentiel en raison du fait que l'agriculteur ne maîtrise pas les techniques agricoles et, surtout, minimise les investissements (fertilisation, fumure, jachère cultivée, travaux d'aménagement, irrigation d'appoint) à cause du risque climatique important.

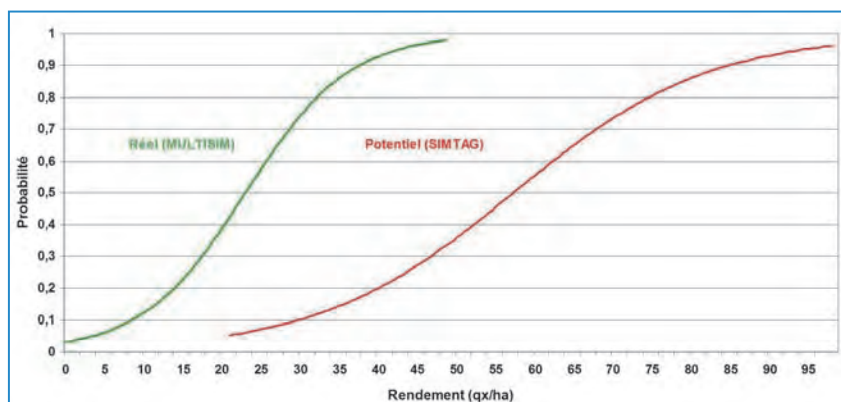


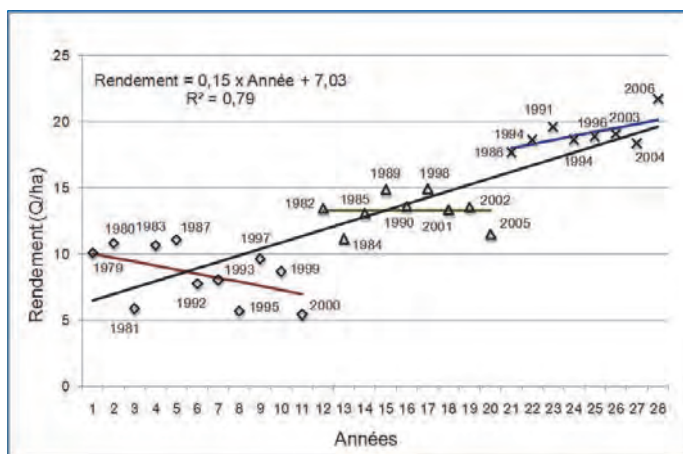
Figure 26 : Courbes de probabilité cumulative de réalisation des rendements du blé chez les agriculteurs en conditions potentielles et réelles à Meknès (Source : Boughlala *et al.*, 1994).

Dans les domaines expérimentaux de l'INRA, le rythme annuel du gain de rendement depuis 1980 a atteint 0,5 Quintal/ha.an pour les nouvelles variétés de blé tendre (Jlibene, 2011), contre 0,19 Quintal/ha.an chez les agriculteurs (Tableau 7). Cette différence de productivité dénote des efforts qui restent à faire en matière de transfert de technologie.

Le progrès technologique moyen cache les différences entre les progrès réalisés dans les environnements favorables, intermédiaires et défavorables. Une analyse plus fine du progrès technologique montre qu'il est, en moyenne, de l'ordre de 0,15 Quintal/ha.an (Figure 27) au lieu de 0,19 Quintal/ha.an (Tableau 7), pour le blé tendre. Le progrès technologique est positif (+0,3 Quintal/ha.an) dans les environnements favorables (> 400 mm), nul dans les environnements intermédiaires (300 à 400 mm) et négatif (-0,3 Quintal/ha.an) dans les environnements défavorables (< 300 mm). Dans les parcelles de certains agriculteurs élités, des records de rendements (> 80 Qx/ha) ont été enregistrés en années humides avec des variétés sélectionnées de blé tendre. La productivité de l'eau de pluie à l'échelle nationale a également été améliorée : les décennies 80 et 90 ont enregistré des productivités de l'eau de pluie, de l'ordre de 2,5 kg par mm, une amélioration de 67% par rapport aux décennies 60 et 70 (Jlibene, 2011).

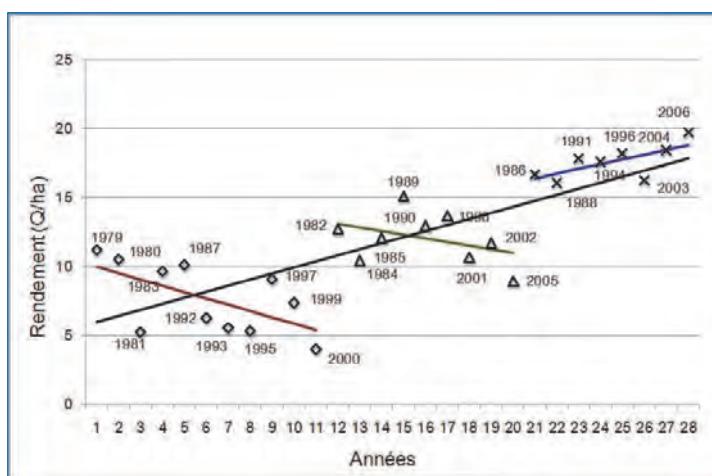
Lorsque les campagnes agricoles sont classées par classe de productivité, on constate que les années favorables sont mieux valorisées, avec un progrès de plus de 0,3 Quintal/ha.an aussi bien pour le blé tendre (Figure 27) que pour le blé dur (Figure 28). Durant les années intermédiaires, on observe que le progrès a été nul pour le blé tendre et négatif pour le blé dur, alors que durant les années à faible productivité, le progrès a été négatif pour les deux espèces. Cette apparente faiblesse de productivité, en années intermédiaires et sèches, s'explique par la sévérité des sécheresses vécues durant la période 1980 - 2008.





**Figure 27 : Progrès technologique réalisé en 28 ans sur le blé tendre au Maroc.**

Les campagnes agricoles (série de 1979 à 2006) ont été subdivisées en trois classes de rendement, correspondant à trois classes de pluviométrie (<300, 300 à 400 et >400 mm/an) : environnements secs (losange), intermédiaires (triangle) et favorables (croix). Le progrès technologique est de +0,15 Quintal/ha.an en moyenne (ligne noire), de -0,3 Quintal/ha.an en environnements secs (ligne marron), nul en environnements intermédiaires (ligne verte) et de +0,3 Quintal/ha.an en environnements favorables (ligne bleue). (Source : Balaghi et Jlibene, 2009).



**Figure 28 : Progrès technologique réalisé en 28 ans sur le blé dur au Maroc.**

Les campagnes agricoles (série de 1979 à 2006) ont été subdivisées selon trois classes de rendement correspondant à trois classes de pluviométrie (<300, 300 à 400 et >400 mm/an) : environnements secs (losange), intermédiaires (triangle) et favorables (croix). Le progrès technologique est de +0,15 Quintal/ha.an en moyenne (ligne noire), de -0,46 Quintal/ha.an en environnements secs (ligne marron), -0,26 Quintal/ha.an en environnements intermédiaires (ligne verte) et de +0,35 Quintal/ha.an en environnements favorables (ligne bleue). (Source : Balaghi et Jlibene, 2009).

## V. ANALYSES AGROMÉTÉOROLOGIQUES

*Les analyses du climat et de la production céréalière ont permis de montrer la forte dépendance des rendements céréaliers au climat, surtout à la pluviométrie. Dans le présent chapitre, la relation existant entre les rendements céréaliers et le climat est étudiée en vue d'explorer les indicateurs agrométéorologiques pouvant être utilisés pour la prédiction des rendements. L'évapotranspiration, qui est une fonction de la pluviométrie et de la température, est l'une des variables qui expliquent le mieux les rendements céréaliers aux échelles fines car elle est directement liée à la production de biomasse. À plus grande échelle, la pluviométrie annuelle seule peut expliquer une partie importante de la variation interannuelle des rendements, si elle est cumulée sur la saison de culture qui est comprise entre les mois de septembre et mai. À l'échelle nationale, cette dépendance est valable tant que la pluviométrie ne dépasse pas 378 mm, seuil qui est légèrement supérieur à la moyenne à long terme de la pluviométrie. L'amélioration de la productivité de l'eau, au cours du temps, peut expliquer le progrès technologique réalisé sur les blés. La productivité de l'eau est importante dans les zones sahariennes irriguées, suivies des zones intermédiaires et défavorables. Dans les zones à pluviométrie favorable, la productivité de l'eau est relativement plus faible en raison, notamment, de la sous-valorisation de l'eau de pluie lors des campagnes pluvieuses. La présence d'épisodes de sécheresse, au cours du cycle cultural, affecte également les rendements céréaliers.*

*Le NDVI est positivement corrélé à la fois à la pluviométrie et aux rendements céréaliers. Il est positivement corrélé à la pluviométrie dans une gamme inférieure à 550 mm sur la campagne agricole. Le NDVI est un très bon indicateur prédictif des rendements céréaliers lorsque l'on considère sa moyenne de février jusqu'à mars ou bien à avril.*

### 1. RELATION ENTRE L'EAU TRANSPIRÉE ET LA CROISSANCE

Dans le milieu des années 1950, De Wit (van Keulen et van Laar, 1986) a été parmi les premiers chercheurs à reconnaître le lien direct entre la transpiration<sup>38</sup> et la productivité des plantes. Cette relation a ensuite été reprise par la FAO pour procéder à la modélisation de la réponse des cultures à l'évapotranspiration (Doorenbos et Kassam, 1979). L'évapotranspiration réelle<sup>39</sup> (ETR) des plantes est l'une des variables qui expliquent le mieux la production agricole car elle est directement liée à la production de biomasse. La relation est linéaire, à plusieurs échelles spatiales (feuille, plante, région), démontrée à maintes reprises par plusieurs auteurs et, notamment dans la province de Settat qui est située dans les plaines céréalières du Maroc (Bazza et Tayaa, 1998).

La transpiration peut être faible en raison d'une pénurie d'eau dans la zone racinaire (sécheresse), ou par la quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser l'eau (froid).

<sup>38</sup> Eau évaporée à partir des tissus des plantes. Elle dépend de l'énergie reçue, du gradient de pression de vapeur et de la vitesse du vent (Allen *et al.* 1998).

<sup>39</sup> Somme de la transpiration des plantes et de l'évaporation des sols en conditions limitantes en eau.

L'un des principes de base de l'agrométéorologie est que la croissance des plantes (accumulation de la biomasse) est gouvernée par l'énergie disponible, mais que les plantes «payent» pour cette énergie solaire en évaporant de l'eau.

Au Maroc, la relation entre évaporation et température a été démontrée depuis longtemps (Loup, 1957). La température est le facteur qui détermine le plus l'évaporation, qu'il s'agisse de la température moyenne ou maximale. Il en va de même pour l'évapotranspiration (Figure 29).

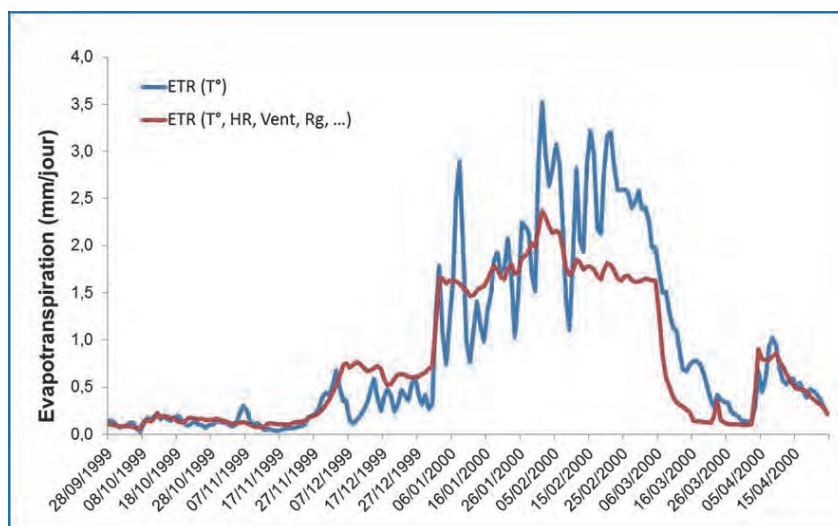


Figure 29 : Évolution de l'évapotranspiration journalière réelle du blé tendre simulée à partir de la température seule (ETR-T°) et de plusieurs paramètres climatiques (ETR-T°, HR, Vent, Rayonnement) à Meknès (Balaghi, 2000).

L'approche a été ensuite mise à jour par la FAO, pour l'élaboration de l'outil « Aquacrop » (<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>) de prédiction de la productivité des cultures, en séparant l'évaporation des sols et la transpiration des cultures (Hsiao *et al.*, 2009 ; Raes *et al.*, 2009 ; Steduto *et al.*, 2009).

La relation entre la transpiration et la biomasse est schématisée dans la Figure 30 (Jlibene et Balaghi, 2009). L'eau transpirée, qui est indispensable au métabolisme biochimique, est véhiculée à partir du sol vers l'atmosphère en passant à travers la plante. La quantité d'eau transpirée est proportionnelle à la quantité d'eau disponible dans le sol.

Cette dernière résulte de l'humidité résiduelle existant dans le sol, additionnée des précipitations et des apports d'eau, moins les pertes par ruissellement, drainage, évaporation directe et transpiration par les mauvaises herbes (adventices). Le sol joue le rôle de tampon, en conservant l'humidité entre deux apports d'eau.

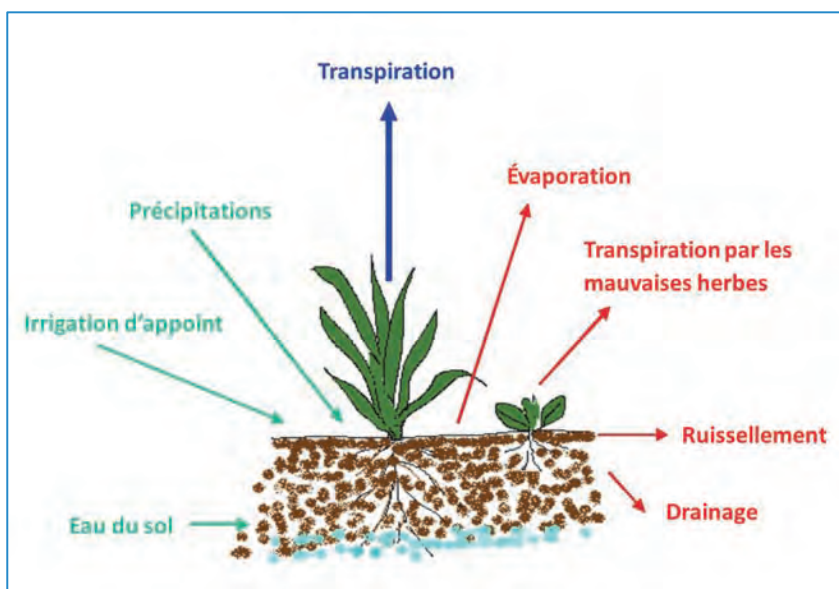


Figure 30 : Schéma illustrant la relation entre la transpiration et la biomasse (Jlibene et Balaghi, 2009).

L'action directe de ces facteurs sur la biomasse (Figure 30) a été expérimentalement démontrée dans de nombreuses études agronomiques. Il est devenu un fait établi que la pluviométrie, l'irrigation, la maîtrise des mauvaises herbes, la réduction de l'évaporation et l'humidité du sol augmentent le rendement.

## 2. RELATION ENTRE LA PLUVIOMÉTRIE ET LE RENDEMENT DES CÉRÉALES

La pluviométrie est le facteur qui affecte la majeure partie<sup>40</sup> de la variation des rendements céréaliers au Maroc. La relation entre la pluviométrie et le rendement des céréales au Maroc a été démontrée depuis longtemps et à plusieurs reprises (Papy, 1979 ; Douguédroit et Messaoudi, 1998 ; Douguédroit *et al.*, 1998). Le rendement (et donc la production) des céréales varient, selon les campagnes, au gré de la pluviométrie. En revanche, les superficies des céréales oscillent autour de 5 millions d'hectares, avec de faibles variations interannuelle (CV=6%, entre 1999-2000 et 2010-2011). En général, lorsque la pluviométrie augmente ou diminue, le rendement et la production des céréales évoluent dans le même sens, mais dans des proportions plus importantes (Figure 31). Le coefficient de variation de la pluviométrie est de 32% alors que celui des rendements céréaliers est de 37% pour le blé tendre, 41% pour le blé dur et 47% pour l'orge, sur la période 1988-2011. Il y a une corrélation positive très forte ( $R^2 > 65\%$ ) entre le rendement des céréales et la pluviométrie de la campagne agricole. Cependant, il y a quelques exceptions à cette règle. Durant les campagnes 1989-1990 et 1999-2000, les rendements ont chuté alors que la pluviométrie avait augmenté. À l'inverse, durant la campagne 1997-1998, le rendement a augmenté malgré une chute de pluviométrie. Ces exceptions démontrent l'importance de la distribution intra-annuelle de la pluviométrie, au cours du cycle de la culture.

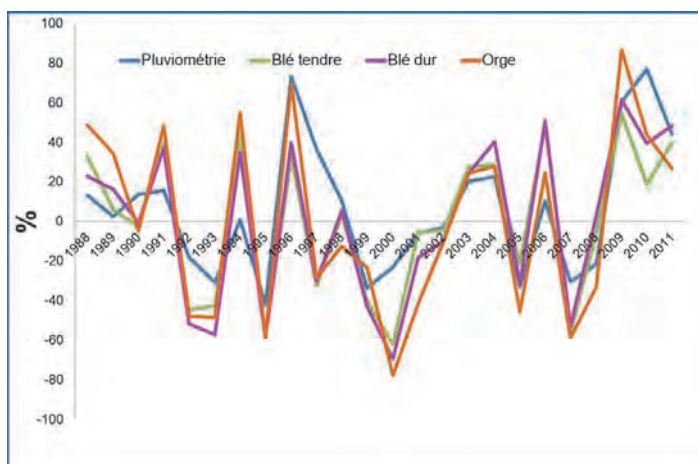


Figure 31 : Variation par rapport à la moyenne (%) du rendement des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et de la pluviométrie (cumulée de septembre à mai), à l'échelle nationale (Données de 1988 à 2011).

<sup>40</sup> L'importance relative des autres facteurs, pouvant expliquer la variation des rendements céréaliers, dépend de l'échelle spatiale considérée. Par exemple, la contribution des facteurs agro-techniques et pédologiques à l'explication des rendements n'intervient qu'à des échelles spatiales fines. Malheureusement, au Maroc comme dans la plupart des pays en voie de développement, ces données sont souvent indisponibles à ces échelles.

### 3. RELATION ENTRE LA PLUVIOMÉTRIE ET LA SUPERFICIE CÉRÉALIÈRE

La superficie céréalière a augmenté de façon continue depuis 1980 à un rythme moyen de 39.600 hectares/an. Cette augmentation a été surtout le résultat de l'augmentation de la superficie du blé tendre, grâce à « l'Opération promotion de blé tendre » lancée en 1985-1986 (Jlibene, 2011). Cette opération avait pour but d'augmenter la production de blé tendre grâce à la distribution de nouvelles variétés sélectionnées, la fixation d'un prix garanti au producteur et la fixation des marges de commercialisation (Aït El Mekki, 2006). Les superficies de blé tendre, qui avaient stagné autour d'un demi-million d'hectares pendant plus de trente ans, jusqu'au début des années 1980, ont été multipliées par deux à partir de 1986, puis par quatre dix ans plus tard à partir de 1996. Les superficies se sont stabilisées ensuite aux alentours de deux millions d'hectares, occupant plus du cinquième de la superficie agricole utile du pays qui est de l'ordre de 8,7 millions d'hectares. Sur la période 1998-2011, la superficie de blé tendre a augmenté à un rythme moyen de 34.900 hectares/an, alors que celles du blé dur et de l'orge ont régressé à un rythme de 11.600 et 13.800 hectares/an, respectivement (Figure 32).

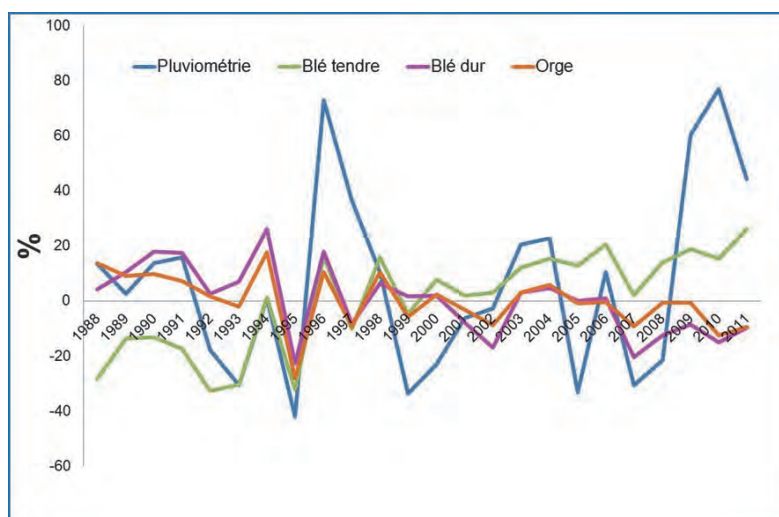


Figure 32 : Variation par rapport à la moyenne (%) de la superficie des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et de la pluviométrie (cumulée de septembre à mai) à l'échelle nationale.

Au Maroc, la superficie céréalière est également influencée par la pluviométrie, particulièrement celle du début de la saison, à partir de la date d'arrivée des premières pluies significatives<sup>41</sup>, vers novembre à début décembre (Figure 33). Ces premières pluies significatives ont été estimées à un cumul minimum de 25 mm sur une durée de 10 jours en zones semi-arides du Maroc (Watts et El Mourid, 1988). La date d'arrivée de ces pluies, qui est très variable d'une année à l'autre, conditionne la date de semis des céréales dans les régions arides et semi-arides (Benaouda et Bouaziz, 1992). La superficie est plus importante quand la pluie est précoce et abondante, car la plupart des agriculteurs sèment après ces premières pluies. Quand la pluviométrie est abondante au début du cycle, même les zones arides du sud du Maroc sont semées comme par exemple les régions de Marrakech, Essaouira, et Kalâa des Sraghna.

C'est la pluviométrie des mois de novembre et de décembre qui expliquent le mieux la superficie emblavée, surtout pour l'orge, puis pour le blé tendre et le blé dur. Cependant, durant les dernières campagnes agricoles, les semences ont tendance à démarrer à partir de la première semaine de novembre même en absence de pluie.

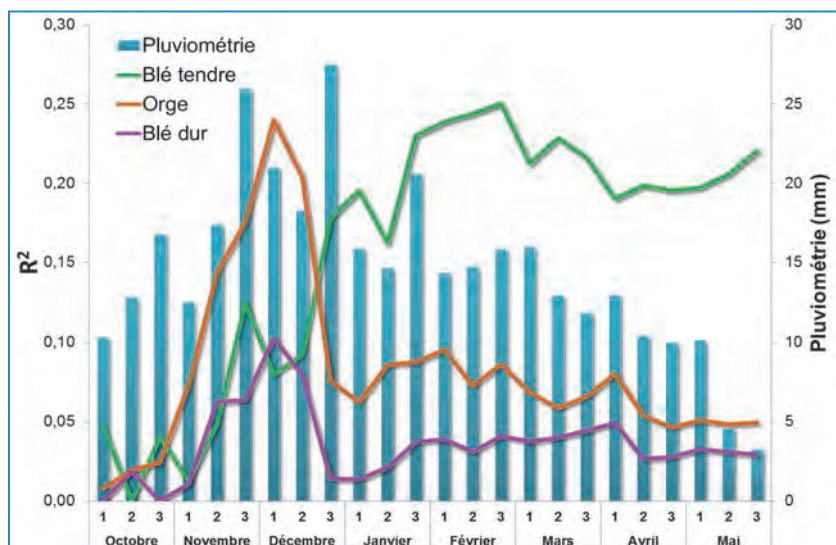


Figure 33 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre la superficie des céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et la pluviométrie cumulée au cours de la campagne agricole (à partir d'octobre), à l'échelle nationale (Données de 1988 à 2011). La pluviométrie décadaire moyenne est représentée en second axe, à titre d'illustration.

<sup>41</sup> Les premières pluies significatives sont définies comme les quantités de pluies qui permettent la germination et la levée.

## 4. RELATION ENTRE LA PLUVIOMÉTRIE ET PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DE PLUIE

### 4.1 ECHELLE NATIONALE

Lorsque le rendement grain est régressé à la pluviométrie de la campagne, la pente représente la Productivité de l'Eau de Pluie<sup>42</sup> (PEP). À l'échelle nationale et pour les trois céréales d'automne confondues, la PEP moyenne traduite en grammes/litre d'eau de pluie (g/l), entre 1988 et 2011, est de 0,332 g/l. La PEP varie selon les campagnes agricoles entre un maximum de 0,506 g/l, atteint en 1993-1994, et un minimum de 0,149 g/l atteint en 1999-2000. La PEP est en moyenne supérieure pour le blé tendre (0,404 g/l), par rapport au blé dur (0,370 g/l) ou bien à l'orge (0,261 g/l).

Les rendements grain des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge), augmentent en fonction de la pluviométrie cumulée de septembre à avril, jusqu'à la limite de 378 mm (Figure 34, Figure 35 et Figure 36). Au-delà de cette limite, les rendements ne progressent plus, indiquant une sous valorisation des années pluvieuses qui peut s'expliquer par l'adaptation de la céréaliculture aux conditions de pluviométrie légèrement au-dessus de la moyenne. Ce niveau de la pluviométrie supérieur à la moyenne suggère une amélioration de la conduite technique résultant d'un progrès technologique. La valorisation des années pluvieuses nécessite plus d'investissement en intrants, particulièrement la semence sélectionnée, l'azote et les produits phytosanitaires. L'agriculture est aussi « *l'art de gérer l'incertitude* » (Faurès *et al.*, 2010), car elle vise à minimiser les risques de production liés à la variabilité et à l'imprédictibilité du climat, voire du marché. En environnements aléatoires, les stratégies de gestion des risques sont difficilement compatibles avec les objectifs de maximisation des rendements agricoles qui supposent un plus grand investissement et donc une plus grande prise de risque. La « *politique des barrages* » lancée au début des années 1960 au Maroc avait pour objectif de réduire le risque lié au climat et garantir par la même occasion l'approvisionnement en eau potable des villes (potentiel hydraulique mobilisable de 21 milliards m<sup>3</sup>). Actuellement, les terres irriguées représentent 17% des superficies agricoles (1,46 million hectares), dont 76% sont toujours irriguées de façon gravitaire (MAPM, 2011).

<sup>42</sup> La Productivité de l'Eau de Pluie (g/l) est définie comme le rapport du rendement (g/m<sup>2</sup>) sur la pluviométrie cumulée (mm) durant la campagne agricole (de septembre à avril).



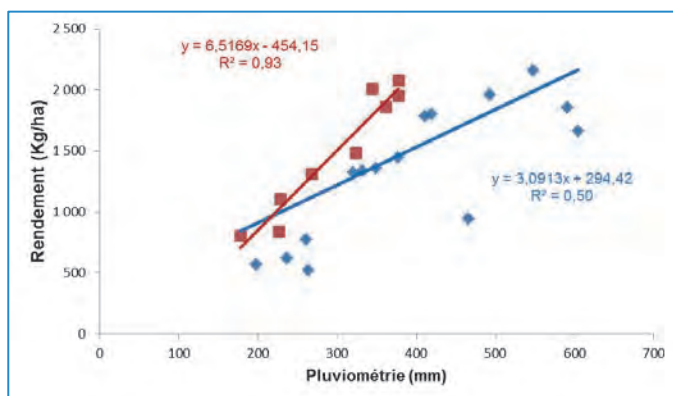


Figure 34 : Relation entre le rendement national du blé tendre (Kg/ha) et la pluviométrie de la campagne agricole (mm) (données de 1988 à 2011). La pente de la droite de régression traduite en termes de grammes par litre d'eau de pluie (g/l), indique la PEP moyenne (0,309 g/l). La courbe en gras indique la PEP maximale du blé tendre à l'échelle nationale (0,652 g/l).

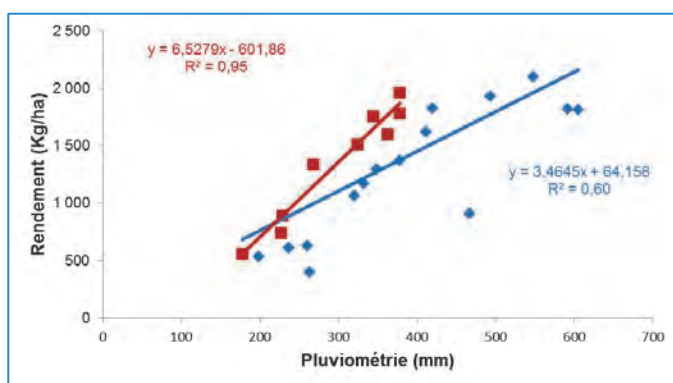


Figure 35 : Relation entre le rendement national du blé dur (Kg/ha) et la pluviométrie de la campagne agricole (mm) (données de 1988 à 2011). La pente de la droite de régression traduite en termes de grammes par litre d'eau de pluie (g/l), indique la PEP (0,347 g/l). La courbe en gras indique la PEP maximale du blé dur à l'échelle nationale (0,653 g/l).

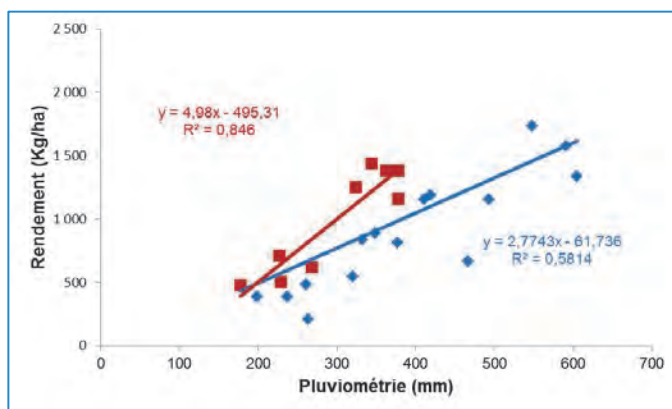


Figure 36 : Relation entre le rendement national de l'orge (Kg/ha) et la pluviométrie de la campagne agricole (mm) (données de 1988 à 2011). La pente de la droite de régression traduite en termes de grammes par litre d'eau de pluie (g/l), indique la PEP (0,277 g/l). La courbe en gras indique la PEP maximale de l'orge à l'échelle nationale (0,498 g/l).

En moyenne, le blé dur (Figure 35) semble mieux valoriser l'eau de pluie, avec une PEP de 0,347 g/l, suivi du blé tendre (0,309 g/l) (Figure 34) et de l'orge (0,277 g/l) (Figure 36). L'avantage apparent du blé dur sur le blé tendre en matière de PEP est probablement lié au fait que le blé dur est surtout cultivé dans les zones semi-arides, à l'inverse du blé tendre qui est davantage concentré dans les zones favorables et moins valorisées (Tableau 6).

La PEP potentielle, exprimée par la pente de la droite de régression entre les rendements grain, les plus élevés par niveau de pluviométrie, et la pluviométrie, indique que le blé dur (0,653 g/l) et le blé tendre (0,652 g/l) valorisent mieux l'eau de pluie, que l'orge (0,498 g/l) (Tableau 8). La PEP potentielle est atteinte lorsque les conditions de production sont optimales. Elle est presque égale au double de la PEP moyenne, soulignant le manque à gagner en matière de valorisation de l'eau de pluie, en particulier, et de gestion des aléas climatiques en général.

Théoriquement, la pluviométrie minimale nécessaire à la production du grain se situe à 70 mm pour le blé tendre, 92 mm pour le blé dur et 100 mm pour l'orge. Pour les trois espèces, ce niveau de pluviométrie est très bas, témoignant d'un progrès en matière de gestion de la sécheresse au Maroc. La différence entre la pluviométrie minimale des trois espèces est en faveur du blé tendre, qui est l'espèce la plus rustique dans l'état de conduite actuelle de la céréaliculture au Maroc, suivie du blé dur puis de l'orge.

**Tableau 8 : Productivité de l'Eau de Pluie (PEP) moyenne et maximale des céréales à l'échelle nationale. La PEP est égale à la pente de la relation entre les rendements et la pluviométrie.**

La productivité moyenne est calculée en considérant l'ensemble des rendements, alors que la productivité potentielle est calculée en ne considérant que les rendements maximums observés par niveau de pluviométrie.

Espèce	Productivité de l'Eau de Pluie (grammes/litre)	
	Moyenne	Potentielle
<b>Blé tendre</b>	0,309 ; R <sup>2</sup> = 49,6%	0,652 ; R <sup>2</sup> = 93,3%
<b>Blé dur</b>	0,347 ; R <sup>2</sup> = 59,7%	0,653 ; R <sup>2</sup> = 94,6%
<b>Orge</b>	0,277 ; R <sup>2</sup> = 58,1%	0,498 ; R <sup>2</sup> = 84,6%

#### 4.2 ECHELLE DES ZONES AGRO-ÉCOLOGIQUES

Pour les trois céréales confondues, la PEP est croissante en allant de la zone agro-écologique *Favorable* (0,281 g/l), *Défavorable Sud* (0,321 g/l), *Montagne* (0,333 g/l), *Défavorable Orientale* (0,334 g/l), *Intermédiaire* (0,340 g/l) vers la zone *Saharienne* (0,548 g/l) (Tableau 9). La valeur très élevée de la PEP en zone *Saharienne* est due au recours systématique à l'irrigation. D'entre les espèces, le blé tendre possède la PEP la plus élevée en zones *Favorable*, *Montagne* et *Défavorable Orientale*. Le blé dur possède la PEP la plus élevée en zones *Défavorable Sud*, *Intermédiaire* et, de façon plus marquée, en zone *Saharienne*. L'orge possède la PEP la plus faible dans les six zones agro-écologiques.

**Tableau 9 : Productivité de l'Eau de Pluie (grammes/litre), moyenne de 1988 à 2011, pour les trois céréales d'automne, aux échelles nationale et des zones agro-écologiques.**

Zone agro-écologique	Pluviométrie (mm)	Blé tendre	Blé dur	Orge	Trois céréales
<b>Favorable</b>	524,9	0,316	0,271	0,232	0,281
<b>Défavorable Sud</b>	243,4	0,349	0,408	0,292	0,321
<b>Montagne</b>	436,4	0,409	0,314	0,253	0,333
<b>Défavorable Orientale</b>	273,3	0,349	0,297	0,333	0,334
<b>Intermédiaire</b>	350,3	0,360	0,393	0,293	0,340
<b>Saharienne</b>	190,1	0,763	1,196	0,393	0,548
<b>Nationale</b>	<b>346,6</b>	<b>0,404</b>	<b>0,370</b>	<b>0,261</b>	<b>0,332</b>

## 5. SÉCHERESSE AGRICOLE

Le cumul pluviométrique, au cours de la campagne agricole, peut servir d'indicateur du niveau de sécheresse. Déjà en 1921 au Maroc, Augustin (Augustin, 1921) affirmait : « *C'est la somme et la répartition des pluies qui indique quelles régions sont favorables à la culture et à quelles cultures* ».

Le nombre des années sèches, dont la pluviométrie est inférieure à 400 mm, a augmenté depuis le changement climatique du début des années 1980 Maroc. La fréquence des années sèches a quintuplé, passant d'une année sèche sur 15 années normales durant les décennies 30, 40, 50, 60 et 70, à une année sèche sur 3 durant les trois dernières décennies (Jlibene, 2011).

Le cumul pluviométrique, au cours de la campagne, peut connaître une interruption pendant une période plus ou moins longue, dès le début, au milieu ou à la fin de la campagne agricole. Des exemples de cette interruption de la pluviométrie sont donnés dans la Figure 37.

- Durant la campagne 1994-1995, il n'y a pas eu de pluie pendant pratiquement trois mois (novembre, décembre et janvier), affectant aussi bien la production de grain que de la paille des céréales ;
- La campagne 2004-2005 a été presque identique à celle de 1994-1995, en termes de volume pluviométrique, mais différente en termes de distribution, enregistrant une période d'un mois de sécheresse en janvier et de trois mois durant mars, avril et mai ;
- La campagne 1999-2000 a reçu 180 mm de pluie jusqu'à janvier, puis une période de sécheresse s'est installée pendant trois mois consécutifs ;
- La campagne 1996-1997 a été bien arrosée jusqu'à mi-janvier, ensuite il n'y eu pas de pluie pendant près de deux mois ;
- La campagne 2000-2001 a reçu 300 mm de pluie jusqu'à la fin février. Ensuite, il n'y a plus eu de pluie durant les deux mois suivants, de mars et avril.

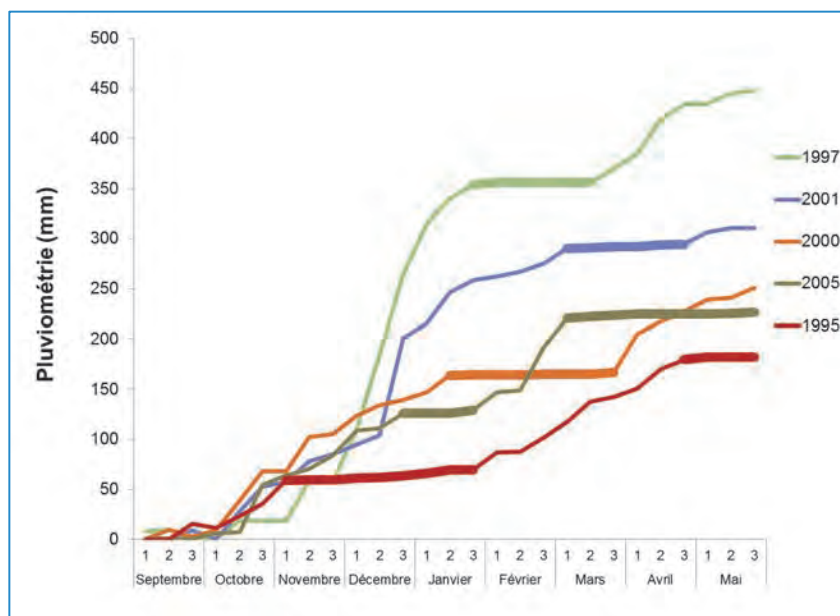


Figure 37 : Cumul de la pluviométrie décadaire entre septembre et mai, d'une série de campagnes agricoles sèches. Les périodes de sécheresse sont celles durant lesquelles les cumuls sont stagnants (en couleurs accentuées). Les sécheresses peuvent survenir à des phases variables du cycle de croissance et de développement des céréales.

La Figure 38 montre la ressemblance, sur de nombreuses stations climatiques, de la distribution des pluies durant la saison agricole. Dans cette figure, la zone plate des courbes pluviométriques indique la période de sécheresse. La sécheresse, lorsqu'elle survient, est donc générale à tout le pays. Par exemple, durant la sécheresse de 1996-1997, la pluie a été quasi inexistante, dans 23 provinces du pays, durant la première décade de janvier et la dernière décade de mars (Jlibene, 2011). Cette situation se rencontre quasi systématiquement chaque fois qu'il y a sécheresse. La sécheresse est due à une pluviométrie insuffisante, à une mauvaise distribution intra-annuelle de la pluviométrie ou bien aux deux raisons à la fois. La sécheresse peut être expliquée par une déviation de la pluviométrie par rapport à la moyenne, en termes de volume total ou de distribution. L'idée sous-jacente à cette dernière explication est que les cultures se sont adaptées au cours des siècles à une certaine distribution pluviométrique et que leur cycle végétatif et productif se trouve affecté lorsque cette distribution est perturbée. La sécheresse agricole survient quand la somme des précipitations et de la réserve en eau du sol ne suffit pas à assurer les besoins en eau des cultures. En définitif, la sécheresse est un déficit en eau suffisamment prolongé pour engendrer un effet négatif sur la culture.

Dans cette dernière définition, il y a deux notions importantes, le déficit hydrique suffisamment prolongé et l'effet négatif sur la culture. L'effet sur la culture dépend de son niveau de sensibilité au déficit, appelé aussi vulnérabilité ou tolérance.

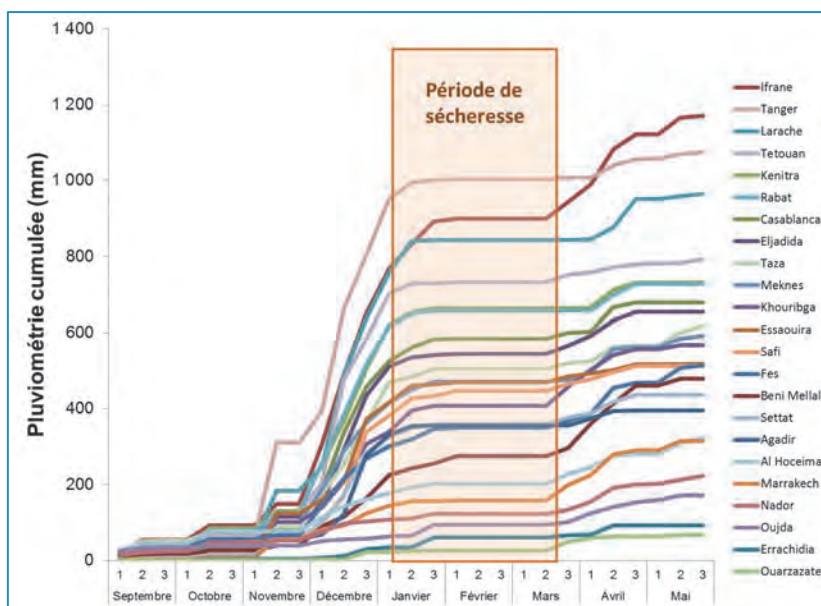


Figure 38 : Distribution spatiale de la pluviométrie décadaire cumulée (de septembre à mai) durant la campagne agricole 1996-1997, sur 23 provinces du Maroc (Source : Jlibene, 2011).

## 6. CROISSANCE ET PLUVIOMÉTRIE

Le cycle normal de croissance du blé au Maroc, en relation avec la température et les précipitations, est indiqué en Figure 39. La croissance des cultures s'est adaptée à la distribution intra-annuelle des pluies. Le pic pluviométrique survient en automne-hiver, permettant de remplir les réserves en eau du sol et donc d'installer les cultures céréalières. Le semis est réalisé généralement entre septembre et décembre, en fonction de la précocité des premières pluies significatives d'automne. La récolte commence vers le mois de mai, dans le sud du pays en raison de l'augmentation précoce des températures et se poursuit jusqu'à juin dans les régions du nord.

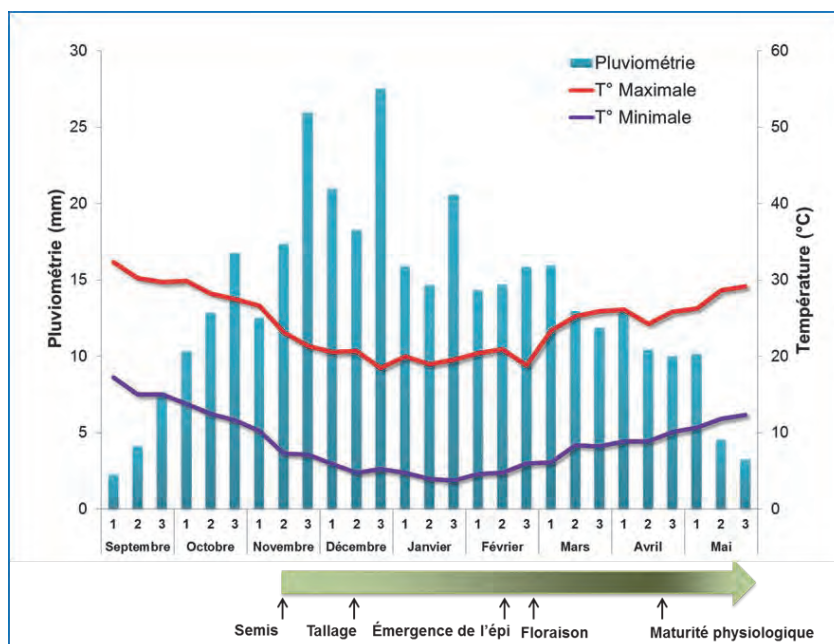


Figure 39 : Conditions climatiques typiques, durant la saison de croissance du blé. Moyennes décennales de la pluviométrie (données de 1988 à 2011) et des températures (données de 1998 à 2009).

Le développement de la partie aérienne des céréales passe par plusieurs stades, dont les plus essentiels, pris comme repères, sont :

- **La germination** a lieu juste après semis par imbibition de la graine suivie du gonflement et de l'émission de la radicule puis du coléoptile qui protège la première feuille et perce à travers le sol. Cette étape nécessite de l'humidité dans l'horizon superficiel du sol et dure une semaine environ.
- **La levée** est reconnue par l'apparition du coléoptile, qui enveloppe la première feuille. Elle a lieu une dizaine de jours (une décade) après le semis, plus longtemps si la pluie tarde ou si les températures sont plus faibles que d'habitude. La première feuille sera suivie d'une deuxième puis d'une troisième feuille, qui sont portées par une tige, la tige principale (ou brin-maitre). Cette étape dure un mois environ.
- **Le tallage** commence à se réaliser lorsqu'une tige secondaire (ou talle) apparaît à l'aisselle de la tige primaire, à la base de l'ainée des trois feuilles formées. Le brin-maitre continue à émettre des feuilles et des talles. Les talles émettent à leur tour des talles secondaires.

Les talles continuent à se former à la base de la plus ancienne des trois feuilles formées, théoriquement sans limite. La limite est constituée par la hausse des températures et le déficit hydrique. Toutes les talles restent groupées au ras du sol, constituant le plateau de tallage. Chaque feuille portée par le brin-maitre ou une talle est initiée à partir d'un nœud. À ce stade les nœuds sont groupés. Le tallage prend fin lorsque les nœuds commencent à se séparer et sont perceptibles au toucher à la base des talles. Le nombre de talles détermine le nombre potentiel d'épis. L'émission des talles dure environ un mois après la levée (trois décades).

- **La montaison** est le processus d'élongation des entre-nœuds, qui débute avec l'arrêt de la formation des feuilles et le début de l'initiation des ébauches de l'épi. Au fur et à mesure de l'élongation des entre-nœuds, les parties de l'épi se forment, en particulier le nombre d'épillets, le nombre de fleurs par épillet et les organes floraux. Les ébauches de l'épi sont visibles à l'œil nu, à quelques centimètres d'élongation. L'épi est protégé par les rouleaux constitués des feuilles, au nombre de huit généralement. D'autres stades intermédiaires sont repérés, comme le gonflement qui indique la montée de l'épi, ou l'épiaison qui indique l'apparition de l'épi en dehors de la gaine. Cette phase, qui dure plus d'un mois, correspond au maximum d'accumulation de la biomasse. Elle est donc sensible au stress hydrique. Le nombre potentiel de grains est déterminé à ce stade.
- **La floraison** est le stade qui sépare la phase végétative de la phase reproductive de la culture. Elle a eu lieu une semaine environ après l'épiaison, reconnue visuellement par la sortie des étamines. Les étamines, au nombre de trois par fleur, sont expulsées à l'extérieur de l'épi, une fois que le pollen qu'elles contiennent est libéré, pour fertiliser le stigmate qui conduira le matériel génétique du pollen vers l'ovaire pour le féconder. La sortie des étamines indique que la fertilisation a eu lieu et, potentiellement, la fécondation.
- **Le remplissage du grain** commence juste après la fécondation, l'œuf se développe en graine dont le développement passe par des stades repères : le stade laiteux et le stade pâteux. Au stade pâteux, le pédoncule de l'épi vire au jaune, indiquant la maturité physiologique de la plante. Cette phase détermine le poids du grain, et dure un mois et demi, environ.

Le rendement final en grain est le produit du nombre d'épis/m<sup>2</sup>, déterminé au tallage, du nombre de grains/épi, déterminé à la montaison, et du poids du grain déterminé au remplissage.

## 7. RELATION ENTRE LE NDVI ET LA PLUVIOMÉTRIE

Au Maroc, il existe une très grande variation pluviométrique du sud vers le nord et de l'est vers l'ouest. La pluviométrie de la saison (de septembre à avril) a été mise en relation avec les valeurs moyennes de NDVI (issues du capteur NOAA-AVHRR) des terres agricoles (masqué), entre février et avril, pour un ensemble de 23 stations/provinces du pays et pour les données de 1990 à 2004 (Figure 40). Au Maroc, le NDVI est très corrélé à la pluviométrie en raison du caractère semi-aride du climat et de l'importance des superficies céréaliers.



Dans la Figure 40, on peut remarquer la forte relation entre ces deux variables, qui est linéaire pour des valeurs de pluviométrie inférieures à 550 mm et quasi stationnaire au-delà. De façon similaire, cette relation linéaire a également été trouvée dans la gamme 200 à 600 mm sur les régions semi-arides d'Afrique (Martiny *et al.*, 2006). On remarque également que la relation se relâche au fur et à mesure que la pluviométrie augmente.

Il est possible d'utiliser le NDVI pour la prédiction des rendements céréaliers par une méthodologie paramétrique de régression, et ce pour la majeure partie du Maroc et pour une large gamme d'années. La Figure 40 explique aussi pourquoi dans la majeure partie de l'Europe, où la pluviométrie dépasse les 600 mm, le NDVI est très peu utile pour la prédiction des récoltes agricoles.

La variation de NDVI pour une même quantité de pluviométrie annuelle est due probablement à la distribution saisonnière de la pluviométrie. De ce fait le NDVI est approprié pour représenter la biomasse végétale, et donc les rendements des cultures céréaliers.

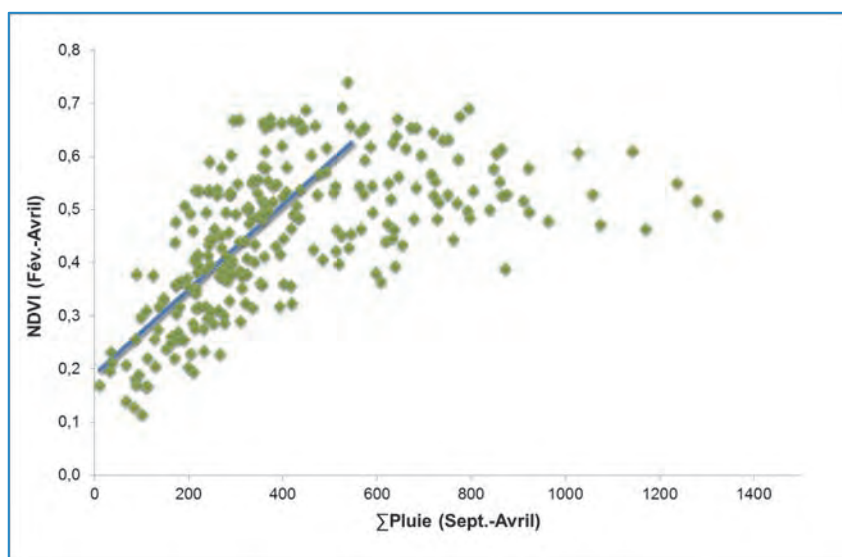
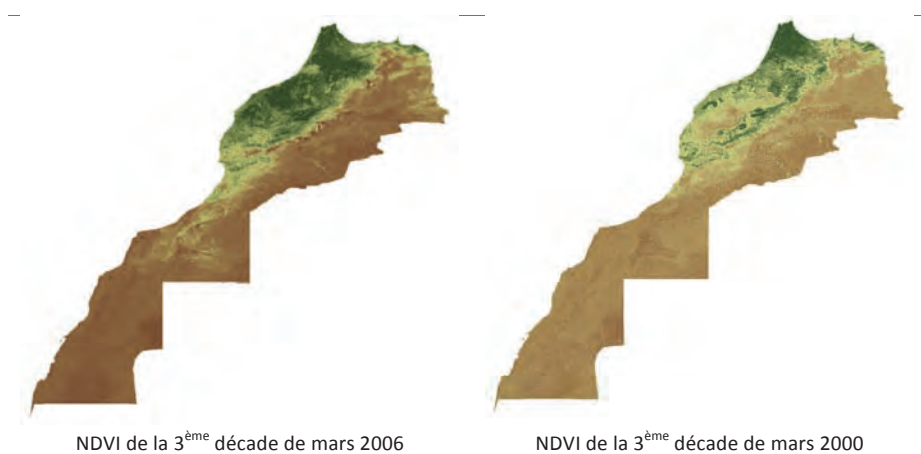


Figure 40 : Relation entre le NDVI (NOAA-AVHRR) moyen de février et avril (des zones agricoles) et la pluviométrie cumulée de septembre à mai au Maroc. Les 345 points sur cette figure représentent les données de 23 stations et pour les années de 1990 à 2004.

Le NDVI peut être utilisé pour suivre l'état de la végétation au cours de la campagne à 10 jours d'intervalle. Dans la Figure 41 sont présentées les cartes de NDVI (de la troisième décennie de mars) de deux campagnes agricoles contrastées, 1999-2000 (sèche : 264 mm) et 2005-2006 (humide : 378 mm). La différence de NDVI est frappante entre ces deux campagnes. Les valeurs élevées de NDVI (représentées en vert foncé sur la Figure 41) couvrent une superficie très vaste en 2006, englobant presque l'ensemble des terres agricoles. Le NDVI est visible jusque dans les provinces sahariennes et orientales. En revanche, en 2000 les valeurs élevées de NDVI ne se rencontrent que sur une superficie limitée, à quelques zones côtières et montagneuses ainsi qu'au nord-ouest du pays. On peut remarquer également l'effet foehn<sup>43</sup> (ou föhn), que l'on rencontre sur les montagnes de l'Atlas, qui crée l'aridité et donc une très faible végétation dans les zones orientales du pays.



**Figure 41 : Comparaison du NDVI (SPOT-VEGETATION) de la 3<sup>ème</sup> décennie de mars, entre une campagne agricole humide (2005-2006) et sèche (1999-2000). Les valeurs élevées de NDVI sont représentées en couleur vert foncé.**

<sup>43</sup> Le föhn, mot dialectal suisse, est un vent fort, chaud et sec, apparaissant quand un vent dominant est entraîné au-dessus d'une chaîne montagneuse et redescend de l'autre côté après l'assèchement de son contenu en vapeur d'eau.



## 8.2 VARIATIONS SAISONNIERE ET INTER ANNUELLE DU NDVI

Le profil de NDVI au cours de la campagne agricole (moyen sur l'ensemble des zones agricoles du Maroc) montre que le NDVI augmente progressivement, à partir de novembre, en raison des pluies de début de campagne pour atteindre un maximum aux alentours de la première décade de mars et décroître ensuite (Figure 43). Sachant que la céréaliculture englobe l'essentiel de la couverture végétale des terres agricoles au Maroc en période pluvieuse, le profil de NDVI montre donc l'évolution de la croissance des céréales. Le couvert céréalier est en effet faible en novembre (période de semis), atteint son maximum en mars (période de floraison) et décline ensuite (période de maturation).

À partir de décembre, les campagnes agricoles sont facilement reconnaissables par le profil de NDVI, sur une aire géographique déterminée (variable d'une parcelle à l'ensemble du territoire), et il est possible de distinguer le comportement spécifique de la végétation lors de chaque campagne agricole.

On reconnaît particulièrement celles qui subissent une sécheresse à une certaine période de la campagne et celles qui ne la subissent pas, comme par exemple :

- La campagne agricole 1999-2000, qui a connu une sécheresse sévère de milieu de cycle, durant laquelle le NDVI a chuté à partir de février ;
- La campagne 2001-2002, qui a connu un retard de pluie, durant laquelle le NDVI n'a commencé à progresser qu'à partir de janvier ;
- La campagne 2006-2007, qui a connu quasiment une sécheresse, durant toute la saison et durant laquelle le NDVI était faible ;
- La campagne 2008-2009, qui a connu une pluviométrie abondante et bien répartie, durant laquelle le NDVI a progressé à un rythme élevé et n'a commencé à chuter qu'en fin mars.

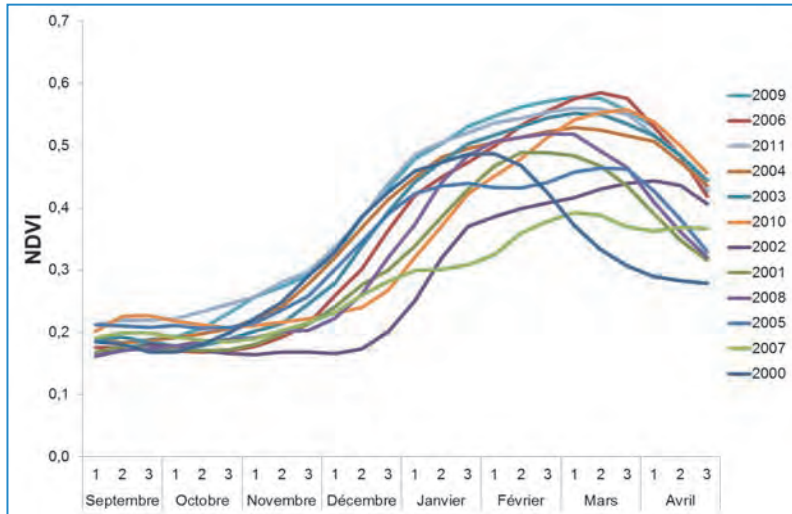


Figure 43: Profil de NDVI moyen national (SPOT-VEGETATION) des zones agricoles, au cours de la campagne agricole, pour les campagnes agricoles de 1999-2000 à 2010-2011. Les campagnes sont classées par ordre décroissant de rendement moyen des céréales d'automne.

### 8.3 VARIATION REGIONALE DU NDVI

Le profil de NDVI (moyen sur l'ensemble des zones agricoles), au cours de la campagne agricole, est présenté dans la (Figure 44) pour les différentes zones agro-écologiques du Maroc. En moyenne, de 1999-2000 à 2010-2011, le NDVI varie dans un rapport de 1 : 2,5 : 2, entre les mois de septembre, mars et avril.

Les différences de NDVI sont plus marquées entre les zones agro-écologiques autour du pic de végétation, vers le mois de mars. Les valeurs moyennes de NDVI sont plus élevées dans les zones *Favorable*, *Intermédiaire* et *Montagne* que dans les zones *Défavorable Sud*, *Défavorable Orientale* et *Saharienne*, en concordance avec la répartition spatiale de la pluviométrie. Durant les mois de septembre et octobre, le NDVI est relativement faible et stable sur l'ensemble du pays en raison de l'absence ou du démarrage de la végétation. Il est cependant plus élevé dans les zones *Favorable*, *Montagne* et *Saharienne*, moyen dans l'*Intermédiaire*, et faible dans les zones *Défavorable Sud* et *Défavorable Orientale*. Dans le cas particulier de la zone *Saharienne* le NDVI est relativement élevé, en début de saison, en raison du recours systématique à l'irrigation.

Le NDVI augmente progressivement, à partir de novembre et atteint un maximum, variable selon les zones, entre la 3<sup>ème</sup> décennie de février et la 3<sup>ème</sup> décennie de mars, et décroît ensuite. Le maximum de NDVI est atteint plus tôt dans les zones *Intermédiaire* et *Défavorable Sud* qui sont semi-arides, à la 3<sup>ème</sup> décennie de février, puis, à la 2<sup>ème</sup> décennie de mars, dans la zone *Favorable* (sub-humide) et

*Montagne* (humide) et enfin, à la 3<sup>ème</sup> décennie de mars, dans les zones irriguées *Défavorable Orientale* et *Saharienne*.

Ces différences sont dues à des différences de longueur de cycle cultural causées par les conditions de culture plus favorables en zones irriguées, à la pluviométrie plus élevée au nord qu'au sud, et aux températures plus faibles en montagne qu'en plaines. La progression du NDVI est relativement rapide dans les zones *Favorable* et *Intermédiaire* et lente dans la zone *Saharienne*.

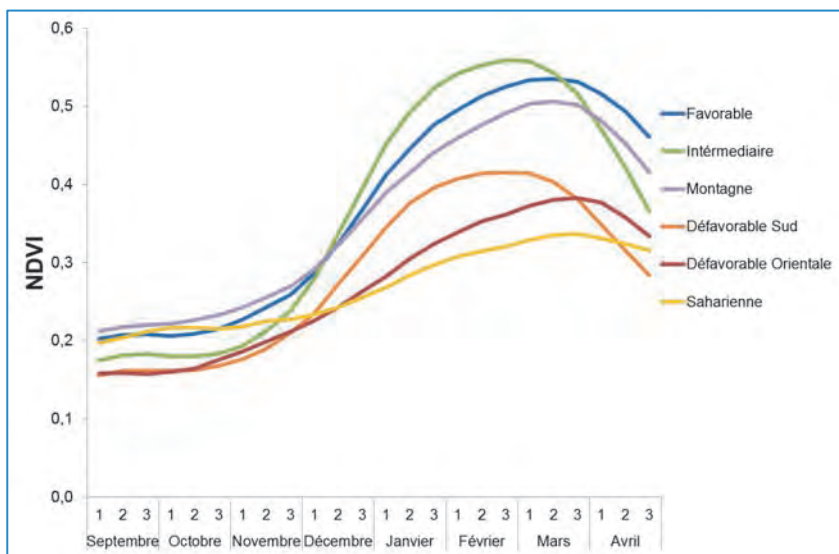


Figure 44 : Profil moyen de NDVI (SPOT-VEGETATION) des zones agro-écologiques du Maroc (NDVI des pixels agricoles uniquement), au cours de la campagne agricole (données de 1999-2000 à 2010-2011).

## VI. PRÉDICTION DES RENDEMENTS CÉRÉALIERS

La prédiction des rendements céréaliers peut être réalisée sur la base de la combinaison de plusieurs approches de prédiction que nous avons développées : non-paramétrique, analogique, paramétrique et la combinaison des deux dernières approches. **Cette approche combinée** met ainsi à contribution les approches analogique et paramétrique en parallèle. Elle permet de minimiser l'erreur de prédiction. Les prédictions des rendements céréaliers des campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010, 2010-2011 et 2011-2012 ont été réalisées par l'INRA, en partenariat avec des institutions nationales et internationales, en utilisant cette approche.

**L'approche non-paramétrique** peut être utilisée pour avoir une description qualitative préliminaire de l'effet du climat sur les cultures. Il est possible de prédire les rendements céréaliers en fonction de la présence ou l'absence des épisodes de sécheresse durant les phases déterminantes pour la croissance et le développement des céréales correspondant au début, milieu et fin de cycle.

**L'approche analogique** consiste à identifier dans l'historique disponible la campagne analogue, du point de vue pluviométrique, à celle pour laquelle on veut prédire les rendements. On suppose alors, qu'à pluviométrie similaire, les rendements sont reproduits à l'égal. Le rendement de la campagne analogue est ensuite actualisé en ajoutant la part de rendement additionnelle due au progrès technologique. L'approche analogique peut être réalisée, de façon préliminaire, sur la base du cumul pluviométrique total de la campagne agricole. Elle peut être réalisée également sur la base de tous les mois ou décades durant la campagne agricole, en tenant compte ainsi de la distribution intra annuelle de la pluviométrie. Une estimation de l'erreur de prédiction peut être associée à la prédiction lorsque plusieurs campagnes analogues sont considérées. L'utilisation de la pluviométrie uniquement ne permet pas de tenir compte des conditions de végétation ayant prévalu au cours de la saison (épisode de sécheresse, vague de chaleur, épidémie de maladie, infestation des mauvaises herbes, etc.). En revanche, l'utilisation du NDVI dans l'approche analogique permet de tenir compte en grande partie de tous ces aléas. Les autres avantages du NDVI sur la pluviométrie est qu'il est disponible en format raster, sans discontinuité, sur l'ensemble du territoire et qu'il reflète le progrès technologique. La prédiction des rendements céréaliers par l'approche analogique, sur la base du NDVI, est optimale à partir de fin février jusqu'à fin mars. L'approche analogique sur la base des deux indicateurs, pluviométrie et NDVI, apporte une précision supplémentaire.

**L'approche paramétrique** met à contribution la corrélation existant entre les rendements et des indicateurs climatiques ou bioclimatiques pour prédire les rendements céréaliers. Aussi bien à l'échelle nationale que des zones agro-écologiques, la corrélation est en moyenne maximale lorsque la pluviométrie décadaire est cumulée sur la saison agricole, d'octobre à fin mars. Il est possible d'améliorer davantage la prédiction en considérant la pluviométrie cumulée par périodes au cours de la saison : deux périodes correspondant aux cumuls de septembre à novembre et de janvier à mars, ou trois périodes correspondant aux cumuls d'octobre à novembre, de décembre à janvier et de février à mars. La prédiction est évidemment plus précise lorsqu'on utilise trois périodes de pluviométrie, plutôt que deux ou une seule période. En plus de la pluviométrie, des indicateurs agro-climatiques issus du modèle FAO du bilan hydrique peuvent servir de prédictors de rendements céréaliers. Cependant, la corrélation est la plus élevée avec l'utilisation du NDVI moyen de février à mars, atteignant un pic de  $R^2$  de près de 90%. Bien que la prédiction puisse commencer dès février, l'erreur de prédiction diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin de saison. L'approche paramétrique permet une prédiction fine des rendements céréaliers, même à l'échelle provinciale.

*Il est possible de combiner plusieurs indicateurs de rendement dans l'approche paramétrique, tels que le NDVI, la pluviométrie et la température. De tous ces indicateurs, c'est le NDVI qui explique la plus grande proportion de la variation des rendements, suivi de la pluviométrie puis de la température. Le NDVI présente trois avantages par rapport à la pluviométrie : (1) la relation avec les rendements céréaliers est linéaire, (2) il est disponible de façon continue (format raster) sur tout le territoire et (3) il intègre le progrès technologique. La température, qui a toujours un effet négatif sur les rendements, en raison du fait qu'elle accentue l'évapotranspiration, n'est pertinente que dans les régions à forte pluviométrie comme dans les provinces de l'extrême nord-ouest du pays, telles que Tanger et Tétouan.*

## 1. APPROCHE NON-PARAMÉTRIQUE

L'approche statistique non-paramétrique (Gommes, 2006) a un intérêt descriptif, permettant d'avoir une appréciation qualitative de l'effet du climat sur les cultures. Elle est particulièrement utile pour l'évaluation des effets qualitatifs et indirects du climat sur les cultures. Une des raisons pour laquelle l'approche non-paramétrique peut être très puissante, est que les variables climatiques ne varient pas de façon indépendante mais constituent un « complexe », tel que celui qui représente la sécheresse. Cette approche nécessite une expertise préalable sur l'environnement et les principaux facteurs qui affectent la production agricole et sur leurs inter-corrélations. Le rendement du blé à l'échelle nationale peut être prédit en utilisant une approche statistique non-paramétrique, c'est-à-dire en utilisant des indicateurs du déroulement de la saison. Il est possible de diviser le cycle de la culture du blé en trois phases qui sont connues pour être déterminantes pour la croissance et le développement des céréales : Le début, milieu et fin de cycle qui correspondent approximativement aux mois d'octobre-novembre-décembre, janvier-février-mars et avril-mai. La sécheresse au Maroc survient généralement en fin de cycle mais il n'est pas rare de l'observer durant les autres phases. L'expérience montre que la sécheresse a un impact différent sur le rendement du blé selon qu'elle survient au début, au milieu ou en fin de cycle (Tableau 10). Cette approche ne peut évidemment pas tenir compte de l'intensité de la sécheresse comme cela est le cas pour l'approche paramétrique.



Tableau 10 : Relation non-paramétrique entre des indicateurs de la sécheresse, par phase du cycle de la culture (début, milieu et fin de cycle), et le rendement en grain du blé tendre (Quintaux/hectare). (0 : Absence de sécheresse ; 1 : Présence de sécheresse).

Année	Début	Milieu	Fin	Pluviométrie (mm)	Rendement (Qx/ha)
1988	0	0	0	387,7	18,60
1989	0	0	0	350,9	14,80
1990	0	1	0	384,9	13,59
1991	0	0	1	392,4	19,50
1992	1	1	0	279,4	7,72
1993	0	0	0	233,9	8,00
1994	0	0	0	343,3	20,06
1995	1	1	0	196,0	5,68
1996	0	0	0	587,2	18,57
1997	0	1	0	465,4	9,43
1998	0	1	0	377,4	14,46
1999	0	0	1	226,9	8,39
2000	0	1	0	263,6	5,23
2001	0	0	1	320,6	13,21
2002	0	1	0	332,2	13,33
2003	0	0	0	411,3	17,83
2004	0	1	0	419,2	18,00
2005	0	1	1	228,4	11,03
2006	0	0	0	377,5	20,76
2007	0	1	0	237,1	6,18
2008	0	1	0	268,1	13,11
2009	0	0	0	547,9	21,60
2010	0	0	0	604,8	16,62
2011	0	0	0	492,9	18,60

À partir du Tableau 10, il est possible de procéder à une analyse de régression multiple avec 4 prédicteurs: les trois variables non-paramétriques (sécheresses de début, milieu et fin de cycle) ainsi que la pluviométrie cumulée de septembre à mai. Après élimination, par la procédure "Stepwise", des variables qui n'apportent pas d'explication significative de la variance des rendements, il en résulte l'équation suivante :

$$\text{Rendement (Qx/ha)} = 6,38 - 3,62 \text{ Milieu (-)} + 0,025 \text{ Pluie (mm)} \quad R^2=61\% \text{ (Pr. } <0.001)$$

Cette équation explique, de manière très hautement significative, une grande part ( $R^2 = 61\%$ ) de la variance des rendements du blé tendre. Mis à part le fait que le rendement dépend de la pluviométrie ( $R^2$  partiel=50%), cette équation montre qu'il est surtout affecté par la sécheresse de milieu de cycle ( $R^2$  partiel=11%) par rapport aux sécheresses des deux autres phases du cycle. Ce résultat de l'analyse non-paramétrique est conforme aux observations de terrain. Grâce à l'approche statistique non-paramétrique on peut donc prédire le rendement du blé tendre au Maroc avec une erreur moyenne de 3,27 Qx/ha à l'échelle nationale.

## 2. APPROCHE ANALOGIQUE

### 2.1 PRÉDICTION PAR LA PLUVIOMÉTRIE

#### 2.1.1 PRÉDICTION PAR LA PLUVIOMÉTRIE TOTALE DE LA SAISON

La manière la plus simple et la plus rapide pour prédire les rendements céréaliers est de procéder à une analyse des analogies entre les campagnes agricoles sur la base de la pluviométrie cumulée sur la saison. Par exemple, une analyse graphique simple de la campagne agricole 2011-2012, sur la base de la pluviométrie cumulée d'octobre à avril, montre une analogie avec les campagnes agricoles 1999-2000 puis 2004-2005 qui ont toutes deux été très sèches (Figure 45). Cette méthode est évidemment très approximative car elle ne tient pas compte de la distribution intra-annuelle de la pluviométrie ni des températures. Néanmoins, elle permet d'évaluer qualitativement la campagne agricole. Comme on le sait, la campagne agricole 2011-2012 a été inférieure à la normale, avec un rendement moyen des trois céréales, de 10,1 Qx/ha à l'échelle nationale (contre 11,9 Qx/ha en moyenne sur la période 2000-2011) en raison de la sécheresse de milieu de cycle (Balaghi *et al.*, 2012).

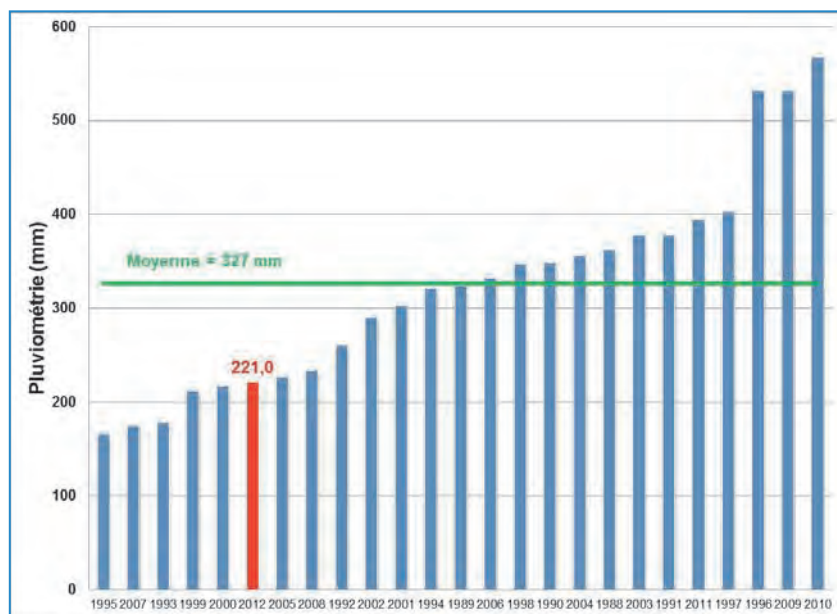


Figure 45 : Classement des campagnes agricoles depuis 1988, en termes de cumul pluviométrique, du 1<sup>er</sup> septembre au 10 avril (Source : Balaghi *et al.*, 2012). Les années de récolte sont indiquées sur l'axe horizontal.

### 2.1.2 PRÉDICTION PAR LA DISTRIBUTION INTRA-ANNUELLE DE LA PLUVIOMÉTRIE

L'analyse par analogie, sur la base de la distribution de la pluviométrie au cours de la saison, permet de prédire avec plus de précision les rendements céréaliers. Cette analyse a été réalisée pour la première fois en janvier 1995 à la demande de la Direction Provinciale de l'Agriculture (DPA) de Meknès, suite à la persistance du temps sec pendant plus de deux mois consécutifs (novembre et décembre). La DPA de Meknès voulait disposer des scénarii probables sur l'issue de la récolte céréalière de la campagne 1994-1995. Cette campagne (en rouge dans le graphe de la Figure 46) n'était similaire à aucune des 35 campagnes précédentes, de 1961 à 1994, en termes de distribution pluviométrique sur les quatre premiers mois de la saison (septembre à décembre). La seule campagne qui lui était proche, était celle de 1974-1975 qui avait elle aussi connu une sécheresse du début du cycle. Les scénarii de production ont donc été avancés sur la base de cette campagne analogue. Il s'est avéré, plus tard dans la saison, que la campagne 1994-1995 n'était analogue à aucune des campagnes passées, et que la prédiction en janvier était hasardeuse car trop précoce.

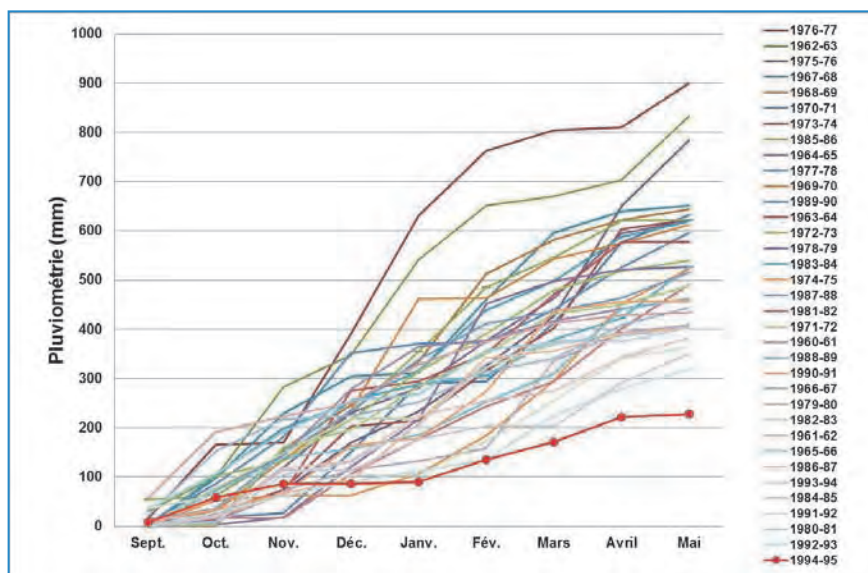


Figure 46 : Pluviométrie cumulée (septembre à mai) de la campagne agricole 1994-1995 à Meknès, comparée à l'historique de 1960 à 1994. Les campagnes agricoles sont classées par ordre croissant de pluviométrie.

Dans le cas de la campagne 1999-2000, la sécheresse s'est prolongée pendant trois mois (janvier à mars), du jamais vu dans l'histoire de l'agriculture au Maroc à l'époque. La campagne analogue a été recherchée cette fois-ci par la méthode de partitionnement (clusters) dans la série de campagnes antérieures (1960-1999), en tenant compte de la distribution de la pluviométrie jusqu'à avril au lieu de janvier comme dans l'expérience de 1994-1995.

Dans la Figure 47 les campagnes agricoles de 1960 à 2000 sont classées par analyse de partitionnement de données (ou *cluster analysis*, en anglais) en fonction de la pluviométrie mensuelle des huit mois de septembre à avril (Balaghi, 2000). L'analyse de partitionnement de données permet de classer des groupes en fonction de leur contenu. Elle permet d'obtenir des groupes les plus contrastés possibles<sup>45</sup>. On distingue alors des analogies entre les différentes campagnes agricoles. Notamment, on remarque la forte analogie de la campagne 1999-2000 avec la campagne agricole 1994-1995 qui ont toutes deux été très sèches.

<sup>45</sup> La distance entre deux groupes est donnée soit par celles entre les objets les plus éloignés dans les groupes (méthode du « complete linkage ») soit en minimisation la variance intra-groupe (méthode de Ward).

La classification montre également deux clusters distincts qui peuvent être typiquement représentatifs, l'un des campagnes agricoles de bonne production céréalière et l'autre des campagnes sèches. Le premier cluster contient notamment, les campagnes 1970-1971 et 1961-1962 et le deuxième cluster les campagnes 1999-2000 et 1974-1975. La campagne 1984-1985, qui a été une moyenne en terme de production, se retrouve faussement dans le cluster représentatif des campagnes de sécheresse - et elle est très semblable à 1980-1981, qui a été très sèche - en raison du fait que la classification n'a pas tenu compte des températures faibles de 1984-1985.

On le voit donc, cette approche demande une bonne connaissance des conditions climatiques qui se sont déroulées lors des différentes campagnes agricoles. Elle ne peut être utilisée qu'en appoint d'autres méthodologies de prédiction des récoltes.

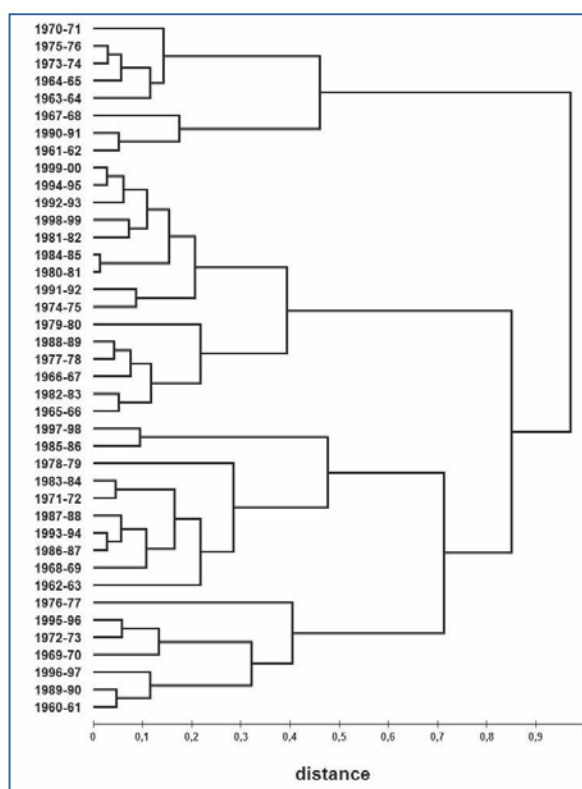
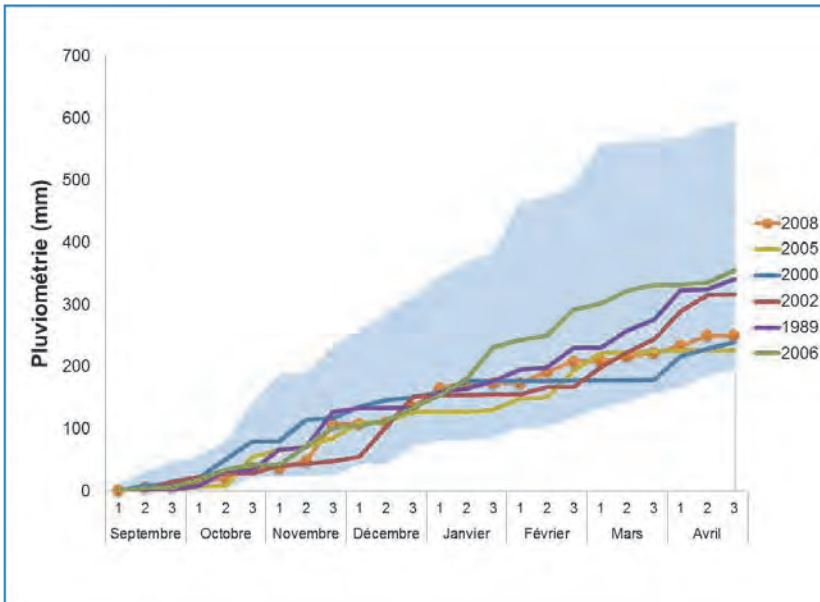


Figure 47 : Dendrogramme de classification des campagnes agricoles (1960 à 2000) selon la pluviométrie mensuelle des huit mois, de septembre à avril, à Meknès (Source : Balaghi, 2000).

L'approche par analogie a été utilisée pour prédire les récoltes céréalières, sur la base de la pluviométrie cumulée entre septembre et fin février, en 2007-2008 par exemple. Elle a permis ainsi d'identifier les campagnes 1988-1989 (230 mm) et 2001-2002 (168 mm) comme étant les plus proches de 2007-2008 (209 mm) (Figure 48). De même, le résultat n'a pas changé à la fin mars puisque les campagnes analogues à 2007-2008 (223 mm) sont 1988-1989 (276 mm), 2001-2002 (244 mm) et 2004-2005 (225 mm). Mais, à la fin avril, les campagnes analogues à 2007-2008 (251 mm) sont 1999-2000 (240 mm) et 2001-2002 (316 mm) et 2004-2005 (276 mm).



**Figure 48 : Analyse par analogie de la campagne agricole 2007-2008 sur la base de la pluviométrie décadaire durant la saison de culture, à l'échelle nationale au Maroc.**

*Les campagnes agricoles analogues à celle de 2007-2008 sont : 1999-2000, 2001-2002, et 2004-2005. La zone en bleu représente la gamme de variation de la pluviométrie décadaire cumulée (Données de 1988 à 2008).*

En 2007-2008, les rendements prévisionnels du blé tendre, du blé dur et de l'orge à la seconde décade d'avril sont alors de 13,0, 12,3 et 9,0 Qx/ha, respectivement, relativement proches des rendements observés (statistiques officielles), qui sont de 13,1, 13,4 et 6,2 Qx/ha.

Dans cette méthodologie, le choix des années analogues est purement subjectif, car il n'y a pas de seuil (au sens statistique du terme) d'analogie entre les campagnes. De même, il faut tenir compte des conditions de température de la campagne agricole qui peuvent influencer sur la demande évaporative et donc sur le bilan en eau des cultures.

La précision de cette méthode a pu être évaluée en utilisant la moyenne de plusieurs campagnes analogues. Pour une année donnée, le rendement prévisionnel est égal à la moyenne des rendements des campagnes analogues, pondérés par leurs distances relatives par rapport à cette année en termes de pluviométrie cumulée à partir d'octobre. Il est possible alors de calculer un intervalle de confiance de la prédiction à partir de ces différentes campagnes analogues. Arbitrairement, les quatre campagnes agricoles les plus proches sont sélectionnées.

### 2.1.3 PROGRÈS TECHNOLOGIQUE

L'approche par analogie doit tenir compte du progrès technologique (0,15 Quintal/ha.an pour les blés, Figure 27 et Figure 28), étant donné que les campagnes analogues peuvent être situées à des distances temporelles plus ou moins éloignées de la campagne que l'on veut prédire. Avant de procéder au calcul de la moyenne des rendements pondérés par les distances relatives, on doit majorer le rendement de chaque campagne analogue par le progrès technologique réalisé entre-temps. Pour l'orge, le cas ne se pose pas car le progrès technologique est statistiquement inexistant (Tableau 7).

### 2.1.4 ERREUR DE PRÉDICTION

Il est possible de calculer statistiquement l'erreur de prédiction du rendement, en considérant que les campagnes analogues constituent un échantillon aléatoire représentatif de la campagne dont on veut prédire le rendement. L'erreur est estimée sur la base de la variation (intervalle de confiance à 90%, par exemple) des rendements des campagnes analogues. Les résultats montrent que l'analyse par analogie, sur la base de la pluviométrie cumulée au cours de la saison, permet ainsi de prédire le rendement du blé tendre, par exemple, avec une précision acceptable, à partir de février. Les prédictions se sont avérées plus précises pour les campagnes 2007-2008 et 2010-2011, que celles de 2008-2009 ou 2009-2010 (Figure 49), car ces deux dernières étaient exceptionnellement humides sans analogie proche avec les campagnes antérieures.

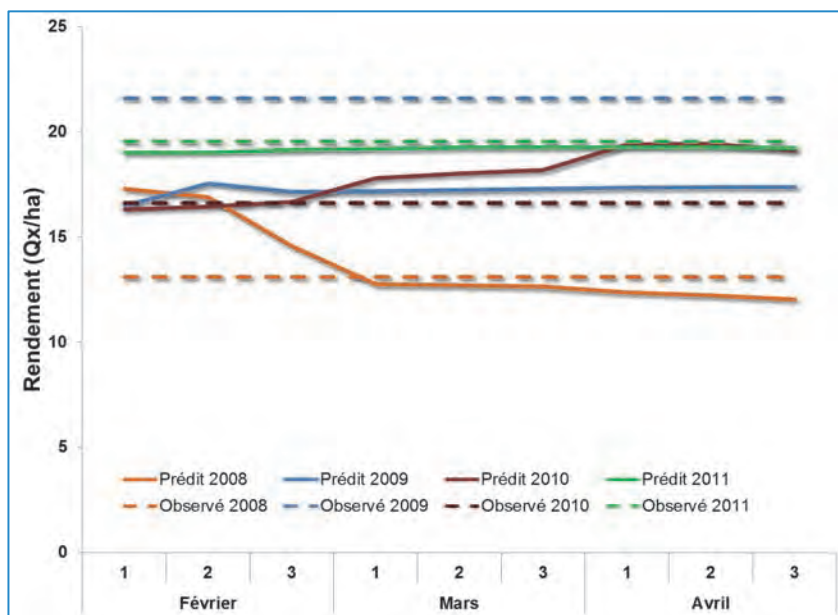


Figure 49 : Prédiction du rendement national du blé tendre pour les campagnes agricoles 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011, sur la base de l'analyse par analogie de la pluviométrie cumulée à partir du mois d'octobre.

Les différences entre les rendements prédits et observés est cependant significative pour les campagnes exceptionnellement pluvieuses de 2008-2009 (547,9 mm) et de 2009-2010 (604,8 mm).

L'erreur de prédiction<sup>46</sup> par cette méthode est également relativement faible à la 3<sup>ème</sup> décennie de mars, pour les campagnes agricoles 2007-2008 (12,6±0,9 Qx/ha, contre 13,1 Qx/ha observé<sup>47</sup>), 2008-2009 (17,3±0,8 Qx/ha, contre 21,6 Qx/ha observé), 2009-2010 (18,2±0,9 Qx/ha, contre 16,6 Qx/ha observé) et 2010-2011 (19,3±0,6 Qx/ha, contre 19,6 Qx/ha observé). On remarque que la prédiction pour le blé tendre n'est pas très éloignée de la réalité même très tôt dans la saison, en février, pour les campagnes agricole 2009-2010 et 2010-2011. La prédiction est inexacte pour la campagne agricole très pluvieuse de 2008-2009.

<sup>46</sup> Le rendement moyen et son intervalle de confiance à 90% sont présentés.

<sup>47</sup> L'erreur d'estimation du rendement observé n'est pas fournie dans les statistiques agricoles de la [DSS](#).



## 2.2 PRÉDICTION PAR LE NDVI

### 2.2.1 PRÉDICTION DANS L'APPLICATION « MARSOP3 »

Dans le cadre d'une convention de recherche et développement avec le JRC, l'INRA utilise l'application Web "MARSOP3" (<http://www.marsop.info/marsop3/>), qui est reliée à la base de données agro-climatique de l'Union Européenne, permettant de réaliser en temps réel une analyse des conditions climatiques (température, pluviométrie, radiation solaire, évapotranspiration potentielle, nombre de jours froids ou chauds, nombre de degrés x jours, etc.) et des conditions de végétation (NDVI) sur tout le territoire national, à partir d'une grille d'interpolation spatiale de 25x25 km, produite par Alterra. Parmi ses fonctionnalités, cette application permet de procéder à une analyse de l'analogie entre les différentes campagnes agricoles sur la base des conditions climatiques et de végétation (NDVI) (Figure 50).

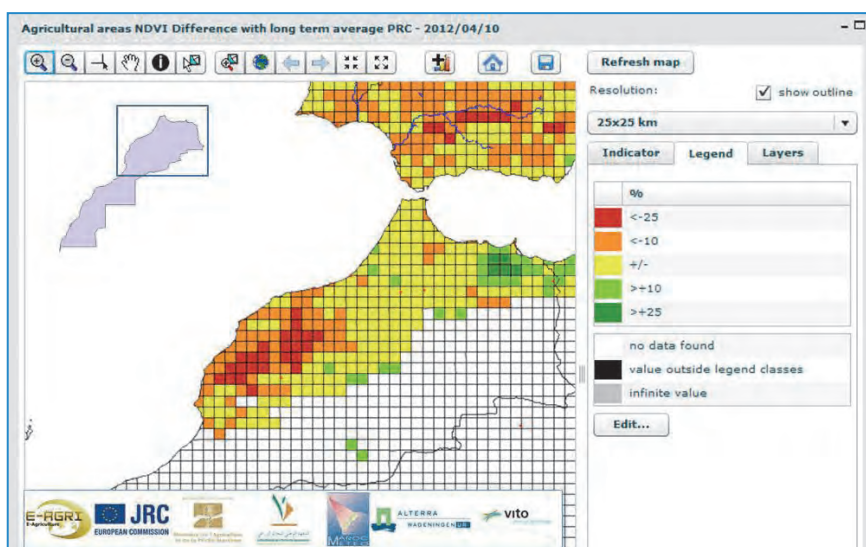


Figure 50 : L'application Web "MARSOP3" pour l'analyse agro-climatique. La différence de NDVI à la première décennie d'avril par rapport à la normale est un moyen supplémentaire d'analyse offert par l'application. La base de comparaison peut être changée. Résolution 25x25 km<sup>2</sup> (Source : Balaghi *et al.*, 2012).

Un exemple est donné pour l'analyse par analogie de la campagne agricole 2011-2012, qui a été sèche et exceptionnellement froide. L'analyse par analogie a été réalisée sur la base du NDVI décadaire, du début février à la première décade d'avril. Elle montre l'analogie avec la campagne agricole 2000-2001, puis relativement de façon plus distante avec les campagnes 2007-2008 et 2004-2005 (Balaghi *et al.*, 2012) (Figure 51). Sur la base de la pluviométrie, l'analyse a permis d'identifier une analogie avec les campagnes 1999-2000 et 2004-2005. La différence de résultats, entre l'analyse par analogie sur la base du NDVI (Figure 51) et celle réalisée sur la base de la pluviométrie, vient du fait que la campagne agricole 2011-2012 a été l'une des plus froides de l'histoire récente du Maroc, en termes de valeurs absolues et de durée, à partir de la deuxième moitié du mois de janvier. Les basses températures ont permis d'atténuer l'effet de la sécheresse de 2011-2012 et donc d'avoir malgré tout une végétation verte, détectable à travers le NDVI. On le voit, encore une fois dans cet exemple, l'intérêt de l'approche par analogie mais aussi des précautions à prendre en l'utilisant, démontrant l'intérêt de l'expertise agrométéorologique dans le domaine de la prédiction des récoltes.

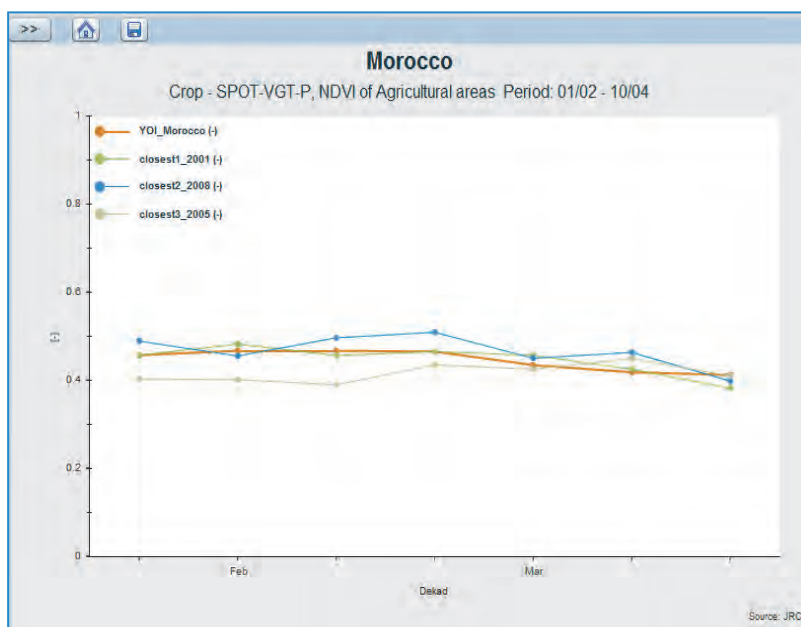


Figure 51 : Analyse par analogie de la campagne agricole 2011-2012, sur la base de l'indice de végétation (NDVI-SPOT VEGETATION) des zones agricoles, à l'échelle nationale. La campagne agricole 2011-2012 (en orange) est comparée aux campagnes précédentes. La campagne agricole 2000-2001 est celle qui est la plus ressemblante du point de vue du profil du NDVI, suivie de 2007-2008 et de 2004-2005 (Source : Balaghi *et al.*, 2012).

### 2.2.2 PRÉDICTION PAR LE NDVI

La prédiction du rendement du blé tendre, réalisée grâce à l'analyse par analogie du NDVI moyen au cours de la saison agricole (données NOAA-AVHRR de 1988 à 2011), pour chaque décade à partir de février, est montrée en Figure 52 pour les campagnes agricoles de 2008-2009 à 2010-2011. Pour chacune de ces campagnes, le rendement prédit est égal à la moyenne des rendements des campagnes analogues pondérés par leurs distances relatives par rapport à cette campagne. Arbitrairement, les quatre campagnes agricoles les plus similaires sont sélectionnées, pour chaque décade.

### 2.2.3 PRISE EN COMPTE DU PROGRÈS TECHNOLOGIQUE

Le progrès technologique n'est pas rajouté dans le cas de l'utilisation du NDVI, car il est inclus dans le NDVI. En effet, cet indice reflète non seulement l'état d'humidité et de température de la saison mais également l'efficacité avec laquelle les céréales valorisent ces facteurs en fonction des variétés et des techniques culturales utilisées. En d'autres termes, l'indice NDVI sera d'autant plus élevé que les conditions climatiques sont favorables (dans la limite inférieure à 550 mm de pluie) et que les variétés et les facteurs de production sont améliorés.

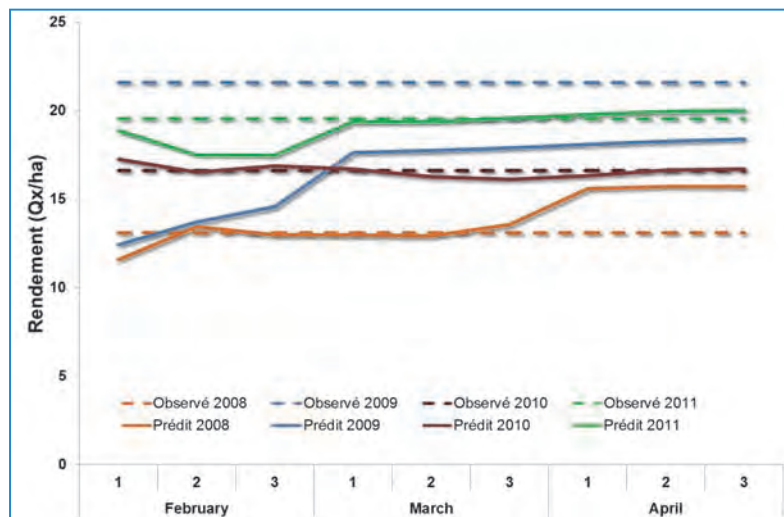


Figure 52 : Prédiction du rendement national du blé tendre pour les campagnes agricoles 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011, sur la base de l'analyse par analogie du NDVI (données NOAA-AVHRR, de 1988 à 2011) moyen décadaire à compter de février.

#### 2.2.4 ESTIMATION DE L'ERREUR DE PRÉDICTION

L'erreur de prédiction diminue à l'approche de la fin de la campagne agricole, excepté en 2007-2008. Par exemple, la prédiction du rendement du blé tendre pour la campagne agricole 2010-2011 est, en fin février de  $17,5 \pm 1,09$  Qx/ha, en fin mars 2011 de  $19,6 \pm 0,51$  Qx/ha et en fin avril de  $20,0 \pm 0,44$  Qx/ha, contre 19,6 Qx/ha observé. L'erreur de prédiction de cette méthode est également relativement faible à la 3<sup>ème</sup> décade de mars, pour les campagnes agricoles 2007-2008 ( $13,5 \pm 1,1$  Qx/ha, contre 13,1 Qx/ha observé), 2008-2009 ( $17,9 \pm 0,5$  Qx/ha, contre 21,6 Qx/ha observé) et 2009-2010 ( $16,1 \pm 0,7$  Qx/ha, contre 16,6 Qx/ha observé). On remarque que la prédiction n'est pas très éloignée de la réalité, même très tôt dans la saison, en février, c'est à dire au moment où il n'est pas encore possible d'utiliser les méthodes paramétriques de prédiction des rendements. La prédiction est, encore une fois, mauvaise pour la campagne agricole très particulière de 2008-2009. En revanche, l'erreur de prédiction est plus faible en utilisant le NDVI que la pluviométrie.

#### 2.3 PRÉDICTION PAR LA PLUVIOMÉTRIE ET LE NDVI

Le logiciel CGMS Statistical Tool (CST) d'analyse statistique de la campagne agricole permet de réaliser des prédictions de rendement sur la base de plusieurs prédicteurs, à partir d'une analyse par analogie au moyen d'une Analyse en Composantes Principales (ACP). C'est un logiciel statistique développé pour aider les agrométéorologues à sélectionner les prédicteurs des modèles de régression multiple. D'autres types de logiciels similaires à CST existent, comme par exemple STATCAT (Curnel *et al.*, 2004). Le logiciel CST, a été adapté pour le Maroc dans le cadre du projet E-AGRI. Il permet de réaliser la prédiction des rendements céréaliers par deux types d'analyse statistique (Figure 53) : Une analyse de scénario (non-paramétrique) basée sur une ACP et une analyse de régression multiple (paramétrique). Ces deux types d'analyses sont réalisées sur des séries chronologiques, de rendements agricoles et d'indicateurs des conditions agro-climatiques pour les différentes campagnes agricoles. Les indicateurs sont de trois types : (1) des sorties du modèle de croissance et de développement des cultures WOFOST ; (2) la pluviométrie annuelle cumulée à partir de septembre ; et (3) des indices de végétation issus de la télédétection spatiale (NDVI et autres). Les prédictions des rendements peuvent être réalisées, à plusieurs échelles spatiales (provinces, zone agro-écologique, pays), de façon décadaire à partir de fin février et jusque fin avril. En Figure 54 est présentée l'ACP de la campagne agricole 2010-2011, sur la base de l'indice de végétation NDVI (NOAA-AVHRR) moyen de février à fin mars et de la pluviométrie cumulée de septembre à fin mars. La série utilisée comprend les données de NDVI et de pluviométrie de 1985 à 2010. La campagne agricole 1996-1997 a été éliminée de l'analyse en raison de la particularité de sa distribution intra-annuelle de la pluviométrie.

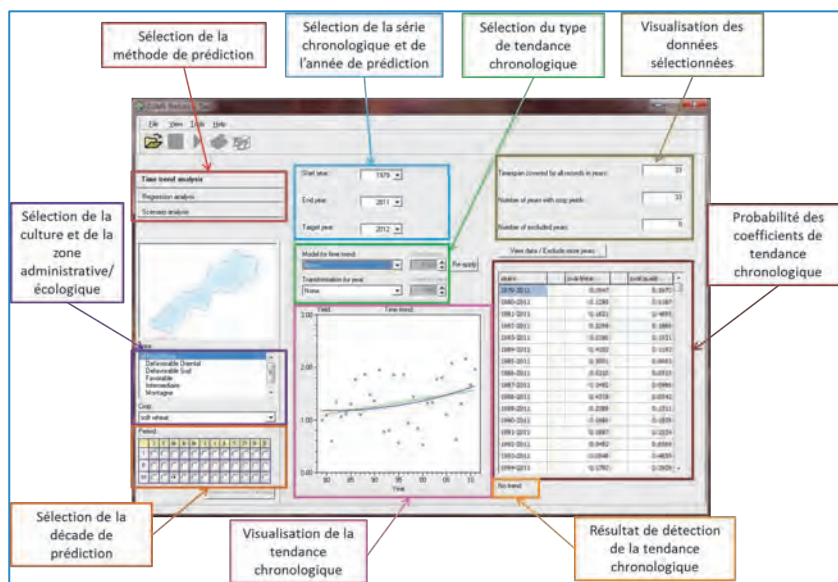
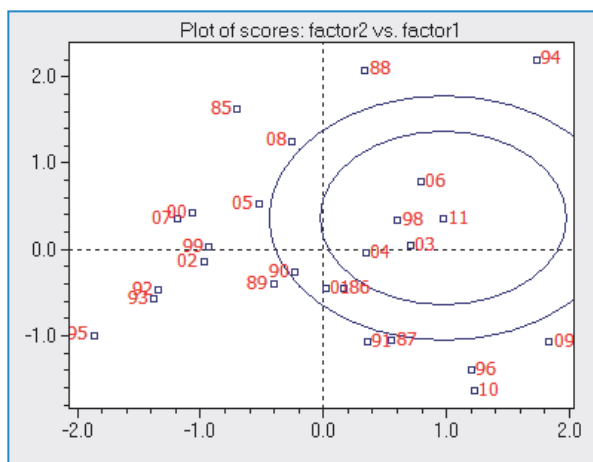


Figure 53 : Le logiciel "CGMS Statistical Toolbox" d'analyse statistique pour la prédiction des rendements céréaliers adapté au Maroc.

Par exemple, à la 3<sup>ème</sup> décennie de mars 2011, le résultat de l'ACP montre que les campagnes analogues à 2010-2011 sont, par ordre, celles de 1997-1998, 2002-2003, 2005-2006 et 2003-2004. Le rendement prévisionnel de 2010-2011 est donc égal à la moyenne des rendements de ces campagnes analogues, pondérés par leurs distances relatives par rapport à 2010-2011 et auxquels on a rajouté l'augmentation de rendement résultant du progrès technologique (0,15 Quintal/ha.an). À la différence des analyses par analogie réalisées séparément sur la base du NDVI ou de la pluviométrie, l'ACP permet de réaliser l'analyse par analogie uniquement sur les valeurs finales de ces deux facteurs et non sur leur distribution au cours de la campagne agricole.



**Figure 54 : Analyse par analogie de la campagne agricole 2010-2011 réalisée par Analyse en Composantes Principales avec le logiciel "CGMS Statistical Toolbox".**

*L'analyse est réalisée sur la base de l'indice de végétation NDVI (NOAA-AVHRR, de 1988 à 2011) et de la pluviométrie à la troisième décennie de mars 2011, à l'échelle nationale. Les campagnes analogues à 2010-2011 sont, par ordre d'analogie : 1997-1998, 2002-2003, 2005-2006 et 2003-2004.*

L'exercice est répété pour les campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011 pour chaque décennie, de début février à fin avril, afin de prévoir le rendement du blé dur à l'échelle nationale (Figure 55). L'analyse par analogie permet d'identifier différentes campagnes agricoles analogues en fonction des décennies. Par exemple, jusqu'à la deuxième décennie de février (468 mm), aucune analogie n'a pu être trouvée entre la campagne agricole 2008-2009 et tout l'historique, depuis 1985, en raison de l'extrême pluviosité de cette campagne agricole. À la 3<sup>ème</sup> décennie de mars, la campagne 2008-2009 (530,5 mm) ressemblait à celle de 1995-1996 (523,6 mm) et, de façon plus éloignée, à celle de 1986-1987 (413,6 mm). Cependant, à la 3<sup>ème</sup> décennie d'avril 2008-2009 (542,7 mm), l'analogie a permis de détecter, dans l'ordre : 1995-1996 (546,9 mm), 1986-1987 (438,8 mm), 1990-1991 (371,5 mm) et 2002-2003 (404,2 mm). L'ACP permet donc d'avoir une prédiction, même indicative, du rendement à partir de début mars et de façon très rapide.

Cette prédiction est d'autant plus précise que s'il existe, dans l'historique disponible, des campagnes agricoles proches de l'année en cours, du point de vue du NDVI et de la pluviométrie. Si l'année s'avère très particulière, l'analyse par analogie a peu de chances d'aboutir à une prédiction fiable. C'était le cas en particulier des campagnes agricoles 2008-2009 et 2009-2010 qui étaient très pluvieuses (> 550 mm), car :

1. Les rendements céréaliers au Maroc n'augmentent pas proportionnellement à la pluviométrie au-delà de 378 mm ;

2. Le NDVI n'augmente presque plus avec la pluviométrie au-delà d'un cumul de 550 mm au cours de la campagne agricole.

Dans le cas de la prédiction de la campagne agricole 2010-2011, la différence entre les rendements prévus et observés du blé dur, à l'échelle nationale, a été de 2,1 Qx/ha à la 3<sup>ème</sup> décade de février, de 1,4 Quintal/ha à la 3<sup>ème</sup> décade de mars et de seulement 0,7 Quintal/ha à la 3<sup>ème</sup> décade d'avril (Figure 55).

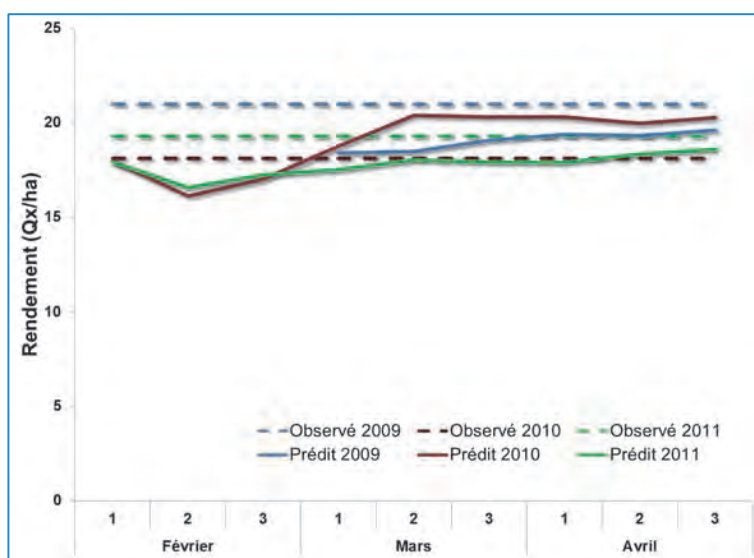


Figure 55 : Prédiction par analogie des campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011, sur la base de l'indice de végétation NDVI (données NOAA-AVHRR, de 1988 à 2011) et de la pluviométrie, à l'échelle nationale.

### 3. APPROCHE PARAMÉTRIQUE

L'approche paramétrique consiste à trouver des corrélations entre les rendements des cultures et une ou plusieurs variables climatiques (pluie, température, etc.) ou agro-climatiques (NDVI, etc.). Les méthodes paramétriques de prédiction des récoltes font largement appel à l'expertise agronomique et météorologique, à des capacités d'analyse statistique poussée ainsi qu'à la maîtrise des nouvelles technologies en Systèmes d'Information Géographique et traitement des images satellitaires.

La principale précaution à prendre avant d'utiliser cette approche est de s'assurer que des facteurs non climatiques n'interfèrent pas dans la prédiction, comme par exemple le progrès technologique (changement de variétés, introduction de l'irrigation, nouvelles techniques agronomiques, etc.) ou des facteurs socio-économiques (politique des prix, subventions, etc.). Cette approche nécessite de toujours considérer "*la loi des facteurs limitants*" dite aussi loi du minimum. La loi des facteurs limitants, est l'un des principes les plus importants de l'agronomie pratique qui fut énoncée en 1828 par Carl Sprengel puis adapté par Liebig vers 1850. Le principe de cette loi énonce que le rendement d'une culture est limité par les facteurs (fertilisant, eau, etc.) qui en premier viennent à manquer. L'approche paramétrique recherche les variables environnementales (climat, sol, maladies, fertilisation, etc.) qui expliquent la plus grande part de la variabilité de la production agricole.

Une étude réalisée sur 12 pays européens a montré que de simples variables climatiques, pédologiques et économiques pouvaient expliquer la plus grande part de la variation des rendements du blé et leur progression temporelle en Europe (Bakker *et al.*, 2005). Parmi celles-ci, les variables climatiques (pluviométrie, température, évapotranspiration et radiation globale) expliquent le plus grand pourcentage de la variabilité des rendements, plus que les variables pédologiques ou économiques. Dans certains pays où le climat n'est pas limitant, soit parce que la pluviométrie est suffisante ou que les possibilités d'irrigation existent, les rendements des cultures ne dépendent pas de la pluviométrie, mais essentiellement des facteurs biotiques (maladies, ravageurs) ou agronomiques (fertilisation, traitement phytosanitaire). En général, dans ces pays les rendements augmentent de façon linéaire en raison du progrès technologique et sont très peu variables d'une année à l'autre. Par exemple en Belgique, le modèle B-CGMS (<http://b-cgms.cra.wallonie.be/en/>), qui est une adaptation de CGMS, est utilisé à des fins opérationnelles en Europe pour le suivi de l'état des cultures à partir de données agrométéorologiques. Il explique moins bien la variation des productions agricoles que la simple tendance technologique calculée par régression linéaire (Decrem *et al.*, 2002).

Dans le cas du Maroc, la distribution (inter et intra-annuelle) de la pluviométrie est évidemment le facteur qui explique la majeure partie de la variabilité des rendements agricoles, en général, et céréaliers en particulier en raison du caractère semi-aride du climat et des possibilités limitées d'irrigation (1,46 million d'hectares irrigués, soit uniquement 17% des superficies agricoles).

L'approche paramétrique peut être utilisée à plusieurs échelles spatiales, en fonction de la disponibilité des données. Avec le développement des méthodes d'interpolation des données climatiques et de l'imagerie satellitaires, la principale limitation à l'utilisation de l'approche paramétrique à des échelles spatiales fines vient de la disponibilité en données de statistiques agricoles. Les statistiques céréalières sont fournies par la DSS à l'échelle des provinces, à partir d'un échantillonnage sub-provincial, dit « *aréolaire* ». L'estimation de la superficie de céréales est réalisée, à partir d'enquêtes de terrain couteuses, sur 3.000 unités secondaires d'échantillonnage appelé aussi segments, réparties sur 20 millions d'hectares, entre le 10 février et le 30 mars de chaque année.



Depuis l'année 2008, la DSS a renouvelé cet échantillon, tout en intégrant les techniques modernes de la géomatique (télédétection et système d'information géographique) qui permettent une amélioration de la précision des estimateurs.

L'approche paramétrique commence toujours par la constitution d'une base de données, contenant tous les facteurs ou indices agro-climatiques pertinents ainsi que les rendements des cultures à la plus grande échelle possible (les provinces, dans le cas des céréales au Maroc). Une fois que la base de données est constituée, le travail d'analyse et d'expertise de l'agrométéorologue peut commencer. L'approche paramétrique repose sur des analyses statistiques de régressions simples ou multiples, qui peuvent être réalisées aussi bien sur de simples tableurs qu'avec des logiciels statistiques plus sophistiqués. Les "règles d'or" à considérer, en régression statistique pour la prédiction des récoltes, sont décrites par Gomme *et al.* (2010).

La régression linéaire, simple ou multiple, est souvent utilisée en appoint aux modèles de simulation de la croissance et du développement des cultures pour la prédiction. C'est le cas de la méthodologie utilisée par le JRC pour réaliser les prédictions de récolte sur tous les pays de l'Union Européenne ainsi que certains pays voisins, dont le Maghreb. C'est une méthodologie en deux étapes, qui consiste d'abord à calculer des indicateurs de déroulement de la saison agricole (bilan en eau, état végétatif de la culture, etc.) grâce au modèle WOFOST. Les indicateurs issus de ce modèle servent ensuite de prédicteurs dans des régressions linéaires multiples avec les rendements des cultures issus des statistiques agricoles officielles. Les prédictions des récoltes ne proviennent donc pas directement des modèles de simulation mais des modèles de régression linéaire.

La sélection des prédicteurs de la régression linéaire, passe par deux étapes, dites de "calibration" et de "validation". L'étape de calibration consiste à trouver parmi l'ensemble des prédicteurs potentiels (de 1 à plusieurs centaines selon les cas) ceux qui sont les plus corrélés aux rendements des cultures, de manière à maximiser le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la régression. Des procédures statistiques de sélection automatique des prédicteurs (Forward, Stepwise, etc.) existent dans la plupart des logiciels statistiques afin d'éviter les problèmes de multicollinéarité. Cependant, les modèles de régression avec des  $R^2$  élevés ne sont pas forcément ceux qui ont un pouvoir prédictif élevé. Pour cette raison, l'étape de validation est importante à entreprendre. La méthode de validation préconisée, en prédiction des récoltes à partir de régression multiples, est la "validation croisée" (voir par exemple, Balaghi *et al.*, 2008).

Cette technique de validation permet de vérifier la reproductibilité des résultats, c'est à dire le pouvoir de prédiction du modèle de régression pour une année "nouvelle", qui n'a pas été utilisée pour calibrer le modèle. La validation croisée permet ainsi de calculer un coefficient de détermination en validation croisée<sup>48</sup> ( $R_p^2$ ) ainsi que l'erreur de prédiction.

---

<sup>48</sup> Le coefficient de détermination en validation croisée ( $R_p^2$ ) est défini comme le coefficient de détermination de la régression entre les valeurs observées et les valeurs prédites (voir par

### 3.1 PRÉDICTION PAR LA PLUVIOMÉTRIE

Les tentatives de prédiction opérationnelle des rendements céréaliers par la pluviométrie sont nombreuses au Maroc (Douguédroit et Messaoudi, 1998 ; Douguédroit *et al.*, 1998 ; Skees *et al.*, 2001 ; Stoppa et Hess, 2003 ; Balaghi *et al.*, 2008). Les divers modèles de prédiction proposés reposent tous sur des approches empiriques statistiques. Ces approches statistiques se basent sur des régressions linéaires simples ou multiples, à différentes échelles spatiales (pays, zones agro-écologiques ou provinces), entre les rendements des céréales et les valeurs pluviométriques ponctuelles (journalière, décadaire, mensuelle ou annuelle), ou cumulées sur différentes périodes de l'année. Ces modèles de régression linéaire permettent, en général, d'obtenir des prédictions avec des précisions très acceptables, variables en fonction des échelles spatiales, de l'espèce (blé tendre, blé dur ou orge) et des séries chronologiques disponibles.

La relation entre les rendements des céréales et la pluviométrie cumulée au cours de la campagne agricole s'améliore de façon continue, au fur et à mesure de l'avancement de la campagne agricole, de mi-octobre à fin mars (Figure 56). Les valeurs élevées des coefficients de détermination ( $R^2$ ) atteintes à fin mars ainsi que l'amélioration continue des  $R^2$  au cours de la campagne agricole montrent la fiabilité de la pluviométrie cumulée comme prédicteur du rendement des trois céréales. À la fin mars, les  $R^2$  calculés sur la période 1988-2011 atteignent des valeurs de 61, 68 et 70%, respectivement pour le blé tendre, le blé dur et l'orge. Les courbes de  $R^2$  suggèrent d'utiliser le cumul de pluviométrie entre octobre et mars pour la prédiction des rendements céréaliers.

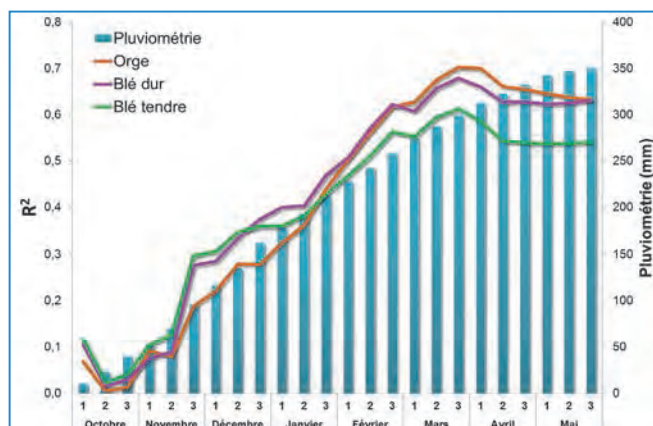


Figure 56 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la régression linéaire entre les rendements des céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et la pluviométrie décadaire cumulée, par décade d'octobre à mai, au niveau national. La pluviométrie moyenne cumulée d'octobre à mai est représentée d'illustration (Données de 1988 à 2011).

exemple, Balaghi *et al.*, 2008). Le  $R_p^2$  permet de tester la stabilité (ou prédictibilité) des modèles statistiques de prédiction.

### 3.1.1. PRÉDICTION PAR LA PLUVIOMÉTRIE CUMULÉE PAR PÉRIODES DURANT LA SAISON

Il est possible de prédire les rendements céréaliers en utilisant des modèles de régression simples ou multiples, sur la base la pluviométrie cumulée au cours de la campagne agricole (Balaghi *et al.*, 2008). Il est possible de prédire les rendements sur la base de la pluviométrie cumulée sur plusieurs périodes, variant de 2 à 8 mois consécutifs durant la saison. Pour des périodes de 4 à 8 mois consécutifs, des régressions simples sont suffisantes. Dans tous les cas, les périodes à prendre en compte gravitent autour de la période très pluvieuse de la saison agricole, qui se situe en moyenne entre novembre et février (Figure 39).

L'exemple de la prédiction du rendement du blé tendre à l'échelle nationale, par périodes de pluviométrie cumulée au cours de la campagne, est montré en Figure 57. Si l'on veut choisir des périodes de 4 mois et au-delà pour réaliser la prédiction, c'est celle qui dure 6 mois et qui est comprise entre octobre et mars qui donne le meilleur  $R^2$  (61%). Si l'on veut choisir des périodes de 2 ou 3 mois, des régressions multiples sont mieux appropriées pour obtenir des  $R^2$  partiels statistiquement significatifs. Pour des périodes de 3 mois consécutifs, ce sont celles de janvier à mars ( $R^2$  partiel=38%) et de septembre à novembre ( $R^2$  partiel=32%) qui permettent d'obtenir les meilleures prédictions ( $R^2$  total=70%).

Le maximum de  $R^2$  (78%) est obtenu en utilisant trois périodes de 2 mois consécutifs, de février à mars ( $R^2$  partiel=34%), d'octobre à novembre ( $R^2$  partiel=35%), puis de décembre à janvier ( $R^2$  partiel=9%). Les périodes consécutives choisies ont été choisies de manière à ne pas se chevaucher pour éviter la multi-colinéarité entre prédicteurs. Le nombre optimal de périodes (prédicteurs) à considérer dépend de la longueur de la série statistique disponible afin de s'assurer d'éviter les problèmes de sur-ajustement<sup>49</sup> (*overfitting* en anglais).

---

<sup>49</sup> Le surajustement se produit quand un modèle statistique décrit une erreur aléatoire ou bruit au lieu de la relation sous-jacente. Le surajustement se produit généralement quand un modèle est excessivement complexe, ayant trop de prédicteurs (multi-colinéarité entre prédicteurs) par rapport au nombre d'observations.

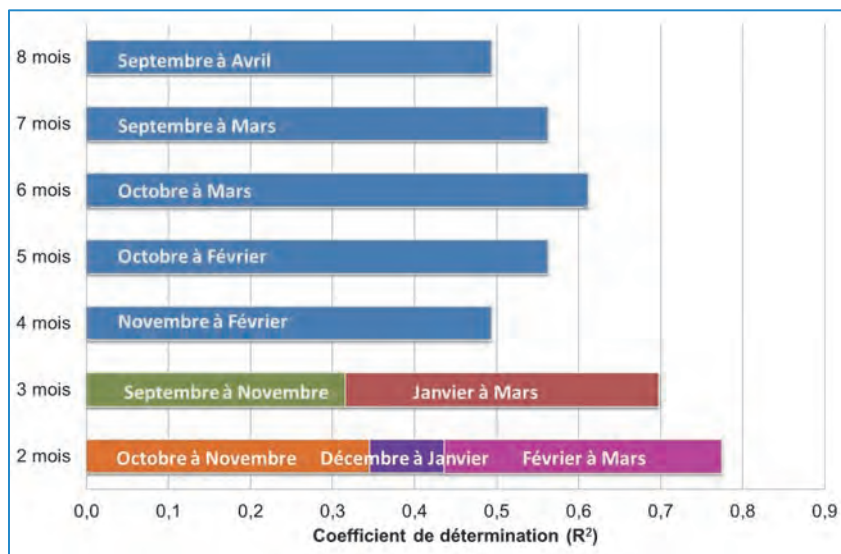


Figure 57 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la régression linéaire entre le rendement du blé tendre et la pluviométrie décadaire cumulée, par périodes au cours de la campagne agricole, à l'échelle nationale (Données de 1988 à 2011). Pour les périodes de 2 et 3 mois, les barres de différentes couleurs représentent les  $R^2$  partiels des modèles de régression.

### 3.1 .2. PRÉDICTION PAR LA PLUVIOMÉTRIE CUMULÉE SUR TOUTE LA SAISON

La prédiction des rendements céréaliers par la pluviométrie peut donc être réalisée, de façon simple, en utilisant uniquement le cumul pluviométrie d'octobre à mars. Il est possible d'améliorer davantage la prédiction par cette relation en utilisant une régression logarithmique qui s'adapte mieux à la forme de la relation entre les rendements et la pluviométrie (El Aydam, Balaghi et Baruth, 2010). Cette forme suggère par ailleurs la nécessité d'une transformation de variable<sup>50</sup>, dans le cas où la pluviométrie est utilisée avec un autre type prédicteur (NDVI ou autre), dans une équation de régression multiple.

<sup>50</sup> Un modèle de régression est dit « linéaire » lorsqu'il est linéaire dans ses coefficients de régression (paramètres). Un modèle est dit « intrinsèquement linéaire » lorsqu'il n'est pas linéaire dans les paramètres mais qu'il est possible de le linéariser par une transformation de variables. Des précautions statistiques sont à prendre lorsqu'on linéarise un modèle intrinsèquement linéaire. Enfin, un modèle est dit « intrinsèquement non linéaire » lorsqu'il n'est pas possible de le linéariser.

À l'échelle nationale, les corrélations entre les rendements et la pluviométrie sont fortes en utilisant une régression logarithmique (Figure 58). Cependant, certaines campagnes agricoles, comme celles de 1996-1997 ou 1999-2000, n'entrent pas dans ce type de relation en raison de leurs distributions pluviométriques particulières. Par exemple, en 1996-1997, bien que la pluviométrie ait été supérieure à la moyenne (466 mm), la sécheresse qui a duré de février à début avril (Figure 38) a affecté les rendements céréaliers (9,4 ; 9,1 et 6,6 Qx/ha pour le blé tendre, le blé dur et l'orge, respectivement). En faisant abstraction de la campagne 1996-1997, les corrélations entre les rendements et la pluviométrie deviennent plus fortes, avec des valeurs de  $R^2$  de 84, 82 et 77%, pour le blé tendre, le blé dur et l'orge, respectivement (Figure 58).

La méthodologie de prédiction basée sur la pluviométrie cumulée a été utilisée pour la prédiction de la récolte céréalière depuis 2009 par l'INRA en collaboration avec le JRC, en combinaison avec des méthodologies basées sur l'imagerie satellitaire (NDVI), l'analyse par analogie et le modèle WOFOST de croissance et développement des cultures (Narciso et Balaghi, 2009 ; El Aydam, Balaghi et Baruth, 2010 ; El Aydam et Balaghi, 2011 ; Balaghi *et al.*, 2012). Par exemple, en 2010 les rendements prévus en fin mars à l'échelle nationale, à partir de la pluviométrie cumulée de septembre à mars, étaient 2,2, 2,0 et 1,6 tonnes/ha pour le blé tendre, le blé dur et l'orge, respectivement, contre 1,7, 1,8 et 1,4 tonne/ha relevés dans les statistiques officielles. Comme on le voit dans cet exemple, bien que la prédiction ne soit pas très éloignée de la réalité, il existe encore une marge d'amélioration possible qui doit être cherchée dans la combinaison d'autres méthodologies et indicateurs de rendement.

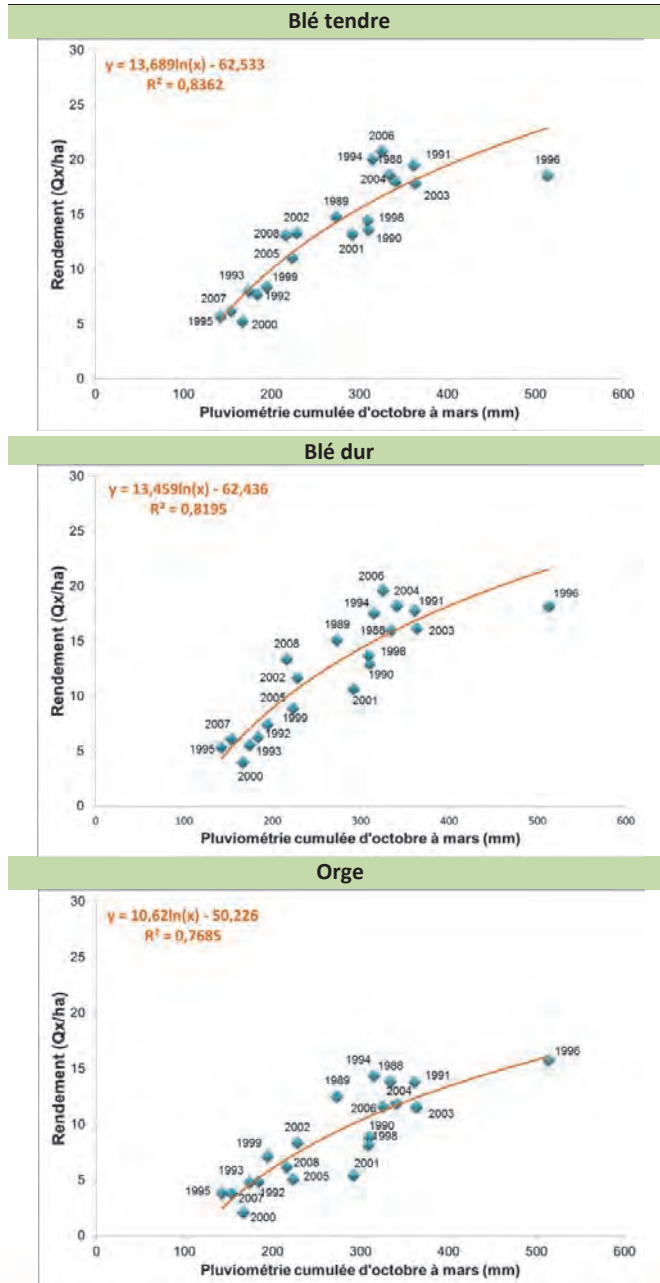


Figure 58 : Relation entre le rendement du blé tendre, du blé dur, de l'orge et la pluviométrie cumulée de septembre à mars au niveau national (Données de 1988 à 2008).

De la même manière qu'à l'échelle nationale, les rendements céréaliers peuvent être prédits par la pluviométrie cumulée d'octobre à mars, à l'échelle des zones agro-écologiques, avec une relative précision, à l'exception de la zone *Saharienne* où la production dépend de l'irrigation. La prédiction des rendements céréaliers à l'échelle des zones agro-écologiques, est réalisable en utilisant des régressions linéaires simples, sur la base de la pluviométrie cumulée d'octobre à mars (Tableau 11). La forme de la relation peut être approchée par une fonction logarithmique dans 5 zones sur les 6. En dehors des zones *Montagne* et *Saharienne*, qui ne représentent que très peu la production nationale, les  $R^2$  des modèles de régression sont supérieurs à 62%. C'est dans la zone *Intermédiaire*, à pluviométrie moyenne égale à 366 mm, que les  $R^2$  sont les plus élevés.

**Tableau 11 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre le rendement du blé tendre, du blé dur, de l'orge et la pluviométrie cumulée d'octobre à mars à l'échelle des zones agro-écologiques (Données de 1988 à 2008).**

Zone agro-écologique	Forme de la relation	$R^2$		
		Blé tendre	Blé dur	Orge
Favorable	Logarithmique	0,70	0,66	0,71
Intermédiaire	Logarithmique	0,80	0,73	0,70
Défavorable Orientale	Logarithmique	0,62	0,75	0,59
Défavorable Sud	Logarithmique	0,71	0,65	0,79
Montagne	Logarithmique	0,53	0,61	0,63
Saharienne	Linéaire	0,44	0,03	0,66

### 3.2. PRÉDICTION PAR LES INDICES AGRO-CLIMATIQUES

Certains indices agro-climatiques, combinant des facteurs climatiques avec des caractéristiques des cultures et des sols, issus du modèle de calcul du bilan en eau de la culture, sont très corrélés au rendement des céréales. Les indices agro-climatiques sont censés apporter une plus-value, en termes de suivi des cultures ou de prédiction des récoltes, par rapport aux facteurs climatiques utilisés séparément.

Un exemple d'utilisation des indices agro-climatiques est illustré ici avec le logiciel AgroMetShell de la FAO. Ce logiciel fait partie d'un ensemble d'outils développés par la FAO, pour l'aide à la prise de décision, dans le cadre de la sécurité alimentaire. Ce logiciel permet de calculer des indices agro-climatiques à partir d'une base de données climatiques, de certaines caractéristiques simples de sol et de végétal.

Ces indices sont en corrélation statistique avec les rendements des céréales, à l'échelle provinciale (Balaghi, 2006 ; Figure 59). Trois indices, le Surplus-Déficit en Eau (WSD), l'Indice de Satisfaction des Besoins en Eau (WRSI) et le Stockage de l'Eau dans le Sol (SWS), ont été choisis pour cette illustration. Un quatrième nouvel indice a été ajouté, calculé en intégrant le WSD sur plusieurs décades consécutives ( $\Sigma$ WSD) à partir du début de saison en novembre. Deux provinces test ont été choisies, Meknès et Safi, situées respectivement en zone subhumide et semi-aride (Balaghi, 2006).

Parmi ces quatre indices, SWS et WRSI ont été très corrélés au rendement du blé tendre au niveau décadaire, respectivement à Meknès (maximum  $R^2=82\%$  à la 1<sup>ère</sup> décade de mars) et Safi (maximum  $R^2=67\%$  à la 1<sup>ère</sup> décade d'avril).

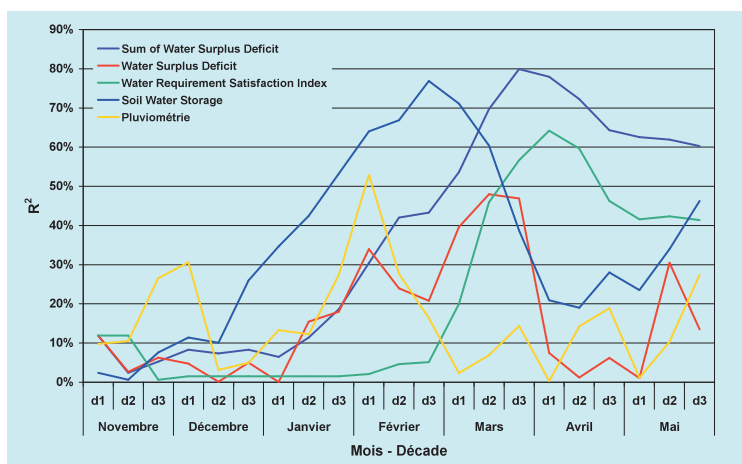


Figure 59 : Corrélation entre le rendement du blé et les indices agrométéorologiques dérivés du programme AgroMetShell de la FAO, à Meknès (Source : Balaghi, 2006).

### 3.3. PRÉDICTION PAR LE NDVI

Par rapport aux données climatiques, l'avantage des indicateurs issus de la télédétection spatiale, comme le NDVI, est qu'ils couvrent tout le territoire, de manière continue à des résolutions spatiales et temporelles élevées (sous forme « raster » dite aussi pixel). En effet, au Maroc, les données des stations synoptiques de la DMN (44 au total) ne couvrent qu'une partie du territoire national et de façon insuffisamment homogène et dense. De plus, la plupart de ces stations sont localisées dans les plaines atlantiques et très peu présentes en zones de montagnes ou pastorales (Figure 12).

#### 3.3.1. RELATION ENTRE LE RENDEMENT ET LE NDVI

Le NDVI est un très bon indicateur des conditions édapho-climatiques de la saison agricole. Il est une expression intégrant aussi bien les conditions climatiques que les variétés, les maladies, les techniques culturales, etc. En effet, la relation entre le NDVI (SPOT-VEGETATION) et les rendements



des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) est linéaire et très significative à l'échelle nationale (Figure 60).

La relation devient de plus en plus forte à partir de février et atteint un pic à la première décennie de mars ( $R^2=89\%$ ), pour le blé tendre et le blé dur, et à la première décennie d'avril ( $R^2=81\%$ ) pour l'orge. Bien entendu, la décennie à laquelle ce pic de NDVI est observé change, d'une année à l'autre, en fonction des conditions particulières de pluviométrie et de température, mais aussi en fonction des dates de semis. Par ailleurs, les campagnes sèches réduisent la relation entre les rendements des trois céréales et le NDVI. Lorsque l'on retire les campagnes sèches (1999-2000, 2004-2005 et 2006-2007) de la série chronologique, la prédiction des rendements s'améliore et peut être réalisée dès le mois de janvier, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) élevé, de plus de 70% pour les blés.

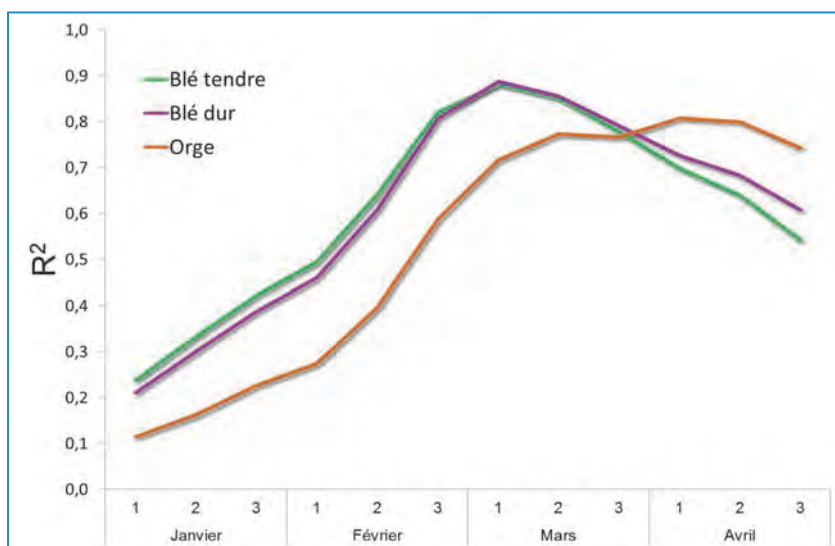
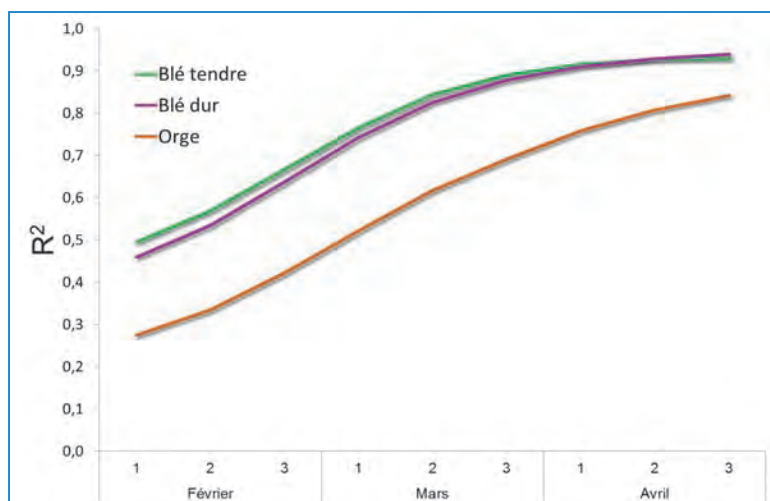


Figure 60 : Corrélation entre les rendements des trois céréales d'automne et les valeurs décennales de NDVI (SPOT-VEGETATION), à l'échelle nationale (Données de 1999 à 2011).

La relation des rendements nationaux des céréales avec le NDVI décennal (Figure 60) s'améliore au cours du temps jusqu'à atteindre un pic à la première décennie de mars pour les blés et la deuxième décennie de mars pour l'orge. La relation persiste jusqu'à fin avril pour l'orge, alors qu'elle se relâche pour les blés.

Une transformation des données décadaires de NDVI est effectuée afin de réduire l'erreur de prédiction des modèles de régression linéaire (Genovese *et al.*, 2001). L'opération consiste à corrélérer les rendements des céréales, non pas sur les valeurs décadaires de NDVI, mais sur leur moyenne sur plusieurs décades consécutives (Figure 61).

La moyenne permet ainsi de réduire l'erreur induite par les différences de dates d'apparition des pics de NDVI, d'une année à l'autre. La moyenne sur plusieurs décades permet donc de réduire les écarts entre les valeurs prédites et les valeurs observées de rendement. La relation s'améliore progressivement avec l'avancement de la campagne agricole, de février à avril, avec un  $R^2$  maximum atteint en fin avril. Au Maroc, la période de l'année dont la valeur moyenne de NDVI est la plus corrélée aux rendements est celle de février à avril, suivie de février à mars. Cette période a été identifiée en testant toutes les combinaisons possibles de moyennes décadaires de NDVI, à partir du mois de novembre et jusqu'avril, aussi bien à l'échelle nationale que provinciale (Balaghi *et al.*, 2008).



**Figure 61 : Coefficient de détermination de la régression entre les rendements des trois céréales d'automne et le NDVI moyen sur plusieurs décades, à partir du mois de février (SPOT-VEGETATION), à l'échelle nationale (Données de 1999 à 2011).**

La moyenne des NDVI décadaires, entre février et mars, permet de prédire les rendements de blé, avec des coefficients de détermination ( $R^2$ ) supérieurs à 80%. La précision de la prédiction des rendements du blé s'améliore, pour atteindre des  $R^2$  supérieurs à 90%, en utilisant la moyenne des NDVI décadaires de février à avril. Pour l'orge, la prédiction est plus précise jusqu'à la deuxième

décade d'avril. Les raisons du décalage de la période optimale de prédiction de l'orge par rapport à celle des blés restent à élucider. La relation entre les rendements et le NDVI est susceptible de s'améliorer au fur et à mesure que les séries chronologiques deviennent plus longues. Des séries temporelles sont disponibles grâce au capteur NOAA-AVHRR, qui permet de délivrer des valeurs de NDVI à partir de l'année 1982 à 1 km de résolution spatiale et au pas de temps décadaire (10 jours). Cependant, un certain nombre de scènes de ce capteur souffre de mauvaise qualité, en raison de la mauvaise correction géométrique et détection des nuages. Les valeurs de NDVI délivrées par ce capteur peuvent être utilisées en prédiction des récoltes céréaliers au Maroc (Balaghi *et al.*, 2008) à l'échelle nationale et celle des provinces. Il est également possible d'utiliser le NDVI provenant du capteur MODIS qui a une meilleure résolution spatiale (250 mètres). Les résultats de recherche (non encore publiés) montrent que les valeurs de NDVI provenant de SPOT-VEGETATION restent les mieux corrélées aux rendements céréaliers, comparativement à celles de NOAA-AVHRR, et sont équivalentes à celles de MODIS. Cependant, le capteur SPOT-VEGETATION (embarqué à bord de SPOT-5) finira sa mission en 2013-14. Il sera remplacé par le capteur Proba-V (Project for On-Board Autonomy - VEGETATION) qui devra être lancé en 2013, embarquant une version allégée de l'instrument VEGETATION. Il est prévu un retraitement des images SPOT-VEGETATION afin d'assurer la cohérence avec la chaîne de traitement pour Proba-V<sup>51</sup>, ce qui permettra de valoriser les données SPOT-VEGETATION disponibles à partir de 1998.

### 3.3.2. À L'ÉCHELLE NATIONALE

La forme de la relation entre le rendement des trois céréales (blé tendre, blé dur et orge) et le NDVI (SPOT-VEGETATION) est linéaire et très forte à l'échelle nationale (Figure 62), contrairement à la relation avec la pluviométrie (Figure 58). Le rendement peut donc être prédit grâce à une régression linéaire avec le NDVI. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre le rendement et le NDVI moyen de février à mars est de 69% pour l'orge, 88% pour le blé dur et de 89% pour le blé tendre. Il est encore plus élevé quand le NDVI est moyenné entre février et avril : 89% pour l'orge, 93% pour le blé tendre et 94% pour le blé dur.

La relation rendement-NDVI est plus étroite pour les blés que pour l'orge. Cette relation a été utilisée par l'INRA, en combinaison avec d'autres méthodologies, pour réaliser les bulletins de prédiction de la récolte céréalière en 2009, 2010, 2011 et 2012 (Balaghi *et al.*, 2012 ; El Aydam *et al.*, 2010, 2011 ; Narciso et Balaghi, 2009).

<sup>51</sup> Pour plus d'information consultez le site du VITO <http://www.vgt.vito.be/>.

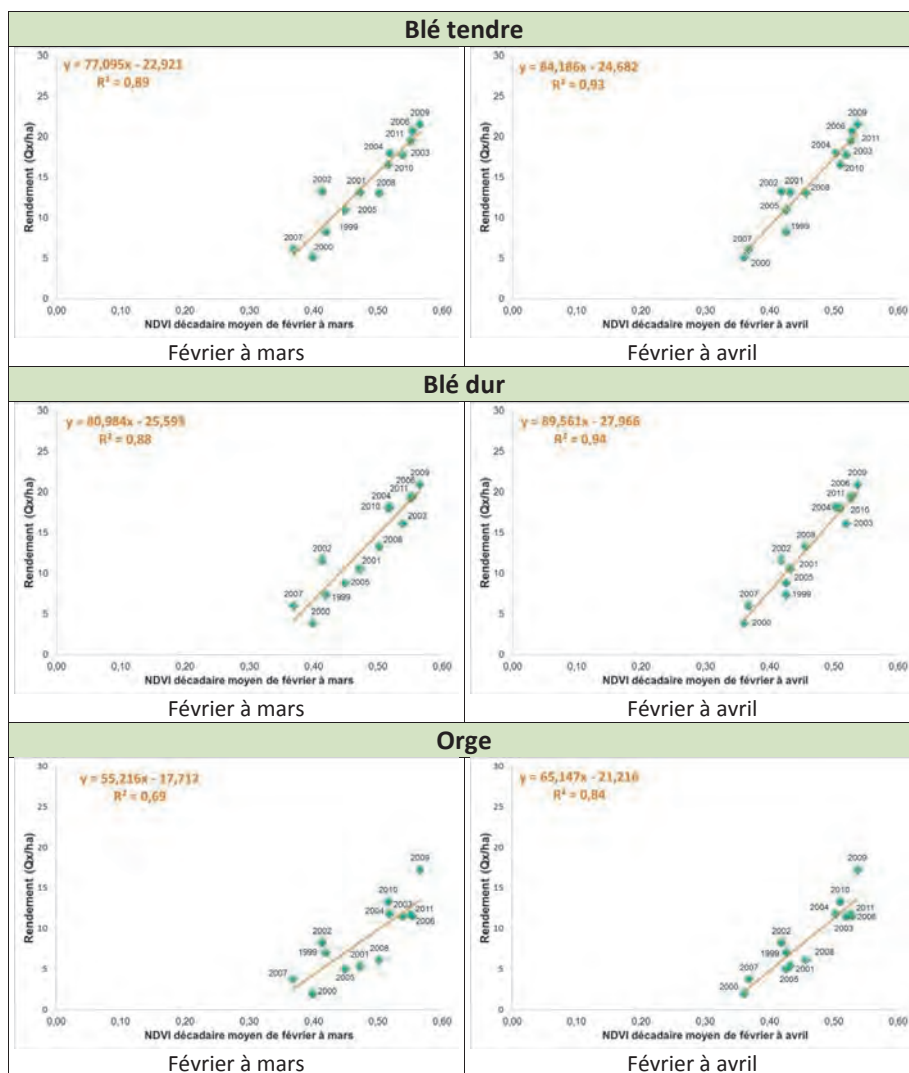


Figure 62 : Relation entre le rendement des trois céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) et le NDVI (SPOT-VEGETATION) moyen de février à mars et de février à avril, à l'échelle nationale (Données de 1999 à 2011).

### 3.3.3. À L'ÉCHELLE DES ZONES AGRO-ÉCOLOGIQUES

La prédiction des rendements céréaliers est possible à l'échelle des zones agro-écologiques du Maroc à partir de la fin du mois de mars. La relation entre les rendements des céréales d'automne et le NDVI (SPOT-VEGETATION) reste très étroite à l'échelle des zones agro-écologiques, sauf en zone *Saharienne* (Tableau 12). La prédiction est réalisable avec le minimum d'erreur, en fin avril, pour les trois espèces.

La relation est moins étroite au niveau des zones agro-écologiques qu'au niveau national, mais plus étroite pour les zones *Favorable*, *Intermédiaire*, et *Défavorable Sud*, que pour la zone *Montagne* et *Défavorable Orientale* ou la zone *Saharienne*.

**Tableau 12 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre le rendement des céréales d'automne et le NDVI (SPOT-VEGETATION) moyen de février à mars et de février à avril, à l'échelle des zones agro-écologiques (Données de 1999 à 2011).**

Zones agro-écologique	Février à mars			Février à avril		
	Blé tendre	Blé dur	Orge	Blé tendre	Blé dur	Orge
Favorable	0,73	0,74	0,66	0,85	0,83	0,83
Intermédiaire	0,79	0,77	0,72	0,87	0,83	0,84
Défavorable Sud	0,70	0,69	0,69	0,74	0,77	0,79
Défavorable Orientale	0,24	0,46	0,38	0,41	0,69	0,67
Montagne	0,51	0,58	0,45	0,52	0,65	0,57
Saharienne	0,13	0,03	0,30	0,16	0,03	0,35

### 3.3.4. À L'ÉCHELLE DES PROVINCES

La prédiction des rendements céréaliers par le NDVI (SPOT-VEGETATION) est réalisable à l'échelle des provinces, à partir de la fin du mois de mars, jusque fin avril (Figure 63). Quatre classes de coefficient de détermination ( $R^2$ ) sont représentées dans les graphes de la Figure 63, pour le blé tendre, le blé dur et l'orge. Les  $R^2$  supérieurs à 62% sont statistiquement très hautement significatifs (Probabilité < 0,001). Ceux compris entre 45 et 62% et ceux compris entre 30 et 45% sont statistiquement hautement significatifs (Probabilité < 0,01) et significatifs (Probabilité < 0,05), respectivement. Les  $R^2$  inférieurs à 30% ne sont pas significatifs statistiquement.

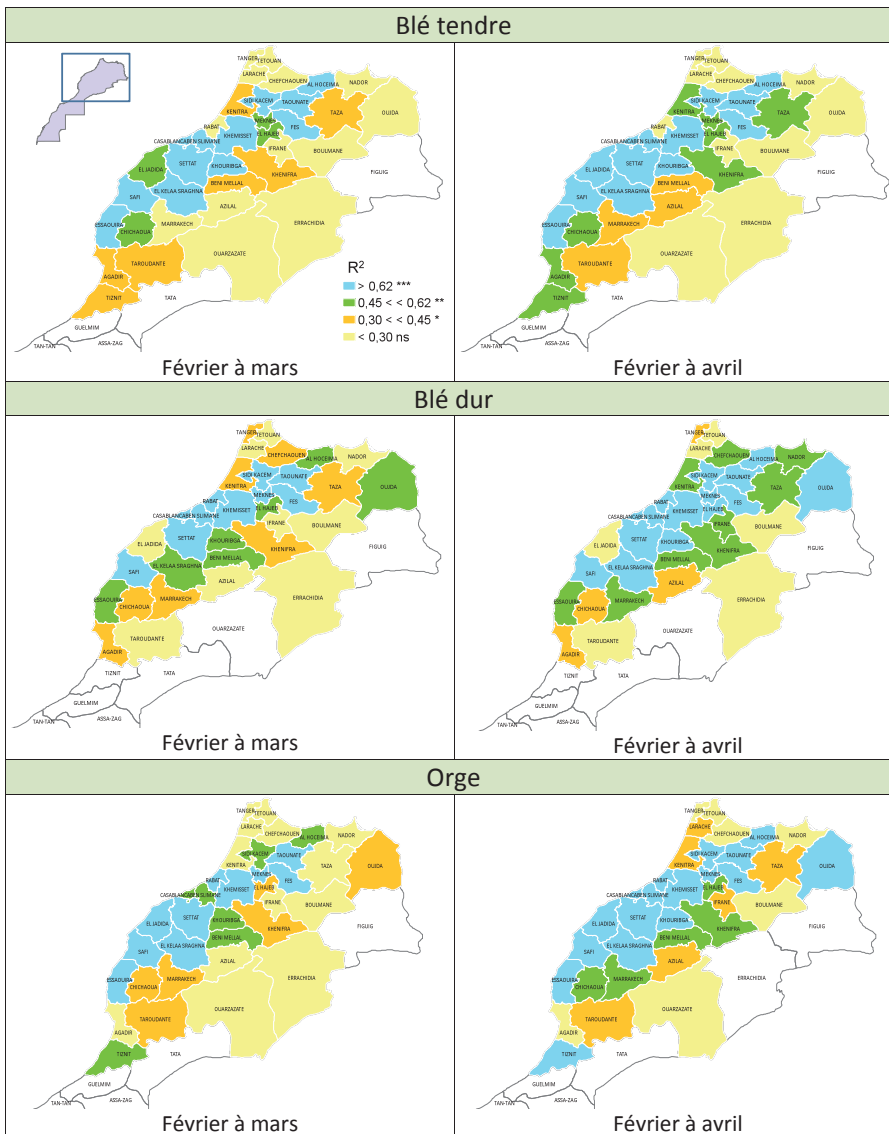


Figure 63 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la relation entre le rendement du blé tendre, blé dur et orge et le NDI (SPOT-VEGETATION) moyen de février à mars et de février à avril, à l'échelle des provinces.

Les provinces en bleu, vert et orange indiquent des  $R^2$  statistiquement significatifs à des probabilités de 0,001, 0,01 et 0,05 respectivement. Les provinces en jaune indiquent des  $R^2$  non significatifs. Les provinces non coloriées ne contiennent pas de terres agricoles selon le masque agricole GICropV2. (Données de 1999 à 2011).

On remarque que les classes de  $R^2$  élevés ( $R^2 > 62\%$ ) se situent dans l'axe sud-ouest vers nord-est (d'Essaouira vers Al Hoceima) dans lequel est localisée la majorité des céréales. Les relations entre les rendements céréaliers et le NDVI sont relativement plus faibles dans les régions du Nord (Tanger, Tétouan, Larache), de l'Oriental (Nador, Oujda), montagneuses (Taza, Khenifra, Beni Mellal, Azilal) et du Sud (Marrakech, Chichaoua, Taroudante, Agadir, Tiznit). À la fin mars, les  $R^2$  sont supérieurs à 62% dans la majorité des provinces, pour le blé tendre. À cette date, les  $R^2$  élevés ( $R^2 > 62\%$ ) se situent dans l'axe Settat-Taouinate, pour le blé dur, et plus au sud dans l'axe Essaouira – Khémisset pour l'orge.

### 3.3.5. ESTIMATION DE L'ERREUR DE PRÉDICTION

L'erreur de prédiction des rendements céréaliers par le NDVI (SPOT-VEGETATION) s'améliore au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin de saison, à partir de février jusque fin avril, quelle que soit l'échelle spatiale. En Figure 64 est montré l'exemple de la prédiction du rendement du blé tendre, à l'échelle nationale, pour les campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011. Ces campagnes agricoles n'ont évidemment pas été utilisées pour la calibration des équations de prédiction. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) s'améliore à partir de février et atteint son maximum en fin avril ( $R^2 > 88\%$ ). Durant la campagne extrêmement pluvieuse de 2008-2009 (548 mm), la prédiction se rapproche du rendement réel observé sans l'atteindre (différence de 1,65 Quintal/ha). Cette campagne agricole a été très particulière, en dehors de la gamme de variation aussi bien des rendements que de la pluviométrie, par rapport aux données utilisées pour la calibration (pluviométrie comprise entre 227 et 419 mm, entre 1999 à 2008). Pour les campagnes agricoles 2009-2010 et 2010-2011, les prédictions sont très proches des rendements observés. On peut constater que, dans le cas de ces trois campagnes agricoles, l'intervalle de confiance de la prédiction à 70% s'améliore également à l'approche de la fin de la campagne agricole, et il englobe toujours le rendement réel observé.

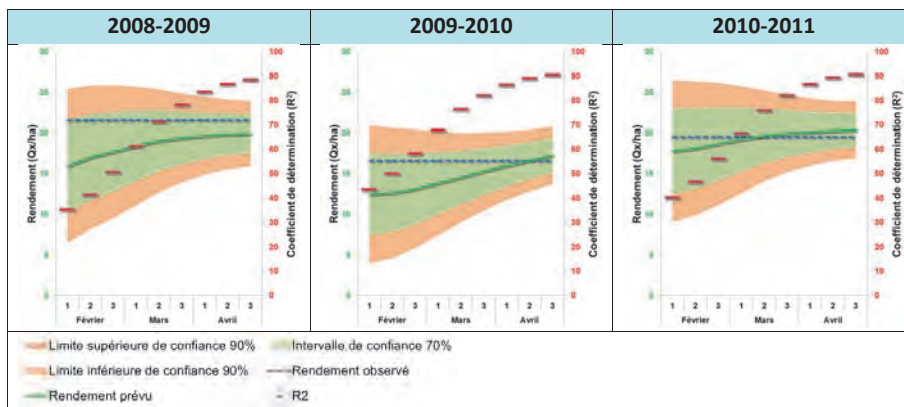


Figure 64 : Précision de la prédiction du rendement du blé tendre par le NDVI (SPOT-VEGETATION), à l’approche de la fin de campagne agricole, à l’échelle nationale. Exemples des campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011.

#### 4. APPROCHE COMBINÉE

La prédiction des rendements céréaliers peut être réalisée par l’approche dite combinée. Cette approche est une combinaison de plusieurs approches de prédiction (Tableau 13) :

1. L’approche par analogie, basée sur les distances euclidiennes et les analyses en composantes principales de la pluviométrie et du NDVI ;
2. L’approche paramétrique, basée sur les régressions linéaires simples ou multiples des rendements avec le NDVI, la pluviométrie ou les sorties du modèle WOFOST.

Tableau 13 : Tableau schématique illustrant l’approche combinée, développée pour la prédiction des rendements céréaliers.

Approche		Méthode	Variable de prédiction			
			Pluviométrie	Température	NDVI	Morpho-physiologie
Combinée	Analogique	Distance euclidienne				
		ACP				
	Paramétrique	Régression simple				
		Régressions multiples				
	Simulation WOFOST					



La prédiction combinant plusieurs modèles de régression simple ou multiple, sur la base de plusieurs variables explicatives (pluviométrie, NDVI, et température), améliore la précision de la prédiction aux échelles spatiales fines. Cette approche a été proposée récemment, sur la base d'une approche statistique utilisant le NDVI seul ou en combinaison avec la pluviométrie ou la température (Balaghi *et al.*, 2008). Ce travail a été réalisé grâce à la collaboration de l'INRA avec l'Université de Liège (Belgique), le JRC et le VITO<sup>52</sup>. La zone de couverture des images NDVI fournies par le JRC couvre tout le Maroc agricole, du nord vers le sud, jusqu'à la latitude 20° nord. Par rapport aux données climatiques, l'avantage des indicateurs issus de la télédétection spatiale, comme le NDVI, est qu'ils sont disponibles sur tout le territoire, de manière continue à des résolutions spatiales et temporelles élevées (sous forme "raster" dite aussi pixel) bien adaptées au suivi pour la prédiction des rendements.

Au Maroc, il est possible de prédire le rendement du blé de façon statistique, à partir de l'imagerie satellitaire (NDVI) et de mesures météorologiques locales (précipitations et température) (Balaghi *et al.*, 2008). Un intérêt recrudescant de ces approches statistiques a été suscité par la disponibilité croissante en données climatiques sur de longues séries temporelles, par le développement informatique, permettant le stockage de quantités importantes de données et l'utilisation des logiciels d'analyse statistique et de traitement d'images satellitaires.

Généralement, les approches statistiques sont critiquées car elles ne peuvent s'appliquer en dehors de la gamme de variation des données avec lesquelles elles ont été développées. Cette critique peut être levée en grande partie dans le cas du Maroc en raison de la très grande variabilité du climat et de la géographie du pays. La probabilité de rencontrer des situations climatiques en dehors de cette gamme de variation est toujours possible, mais néanmoins réduite en raison des campagnes agricoles extrêmement contrastées qui ont été vécues, aussi bien très sèches (1994-1995, 1996-1997, 1999-2000, 2000-2001, 2004-2005) que très humides (1995-1996, 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011).

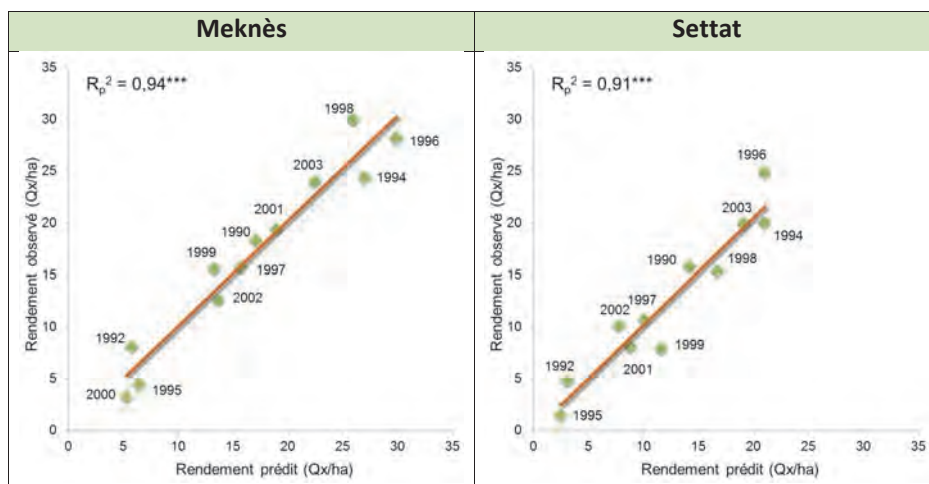
Les prédictions peuvent être réalisées de façon opérationnelle à l'échelle des provinces, des zones agro-écologiques, ou bien à l'échelle nationale. Il est également possible de développer des modèles séparés pour chaque province ou zone agro-écologique. La combinaison du NDVI, de la pluviométrie et de la température saisonnières permet de prédire les rendements du blé tendre avec précision, au moyen de modèles de régression multiple<sup>53</sup>, à l'échelle des provinces.

---

<sup>52</sup> On pourra noter, que cette approche a été reprise et appliquée avec succès dans des pays contrastés, au Canada (Mkhabela *et al.*, 2011), en Roumanie (Lazar *et al.*, 2009), au Sénégal (Kouadio, 2007) et au Burkina Faso (Ramde, 2007).

<sup>53</sup> Dans ces modèles, la procédure « Stepwise » de sélection de variable a été appliquée par les auteurs de manière à éviter l'inter-colinéarité entre variables explicatives.

Les sorties des modèles provinciaux peuvent être alors regroupées et utilisées pour la prédiction du rendement au niveau de tout le pays. Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) de ces modèles sont très élevés, compris entre 72 et 98%, excepté dans les provinces arides du sud-est du pays qui contribuent peu à la production nationale (Balaghi *et al.*, 2008). Ces modèles de régression sont relativement stables puisque leurs coefficients de détermination, en validation croisée ( $R_p^2$ ), sont compris entre 59 et 94%. Les prédictions sont relativement précises et précoces, à partir de deux mois avant la récolte céréalière.



**Figure 65 : Relation entre les rendements prédits et observés du blé tendre au niveau national par un modèle de régression multiple associant le NDVI, la pluviométrie et la température saisonnières, à Meknès et Settat. (Source : Balaghi *et al.*, 2008).**

Parmi les variables utilisées, c'est le NDVI qui explique la plus grande part ( $R^2$  partiel > 40%) de la variation du rendement du blé tendre dans 14 des 23 provinces étudiées, autrement dit dans les provinces qui contribuent à plus de 69,4% de la production nationale. La pluviométrie explique le plus la variation du rendement dans les provinces de Larache, Agadir, Oujda, Beni Mellal, Tanger, Marrakech et Ouarzazate. La température explique la majeure partie de la variation du rendement uniquement à Tanger et Tétouan, qui sont des provinces humides. Dans ces deux provinces, la température agit de manière négative sur les rendements du blé tendre, car elle accroît l'évapotranspiration et réduit la période de croissance.

Cette approche a le grand intérêt de fournir des estimations de rendements de façons séparées (Gommes *et al.*, 2010). C'est donc un moyen d'estimer l'incertitude de prédiction. Cette approche de prédiction des récoltes a été formalisée dans le logiciel CST d'analyse statistique, dans le cadre du projet E-AGRI.

Cette approche de prédiction a permis de prédire les récoltes céréalières des campagnes 2008-2009 (Narciso et Balaghi, 2009), 2009-2010 (El Aydam, Balaghi et Baruth, 2010), 2010-2011 (El Aydam et Balaghi, 2011) et 2011-2012 (Balaghi *et al.*, 2012) avec une grande précision. Les résultats de prédiction sont publiés dans des bulletins météorologiques spécifiquement édités à cette fin. La prédiction a concerné les rendements du blé tendre, du blé dur et de l'orge, alors que les données sur la superficie de chaque espèce sont déterminées par sondage direct par les services statistiques de la Direction de la Stratégie et des Statistiques.

La précision de la prédiction des récoltes céréalières est affinée de façon continue, puisqu'elle dépend de quatre paramètres essentiels qui ne cessent de s'améliorer :

1. Le nombre d'années de données s'accumule et permet de constituer des bases de plus en plus solides avec des situations de plus en plus variées qui vont servir de terrain d'entraînement pour les modèles de régression ;
2. Le nombre de stations climatiques qui est en constante augmentation à la Direction de la Météorologie Nationale mais aussi au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime et à l'Institut National de la Recherche Agronomique permettra de mieux évaluer les conditions climatiques ;
3. Le masque agricole, qui permet de séparer les zones agricoles des autres terres (forêt, parcours, incultes, lacs, villes, etc.) ;
4. Le NDVI qui est en perpétuelle amélioration au niveau de la qualité des images satellitaires, de la résolution spatiale et du coût d'acquisition.

## VII. INSTITUTIONNALISATION DES PRÉDICTIONS

*La combinaison des différentes approches individuelles de prédiction des rendements céréaliers constitue l'approche globale. Cette approche a été automatisée dans un système informatique opérationnel de prédiction des récoltes céréalières au Maroc, nommé « CGMS\_MA », qui est une adaptation du système européen CGMS. Le système CGMS est constitué de trois niveaux : (1) la collecte des données météorologiques et leur interpolation sur une grille carrée de 25x25 km de résolution spatiale, (2) la simulation de la croissance des cultures par le modèle européen WOFOST, et (3) la prédiction des récoltes. Le système « CGMS\_MA » est en avance sur le système européen CGMS car il intègre, en plus du modèle WOFOST, les modèles statistiques de prédiction des rendements céréaliers développés à l'Institut National de la Recherche Agronomique à partir de la pluviométrie et du NDVI et se base sur une grille climatique plus fine, de 10x10 km de résolution spatiale. Le système « CGMS\_MA » permet actuellement de prédire les rendements céréaliers à l'échelle nationale, des zones agro-écologiques et des provinces. Ce système est piloté par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et géré en consortium formel avec la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et la Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS). Il est destiné à appuyer la DSS dans sa mission de prédiction des récoltes céréalières. Il est installé sur un serveur central à la DMN qui se charge de délivrer la grille climatique, de la mise à jour des données statistiques et de son maintien informatique. C'est donc le premier système opérationnel de prédiction agrométéorologique des récoltes céréalières au Maroc, institutionnalisé par un partenariat stratégique qui permet son développement et sa pérennisation.*

Pour faire face efficacement au changement climatique et à l'aléa climatique de façon générale il est nécessaire de promouvoir des systèmes de gouvernance<sup>54</sup> et des politiques qui favorisent l'adaptation et la proactivité. Le succès de l'adaptation de l'agriculture à l'aléa climatique dépend donc de la bonne gouvernance des institutions nationales qui sont en charge, directement ou indirectement, de la sécurité alimentaire du pays. Une des principales recommandations de la 3<sup>ème</sup> conférence mondiale sur le climat organisée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (<http://www.wmo.int/wcc3/>) met l'accent sur le renforcement des capacités et des liens entre les institutions météorologiques, agricoles et de recherche scientifique (Balaghi *et al.*, 2010).

L'approche combinée a été intégrée dans un système informatique opérationnel de prédiction des récoltes céréalières au Maroc, nommé « **CGMS\_MA** », qui est une adaptation au Maroc du système européen CGMS.

Le système de prédiction spécifique au Maroc « CGMS\_MA » est développé dans le cadre du projet E-AGRI. Les institutions européennes partenaires du projet E-AGRI sont : JRC, Alterra et VITO. Le système « CGMS\_MA » est piloté par l'INRA et géré conjointement par la Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS) et la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) dans le cadre d'une convention tripartite.

<sup>54</sup> On citera l'excellent travail de diffusion des données, des connaissances et des outils de traitement de l'information agrométéorologique, entrepris par la FAO, à travers le réseau « *Climpag* » [http://www.fao.org/nr/climpag/index\\_en.asp](http://www.fao.org/nr/climpag/index_en.asp)

Il est destiné à appuyer la DSS dans sa mission de prédiction des récoltes céréalières. Il est installé sur un serveur central à la DMN qui se charge de délivrer la grille climatique, de la mise à jour des données statistiques et de son maintien informatique. C'est donc le premier système opérationnel de prédiction des récoltes céréalières au Maroc, institutionnalisé par un partenariat stratégique pour promouvoir son développement et sa pérennisation.

### Rôle des institutions nationales :

#### ■ L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) est responsable de :

- La collecte et la fourniture des données agronomiques nécessaires à la calibration du système CGMS\_MA au niveau 2 du système « CGMS\_MA » ;
- La contribution avec la DMN et la DSS à l'analyse statistique des scénarios de prédiction des récoltes au niveau 3 du système « CGMS\_MA » ;
- L'analyse des données issues de l'imagerie satellitaire pour la prédiction des rendements agricoles au niveau 3 du système « CGMS\_MA ».

#### ■ La Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS) est responsable de :

- La collecte et la fourniture des données sur les superficies et les rendements agricoles nécessaires au bon fonctionnement du système « CGMS\_MA » ;
- L'estimation des superficies agricoles par le traitement des images satellitaires et les enquêtes de terrain.

#### ■ La Direction de la Météorologie Nationale (DMN) est responsable de :

- L'hébergement et de la maintenance informatique du système « CGMS\_MA » au profit des trois institutions ;
- L'interpolation des données climatiques du réseau des stations météorologiques et l'utilisation de ces données interpolées au niveau 1 du système « CGMS\_MA ».

Le système « CGMS\_MA » a été amélioré par rapport au système européen CGMS, en intégrant, en plus du modèle WOFOST, des modèles statistiques de prédiction de la récolte céréalière développés à l'INRA à partir de la pluviométrie et du NDVI. Il a également été amélioré en remplaçant la grille climatique initiale de 25x25 km par une grille plus fine de 10x10 km, grâce à la méthode d'interpolation AURELHY adaptée par la DMN. Le partenariat avec les institutions nationales et internationales a permis de publier le bulletin de prédiction de la récolte céréalière pour la campagne agricole 2011-2012 (Balaghi, Tahri et El Hairech, 2012). À court terme, il est prévu d'autonomiser complètement le système « CGMS\_MA » par rapport aux institutions étrangères.

## VIII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'approche agrométéorologique dite « combinée », développée et décrite dans le présent document, permet la prédiction agrométéorologique des rendements céréaliers de manière opérationnelle au Maroc. C'est une approche pragmatique qui s'adapte aux données observées et accessibles, pouvant être de différents types : météorologiques, agronomiques, et satellitaires. C'est un avantage par rapport à d'autres approches de prédiction qui sont basées uniquement sur des modèles de simulation, exigeants en données de bases difficilement disponibles au Maroc. Elle s'adapte également à la grande échelle spatiale de ces données (nationale, zone agro-écologique, provinciale).

Le développement de cette approche combinée a débuté par l'analyse du climat qui a révélé l'importance de la pluviométrie pour la prédiction des rendements céréaliers. L'analyse des cultures céréalières et de leurs interactions avec le climat ont permis de développer des indicateurs agrométéorologiques pouvant être utilisés pour la prédiction des rendements. Les indicateurs développés sont dérivés de facteurs climatiques qui limitent la production céréalière (pluie, température, bilan hydrique) et d'indices issus de l'imagerie satellitaire (NDVI). Les indicateurs dérivés de la pluviométrie et du NDVI sont les plus pertinents et les plus pratiques pour prédire les rendements céréaliers au Maroc. Les indicateurs dérivés de la température ne sont utiles que dans les régions humides du nord du pays où la pluviométrie n'est pas un facteur limitant.

L'approche combinée met à contribution de façon concomitante plusieurs approches de prédiction: non-paramétrique, analogique, paramétrique et la combinaison des deux dernières approches. L'approche non-paramétrique peut être utilisée pour avoir une description qualitative préliminaire de l'effet du climat sur les céréales. L'approche analogique consiste à identifier dans l'historique disponible la campagne qui est analogue, du point de vue pluviométrique ou du NDVI, à celle pour laquelle on veut prédire les rendements. L'utilisation de la pluviométrie uniquement ne permet pas de tenir compte des conditions de végétation ayant prévalu au cours de la saison (épisode de sécheresse, vague de chaleur, épidémie de maladie, infestation des mauvaises herbes, etc.). En revanche, l'utilisation du NDVI dans l'approche analogique permet de tenir compte en grande partie de tous ces aléas. La prédiction des rendements céréaliers par l'approche analogique, sur la base du NDVI, est optimale à partir de fin février jusqu'à fin mars. L'approche analogique sur la base des deux indicateurs, pluviométrie et NDVI, apporte une précision supplémentaire. L'approche paramétrique met à contribution la corrélation existant entre les rendements et des indicateurs climatiques ou bioclimatiques pour prédire les rendements céréaliers. Aussi bien à l'échelle nationale que des zones agro-écologiques, la corrélation est en moyenne maximale lorsque la pluviométrie décadaire est cumulée sur la saison agricole, d'octobre à fin mars. Il est possible d'améliorer davantage la prédiction en considérant la pluviométrie cumulée par périodes au cours de la saison. Cependant, la prédiction est meilleure avec l'utilisation du NDVI moyen de février à mars.

Le NDVI peut être utilisé pour la prédiction des rendements aux échelles nationale, des zones agro-écologiques et des provinces. L'approche paramétrique permet une prédiction fine des rendements céréaliers, même à l'échelle provinciale.

Cette approche combinée est actuellement informatisée dans un système de prédiction des rendements céréaliers, nommé « CGMS\_MA ». Le système « CGMS\_MA » est conçu de façon modulaire, de manière à pouvoir s'adapter aux données disponibles, à l'échelle spatiale de prédiction, à la précision et à la rapidité de la prédiction recherchées. La précision, la fiabilité, l'objectivité, la traçabilité et la rapidité sont donc les qualités importantes qui ont été visées pour le développement de ce système. Le système se base sur l'approche combinée développée à l'INRA, en collaboration scientifique et technique avec la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (devenue actuellement Arlon Campus Environnement de l'Université de Liège - Belgique) à partir de 2000 ainsi que JRC et le VITO, à partir de 2007. Les prédictions sont réalisées par la régression des statistiques agricoles officielles à la pluviométrie et au NDVI au cours de la saison agricole ainsi qu'aux sorties du modèle WOFOST de simulation de la croissance et du développement des cultures annuelles. Les rendements nationaux des céréales ont été prédits avec précision pour les campagnes agricoles 2008-2009, 2009-2010, 2010-2011, et 2011-2012. Des bulletins de prédiction de ces campagnes ont été publiés sur le site Web du JRC (<http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm>).

Ce système de prédiction des rendements céréaliers est actuellement le seul système institutionnel au Maroc dont les résultats sont publiés. Pour pérenniser le système et permettre son développement futur, un consortium formel a été institué, composé de l'INRA, de la DSS et de la DMN. Le système « CGMS\_MA » est installé dans chacune de ces institutions et coordonné par un panel composé de membres à autorité scientifique ou technique. L'INRA fournit l'appui scientifique nécessaire au développement du système. La DMN fournit les données spatialisées de paramètres climatiques sur l'ensemble du territoire et gère les aspects informatiques. La DSS fournit les données officielles de superficies et de rendements céréaliers. Le premier bulletin de prédiction conjoint a été publié en avril 2011 sur le site Web de l'INRA ([www.inra.org.ma](http://www.inra.org.ma)).

Le système « CGMS\_MA » est en cours d'amélioration pour lever les limites relatives à la précision de la prédiction qui sont présentes dans certaines situations, en particulier :

- Les campagnes relativement humides pendant lesquelles la sécheresse est sévère au milieu de cycle, comme celle de 1996-1997 ;
- Les campagnes trop humides, comme celles de 2008-2009 et 2010-2011 ;
- Les campagnes à températures faibles, comme celle de 2011-2012.

Ces limites pourraient être dépassées, grâce à une amélioration du système, en tenant compte des stades physiologiques des cultures au moment de la prédiction et des périodes de sécheresse, des excès d'eau et de froid.

Les perspectives l'approche de prédiction développée et pour le système « CGMS\_MA » sont prometteuses. Des méthodes de prédiction des rendements peuvent être développées pour d'autres cultures annuelles, à l'instar des céréales, car l'un des modules du modèle WOFOST fournit les paramètres, pour plusieurs autres cultures, en particulier, le maïs-grain, le riz, la betterave à sucre, la pomme de terre, le haricot, le soja, le colza et le tournesol.

Le système « CGMS\_MA », basé sur l'approche combinée, permet non seulement de prédire les rendements céréaliers, deux à trois mois avant la récolte et de façon instantanée, mais peut également servir à d'autres fonctions ou services moyennant des développements additionnels, tels que l'assurance sécheresse, l'avertissement agricole, la cartographie des potentialités et de la vocation des terres agricoles, la prédiction saisonnière des rendements agricoles ou l'impact du changement climatique sur la productivité agricole.

Le système « CGMS\_MA » peut également intégrer des modules de prédiction à court terme des événements météorologiques (pluie, sécheresse, vagues de chaleur et froid) et des aléas biotiques (maladies, insectes) utiles pour l'avertissement agricole. Ces produits peuvent être générés directement à partir des stations climatiques locales, des réseaux nationaux de stations climatiques ou des modèles numériques d'interpolation spatiale des données climatiques. Cela implique un effort de collecte de données locales, de transmission, de traitement et de diffusion de l'information agrométéorologique au profit des agriculteurs ou des conseillers agricoles que la nouvelle stratégie agricole prévoit d'instituer. Le champ d'action de l'avertissement agricole est large, pouvant inclure, en plus de la protection phytosanitaire, la gestion de la fertilisation, de l'irrigation d'appoint et le choix de la date de semis des céréales. C'est un champ de recherche appliquée à développer au Maroc, qui peut avoir des retombées positives importantes sur l'agriculture et l'environnement. C'est dans cette optique, par exemple, que l'Office National de la Sécurité Sanitaire des produits Alimentaires (ONSSA) ainsi que la DMN ont inscrit dans leurs priorités l'élaboration d'un programme national portant sur l'avertissement agricole.

Le système « CGMS\_MA » peut être adapté pour prédire les rendements céréaliers dans les pays à climats similaires à celui du Maroc, comme ceux des rives méditerranéennes car, dans ces pays, les céréales se comportent et sont conduites pratiquement de la même manière.

La pertinence démontrée du NDVI dans la prédiction des rendements céréaliers, permet d'émettre l'hypothèse de la possibilité d'estimation des superficies céréalières par des indices issus de l'imagerie satellitaire.



## IX. RÉFÉRENCES

- Aït El Mekki, A. 2006. Les politiques céréalières au Maroc. Les notes d'analyse du CIHEAM N°7 – mars 2006. Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes. Paris. <http://portail2.reseau-concept.net/Upload/ciheam/fichiers/NAN07.pdf>
- Allard, D.W., van Diepen, K., Boogaard, H., 2009. Regional crop yield forecasting: a probabilistic approach. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-4820-1. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-4820-1.pdf>
- Allen, R.G., Periera, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage 56*, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
- Augustin, B., 1921. Le régime des pluies au Maroc. Contribution préliminaire à l'étude de la pluviométrie du Maroc (avec deux planches et une carte en couleurs). "Mémoires de la société des sciences naturelles du Maroc" ; "Tome I. N° 1", 1921. Rabat : au siège de l'Institut Scientifique Chérifien ; Paris: 11, rue Victor-Cousin (Ve) chez Émile Larose, Éditeur. <http://bibdigital.rjb.csic.es/ing/Libro.php?Libro=3403>
- Augustin, B., 1911. Le dry-farming et ses applications dans l'Afrique du Nord. In: *Annales de Géographie*. t. 20, n°114. pp. 411-430. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo\\_0003-4010\\_1911\\_num\\_20\\_114\\_3660](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1911_num_20_114_3660)
- Bagnouls, F., Gaussen, H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. In: *Annales de Géographie*. t. 66, n°355. pp. 193-220. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo\\_0003-4010\\_1957\\_num\\_66\\_355\\_18273](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1957_num_66_355_18273)
- Bagnouls, F., Gaussen, H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Rist. Nat. Toulouse*, 88 (3.4), 193-239. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geoca\\_0035-113X\\_1954\\_num\\_29\\_3\\_1980](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geoca_0035-113X_1954_num_29_3_1980)
- Bakker, M.M., Govers, G., Ewert, F., Rounsevell, M., Jones, R., 2005. Variability in regional wheat yields as a function of climate, soil and economic variables: Assessing the risk of confounding. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 110, 195-209. DOI:10.1016/j.agee.2005.04.016..
- Balaghi, R., Tahri, M., El Hareich, T., 2012. Bulletin de prévision de la récolte céréalière. Campagne agricole 2011-2012. 3p. <http://www.inra.org.ma/docs/environ/bullprev1112fr.pdf>

- Balaghi, R., Badjeck, M.-C., Bakari, D., De Pauw, E., De Wit, A., Defourny, P., Donato, S., Gommes, R., Jlibene, M., Ravelo, A.C., Sivakumar, M.V.K., Telahigue, N., Tychon, B., 2010. Managing Climatic Risks for Enhanced Food Security: Key Information Capabilities. World Climate Conference - 3. *Procedia Environmental Sciences* 1, 313–323
- Balaghi, R., Tychon, B., Eerens, H., Jlibene, M., 2008. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10, 438 – 452. doi:10.1016/j.jag.2006.12.001
- Balaghi, R., 2006. Wheat grain yield forecasting models for food security in Morocco. University of Liège, Belgium. Thèse de doctorat, 103 p. <http://aridoculture.googlepages.com/publications>
- Balaghi, R., Fadlaoui, A., Jlibene, M., 2005. Defining the spatial extent of the agricultural regions. Development of an Integrated Natural Resources Management Framework for Durable Agriculture in Central Morocco (ICARDA-INRM project). INRA, Rabat. 35p.
- Balaghi, R., 2000. Suivi de l'évolution des réserves en eau sous culture de blé en région semi-aride marocaine: calibration et utilisation du modèle "Soil". Fondation Universitaire Luxembourgeoise - Belgique, 2000. Diplôme d'Études Approfondies en sciences de l'environnement. <http://riad.balaghi.googlepages.com/DEA.pdf>
- Balaghi, R., Jlibene, M., 1995. Diagnostic de la campagne agricole 1994-95. Centre Régional de la Recherche Agronomique de Meknès.
- Bazza, M., Tayaa, M., 1998. Modélisation agrométéorologique pour la prévision des rendements des céréales. *Géo Observateur* N°9. Septembre 1998. <http://archives.cnd.hcp.ma/uploads/news/017909.pdf>
- Benaouda, H., Bouaziz, A., 1992. Stratégies de travail du sol pour une meilleure réussite du peuplement pieds de départ et de rendement final : Cas de la région de Chaouia (Maroc). *Hommes, Terre et Eaux* n°86. <http://www.anafide.org/doc/HTE%2086/86-3.pdf>
- Bénichou, P., Le Breton, O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie* 7e série, 19, 23-34.
- Bennani, S., Ouattar, S., El Mourid, M., 1993. Simulation du rendement grain par le modèle SIMTAG. *Hommes, Terres et Eaux* n°93. <http://www.anafide.org/doc/HTE%2093/93-14.pdf>
- Boegh, E., Thorsen, M., Butts, M.B., Hansen, S., Christiansen, J.S., Abrahamsen, P., Hasager, C.B., Jensen, N.O., van der Keur, P., Refsgaard, J.C., Schelde, K., Soegaard, H., Thomsen, A., 2004. Incorporating remote sensing data in physically based distributed agro-hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 287 (2004) 279.

- Bontron, G., 2004. Préviation quantitative des précipitations : adaptation probabiliste par recherche d'analogues - utilisation des réanalyses NCEP/NCAR et application aux précipitations du sud-est de la France. [http://www.lthe.fr/OHM-CV/Documents/theses/these\\_bontron.pdf](http://www.lthe.fr/OHM-CV/Documents/theses/these_bontron.pdf)
- Boughlala, M., Balaghi, R., El Mourid, M., 1994. Validation et utilisation du modèle MULTISIM simulateur des distributions de rendements. In : Anonyme, eds. Journée d'Information sur les Recherches Agricoles. Outils d'aide à la décision et rentabilité de la recherche en agriculture aléatoire. Rabat: INRA, 1994 : 7-21.
- Bouman, B.A.M., 1995. Crop modelling and remote sensing for yield prediction. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 43 (1995) 143.
- Brohan, P., Kennedy, J.J., Harris, I., Tett, S.F.B., Jones, P.D., 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophys. Res.*, 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
- Buishand, T.A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology* 58, 11-27.
- Chaponniere, A., V.Smakhtin, 2006. A review of climate change scenarios and preliminary rainfall trend analysis in the Oum er Rbia Basin, Morocco. Working Paper 110 (Drought Series: Paper 8) Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI).
- Confalonieri, R., Bregaglio, S., Cappelli, G., Francone, C., Carpani, M., Acutis, M., El Aydam, M., Niemeier, S., Balaghi, R., Dong, Q., 2012. Wheat modelling in Morocco unexpectedly reveals predominance of photosynthesis versus leaf area expansion plant traits. *Agronomy for Sustainable Development*, in press.
- Curnel, Y., Buffet, D., Oger, R., 2004. First functionalities of a statistical calibration toolbox for crop yield forecasting. In: *Development of an Agri-environmental Monitoring System for the Chinese Province Heilongjiang*. Final Report of a Sino-Belgian Cooperation Project. Brussels, Belgian Science Policy.
- De Martonne, E., Célérier, J., Charton A., 1924. Le massif Rehamna. In: *Annales de Géographie*. t. 33, n°183. pp. 244-256. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo\\_0003-4010\\_1924\\_num\\_33\\_183\\_9655](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1924_num_33_183_9655)
- De Wit, A., Duveiller, G., Defourny, P., 2012. Estimating regional winter wheat yield with WOFOST through the assimilation of green area index retrieved from MODIS observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 164, 39–52.
- Debaeke, Ph., Aboudrare, A., 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *Europ. J. of Agronomy* 21. pp 433-446.

- Decrem, M., Oger, R., Buffet, D., Gego, E., Ozer, P., Tychon, B., Weinzaepflen, E., Eerens, H., Piccard, I. 2002. Questioning the importance of crop growth simulation for prediction of winter wheat yields in Belgium. *In: VII Congrès International de l'European Society for Agronomy, Cordoba, Spain, 14-19/07/2002.*
- Doraiswamy, P.C., Cook, P.W., 1995. Spring wheat yield assessment using NOAA AVHRR data. *Canadian Journal of Remote Sensing.* 21 (1995) 43.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper n. 33.* FAO, Rome, Italy, 193 p.
- Douguédroit, A., Messaoudi, A., 1998. Essai de prédiction des rendements des céréales dans le Maroc du Centre-Ouest. *In: Méditerranée, Tome 88, 1-1998. Précipitations et cultures céréalières dans le Centre-ouest du Maroc.* pp. 45-49.  
[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit\\_0025-8296\\_1998\\_num\\_88\\_1\\_3032](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit_0025-8296_1998_num_88_1_3032)
- Douguédroit, A., Durbiano, C., Messaoudi, A., Aït Hamza, M., 1998. Précipitations et rendements du blé dur et de l'orge en culture «bour» dans le Maroc du Centre-ouest. *In: Méditerranée, Tome 88, 1-1998. Précipitations et cultures céréalières dans le Centre-ouest du Maroc.* pp. 39-44.  
[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit\\_0025-8296\\_1998\\_num\\_88\\_1\\_3031](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit_0025-8296_1998_num_88_1_3031)
- Driouech, F., 2010. Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. France. 164p. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001300/01/driouech.pdf>
- Duchemin, B., Hadria R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Kharrou, M.H., Khabba, S., Mougnot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.C., Simonneaux, V., 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management* 79, 1-27.
- El Aydam, M., Balaghi, R., 2011. MARS Agrometeorological Vol. 19 – Special Issue. Crop Monitoring in Morocco. [ftp://mars.jrc.ec.europa.eu/Bulletin/Europe/2011/MARSBULL\\_2011\\_19\\_XX\\_special\\_Morocco.pdf](ftp://mars.jrc.ec.europa.eu/Bulletin/Europe/2011/MARSBULL_2011_19_XX_special_Morocco.pdf)
- El Aydam, M., Baruth, B., Balaghi, R., 2010. MARS Agrometeorological Vol. 18 No. 7 - Crop Monitoring in Morocco.  
<http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/Bulletins-Publications/MARS-Agrometeorological-AGRI4CAST-INRA-Morocco-30-06-2010-Vol.18-No.-7>
- El Mourid, M., 1991. Jalons pour une agronomie des zones arides et semi-arides. Mémoire pour le concours d'Ingénieur en Chef. INRA. Maroc.

Falkenmark, M., 1995. Coping with water scarcity under rapid population growth. Conference of SADC Ministers, Pretoria 23-24 November 1995.

FAO, 2003. The FAO crop monitoring and forecasting approach (R. Gommaes). In: Crop and Rangeland Monitoring in Eastern Africa for Early Warning and Food Security (D. Rijks, F. Rembold, T. Nègre, R. Gommaes and M. Cherlet, eds). Proceedings of a JRC/FAO International Workshop, Nairobi, 28–30 January 2003. Rome, FAO.

FAO, 2001. FAOCLIM 2.0 A World-Wide Agroclimatic Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

FAO, 1978. Report on the agro-ecological zones project. Vol. 1: Results for Africa. World Soil Resources Report 48/1. FAO, Rome, 158pp.

Faurès, J.-M., Bernardi, M., Gommaes, R., 2010. There Is No Such Thing as an Average: How Farmers Manage Uncertainty Related to Climate and Other Factors, International. Journal of Water Resources Development, 26: 4, 523-542. <http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2010.519515>

Fischer, T., 1900. Regenkarte von Murroko, Zeitsch. d. Gesellsch. f. Erdkunde zu Berlin.

Gausson, H., 1956. L'étude des climats par les courbes ombrothermiques : application à la cartographie. In: L'information géographique. Volume 20 n°5. pp. 191-193. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ingeo\\_0020-0093\\_1956\\_num\\_20\\_5\\_1643](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ingeo_0020-0093_1956_num_20_5_1643)

Genovese, G., Bettio, M. (eds), 2004. Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System. Volume 4. Statistical data collection, processing and analysis. In: European Communities (ISBN 92-894-8183-8)

Genovese, G., 2001. Introduction to the MARS Crop Yield Forecasting System (MCYFS). Meeting on 4 and 5 October 2001, Luxembourg. Space Applications Institute, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy, pp 15.

Genovese, G., Vignolles, C., Nègre, T., Passera, G., 2001. A methodology for a combined use of normalised difference vegetation index and CORINE land cover data for crop yield monitoring and forecasting. A case study on Spain. *Agronomie* 21: 91-111.

Gibbs, W.J., Maher, J.V., 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Bulletin No. 48. Melbourne, Bureau of Meteorology.

Glueck, M.F., Stockton, C.W., 2001. Reconstruction of the North Atlantic Oscillation, 1429-1983. *Int. J. Climatol.*, 21(12), 1453-1465.

Göbel, W., El Hairech, T., Moussadek, R., El Oumri, M., Douaik, A., Balaghi, R., Benaouda, H., El Ouali, A., Mokssit, A., El Khatal, S., Sebbari, R., 2007. Atlas agro-climatique du Maroc. Collection de 29 cartes. INRA et DMN, Rabat.

- Gommes, R., Balaghi, R., Haripada, D., Mariani, L., Challinor, A., Tychon, B., Dawod, M.A.A., 2010. Chapter 6: Agrometeorological forecasting. Guide to agricultural meteorological practices n°134. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization. pp. 214-262. [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/gamp\\_en.php](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/gamp_en.php)
- Gommes, R., El Hairech, T., Rosillon, D., Balaghi, R., 2009. Impact of climate change on agricultural yields in Morocco. World Bank-Morocco study on the impact of climate change on the agricultural sector. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italy. 105p. [ftp://ext-ftp.fao.org/SD/Reserved/Agromet/WB\\_FAO\\_morocco\\_CC\\_yield\\_impact/WB\\_Morocco\\_20090603.pdf](ftp://ext-ftp.fao.org/SD/Reserved/Agromet/WB_FAO_morocco_CC_yield_impact/WB_Morocco_20090603.pdf)
- Gommes, R. 2006. Non-parametric crop yield forecasting, a didactic case study for Zimbabwe. In Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates. ISPRS Archives XXXVI-8/W48 Workshop proceedings, page 79-84. [http://www.fao.org/nr/climpag/pub/non\\_parametric\\_yield\\_forecasting\\_FAO.pdf](http://www.fao.org/nr/climpag/pub/non_parametric_yield_forecasting_FAO.pdf)
- Gommes, R. 2001. An Introduction to the art of agrometeorological crop yield forecasting using multiple regression. Report. Crop Monitoring and Forecasting Group Crop Yield Forecasting and Agrometeorology Sub-Project, UTF/BGD/029, ASIRP/DAE, Dhaka.
- Hadria, R., Duchemin, B., Lahrouni, A., Khabba, S., Er-Raki, S., Dedieu, G., Chehbouni, A., 2006. Monitoring of irrigated wheat in a semi-arid climate using crop modelling and remote sensing data: Impact of satellite revisit time frequency, IJRS, 27. 1093-1117.
- Hanchane, M., 2009. Simulation de l'effet de la date de semis sur la satisfaction des besoins en eau de l'orge par le modèle CERES en climat semi-aride marocain. Sécheresse 20, 357-359. <http://www.jle.com/e-docs/00/04/51/67/article.phtml>
- Hanchane, M., 1998. Estimation des risques climatiques en fonction de la date de semis de l'orge au Maroc. In: Méditerranée. Tome 88, 1-1998. Précipitations et cultures céréalières dans le Centre-ouest du Maroc. pp. 51-58. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit\\_0025-8296\\_1998\\_num\\_88\\_1\\_3033](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit_0025-8296_1998_num_88_1_3033)
- Herrera, R.G., Puyol, D.G., Martin, E.H., Presa, L.G., Rodriguez, P.R., 2001. Influence of the North Atlantic Oscillation on the Canary Islands precipitation. J. Clim., 14(19), 3889-3903.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978. [http://www.worldclim.org/worldclim\\_IJC.pdf](http://www.worldclim.org/worldclim_IJC.pdf)
- Hijmans, R.J., Guiking-Lens, I.M. van Diepen, C.A., 1994: WOFOST 6.0: User's Guide for the WOFOST 6.0 *Crop Growth Simulation Model*. Technical Document 12. Wageningen, DLO Winand Staring Centre.

Hsiao, T.C. , Heng, L.K., Steduto, P. , Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agron J.* pp. 448–459

Hurrell, J.W., van Loon, H., 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic oscillation. *Climate Change* 36, 301-326.

Hurrell, J.W., 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.

IIASA/FAO, 2012. Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy. <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZv3.0/>

IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, eds). Cambridge, Cambridge University Press.

Jlibene, M., 2011. Options génétiques d'adaptation du blé tendre au changement climatique : variétés à résistance multiple (sécheresse, cécidomyie, septoriose, rouilles). Éditions INRA, Maroc, 2011. 51 p.

Jlibene, M., 2009. Amélioration génétique du blé tendre au Maroc à l'aube du 21<sup>ème</sup> siècle. Edition INRA, Maroc, 2009. 80 p.

Jlibene, M., Balaghi R., 2009. Le risque sécheresse en agriculture pluviale. Bulletin mensuel de liaison et d'information du Programme National de Transfert de Technologie n°181. <http://www.vulgarisation.net/bul181.htm>

Jlibene, M., Chafai, A. E., 2002. Variétés de blé adaptées au nord-ouest du Maroc. Bulletin de Transfert de Technologie en Agriculture n°88. 4p. <http://www.vulgarisation.net/bul88.htm>

Jury, A., Dedeabant, G., 1924. Études sur le Régime des Pluies au Maroc et Carte provisoire de la Répartition des pluies. *Mémoires de la Société des sciences naturelles du Maroc* ; "N.º IX.", 1924. Rabat : au siège de l'Institut Scientifique Chérifien ; Paris : 11, rue Victor-Cousin (Ve) chez Émile Larose, Éditeur ; Londres : 44, great Russell Street chez Janson et Sons. <http://bibdigital.rjb.csic.es/spa/Libro.php?Libro=3423>

Knippertz, P., Christoph, M., Speth, P., 2003. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric Physics* 83, 67-88.

- Koch, E., 2011. Étude de faisabilité d'une assurance rendement basée sur indice climatique. Université Paris-Dauphine, Mémoire d'actuariat. 126p. [http://www.lynxial.fr/pda/FP/1226-02.nsf/769998e0a65ea348c1257052003eb94f/48763f8ac4740188c12579d8006d8939/\\$FILE/Memoire%20KOCH%20Erwan.pdf](http://www.lynxial.fr/pda/FP/1226-02.nsf/769998e0a65ea348c1257052003eb94f/48763f8ac4740188c12579d8006d8939/$FILE/Memoire%20KOCH%20Erwan.pdf)
- Kogan, F.N., 2000. Contribution of Remote Sensing to Drought Early Warning. in: D.A.Wilhite, M.V.K. Sivakumar, A.W. Deborah, (Editors). Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management. World Meteorological Organization, Lisbon, pp. 86-100.
- Kouadio, A. L., 2007. Prédiction de la production nationale d'arachide au Sénégal à partir du modèle agrométéorologique AMS et du NDVI. DES Interuniversitaire En Gestion Des Risques Naturels. Université de Liège. Belgique. [http://www.hoefsloot.com/Downloads/TFE\\_Louis-Amani.pdf](http://www.hoefsloot.com/Downloads/TFE_Louis-Amani.pdf)
- Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J., Neter, J., Li, W., 2005. Applied Linear Statistical Models: Fifth edition New York: McGraw-Hill.
- Lazar, C., Baruth, B., Micale, F., 2009. Winter wheat yield estimation for Romania, based on normalized difference vegetation index data available on MARSOP site. AN. I.N.C.D.A. Fundulea, Vol. LXXVII, 2009. Fiziologia Plantelor. <http://www.incda-fundulea.ro/anale/77/77.25.pdf>
- Lee, A.F.S., Heghinian, S.M., 1977. A Shift Of The Mean Level In A Sequence Of Independent Normal random Variables-A Bayesian Approach. *Technometrics* 19, 503-506.
- Loup, J., 1957. Note sur l'évaporation au Maroc. In: *Revue de géographie alpine*. Tome 45 N°2. pp. 351-379. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rga\\_0035-1121\\_1957\\_num\\_45\\_2\\_1901](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rga_0035-1121_1957_num_45_2_1901)
- Maas, S.J., 1988. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models. *Ecological Modelling*. 41 (1988) 247.
- MAPM, 2011. Situation de l'agriculture marocaine N°9. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime. Rabat, Maroc. Novembre 2011. 204 p. <http://www.marocagriculture.com/bibliotheque/bilan/Situation-de-l'Agriculture-Marocaine.pdf>
- Martiny, N., Camberlin, P., Richard, Y., Philippon, N., 2006. Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp. 5201-5223.
- Maselli, F., Romanelli, S., Bottai, L., Maracchi, G., 2000. Processing of GAC NDVI data for yield forecasting in the Sahelian region. *International Journal of Remote Sensing*, 21. 3509-3523.
- Mayaux, P., Bartholomé, E., Fritz, S., Belward, A., 2004. A new land-cover map of Africa for the year 2000. *Journal of Biogeography* 31, 861-77.
- Mkhabela, MS., Bullock, P., Raj, S., Wang, S., Yang, Y., 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 385-393.



- Moricochi, L., R.R. Alfonsi, E.G. Oliveira and J.L.M. de Monteiro, 1995. Geadas e seca de 1994: perspectivas do mercado cafeeiro. *Informações Econômicas – Instituto de Economia Agrícola*, 25(6):49–57.
- Narciso, G., Balaghi, R., 2009. MARS Bulletin Morocco - Morocco Joint Crop Bulletin - 09 06 2009 Vol. 1 No. 1. <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/Bulletins-Publications/MARS-Bulletin-Morocco-Morocco-Joint-Crop-Bulletin-09-06-2009-Vol.-1-No.-1-English-Version>
- Neumann, K., M. Herold, A. Hartley, and C. Schmullius, 2007. Comparative assessment of CORINE2000 and GLC2000: Spatial analysis of land cover data for Europe, *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9, 425–437.
- Nicholson, S.E., Kim, J., 1997: The relationship of the El Niño-Southern Oscillation to African rainfall. *Int. J. Climatol.* 17:117–135.
- Nicholson, S. E., 1986. The spatial coherence of African rainfall anomalies: Interhemispheric teleconnections. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25, pp. 1365–1381.
- ONICL, 2012. *Importations des quatre céréales principales. Évolution de 1980 à 2012*. Office National interprofessionnel des céréales et des légumineuses. Maroc. <http://www.onicl.org.ma>
- Papy, F., 1979. Analyse du comportement des cultures de blé dur et d'orge dans différentes régions céréalères du Maroc à travers leur réaction aux variations interannuelles des régimes pluviométriques. *Acad. Agric. Fr.*, n° 3, pp.23 1-247.
- Péguy, C.P., 1983. Informatique et climatologie. In: *Annales de Géographie*. t. 92, n°511. pp. 284-304. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo\\_0003-4010\\_1983\\_num\\_92\\_511\\_20189](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1983_num_92_511_20189)
- Peterson, T.C., Vose, R.S., 1997. An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Data Base, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, pp. 2837–2849.
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28, 126-135.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agron J.* pp. 438–447.
- Ramde, P. S., 2007. L'alerte précoce et la prévision des rendements agricoles au Burkina Faso: cas de trois provinces Passore, Yatenga et Soum. Université de Liège. <http://www.memoireonline.com/03/11/4360/Lalerte-precoce-et-la-prevision-des-rendements-agricoles-au-Burkina-Faso-cas-de-trois-province.html>
- Roux, G., Debrach, J., Gaussen, H., 1949. Précipitations Annuelles. Atlas du Maroc No. 4a. Comité de Géographique du Maroc.

- Roux, G., 1938. Troisième mémoire consacré à la Physique du Globe et à la Météorologie au Maroc. Mémoires de la Société des sciences naturelles du Maroc" ; "N.º XLIV", 1938 . Rabat : au siège de l'Institut Scientifique Chérifien ; Paris : 11, rue Victor-Cousin (Ve) chez Émile Larose, Éditeur ; Londres : 44, great Russell Street chez Janson et Sons.  
<http://bibdigital.rjb.csic.es/spa/Libro.php?Libro=4344>
- Sebbar, A., Badri, W., Fougrach, H., Hsaine, M., Saloui, A., 2011. Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sécheresse* 22. pp. 139-48.  
[http://www.jle.com/e-docs/00/04/6C/61/vers\\_alt/VersionPDF.pdf](http://www.jle.com/e-docs/00/04/6C/61/vers_alt/VersionPDF.pdf)
- SEEE, 2010. Seconde Communication Nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Avril 2010. Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE). Rabat, Maroc. 218p.
- Seemann, J., Chirkov, Y.I., Lomas, J., Primault, B., 1979. Agrometeorology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, Germany. 326 p.
- Sinclair, T.R., Seligman, N., 2000. Criteria for publishing papers on crop modelling. *Field Crops Research* 68, pp. 165-172.
- Skees, J., R., Gober, S., Varangis, P., Lester, R., Kalavakonda, V., 2001. Developing Rainfall Based Index Insurance in Morocco. World Bank Policy Research Working Paper 2577.  
<http://ideas.repec.org/p/wbk/wbrwps/2577.html>
- Snedecor, G.W., Cochran, W.G., 1989. *Statistical Methods*, Eighth Edition, Iowa State University Press.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles *Agron J* 2009 101: 426–437.
- Stoppa, A., Hess, U., 2003. Design and Use of Weather Derivatives in Agricultural Policies: the Case of Rainfall Index Insurance in Morocco. Contributed paper presented at the International Conference Agricultural policy reform and the WTO: where are we heading? Capri (Italy), June 23-26, 2003.  
<http://www.agriskmanagementforum.org/farmd/sites/agriskmanagementforum.org/files/Documents/Design%20and%20Use%20of%20Weather%20Derivatives%20Morocco.pdf>
- Supit, I., A.A. Hooijer and C.A. van Diepen (eds), 1994: *System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS*. Vol. 1. Theory and Algorithms. Agriculture Series. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
- Taky, A., 2008. Maitrise des excès d'eau hivernaux et de l'irrigation et leurs conséquences sur la productivité de la betterave sucrière dans le périmètre irrigué du Gharb (Maroc). Analyse expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech). France. [www.eau-sirma.net/media/files/these\\_de\\_taky](http://www.eau-sirma.net/media/files/these_de_taky)

- Tchuente, A.T.K., Roujean, J.L., De Jong, S.M., 2011. Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, 13, 207-219. DOI: 10.1016/j.jag.2010.11.002
- Van Diepen, C.A., Wolf, J., van Keulen, H., Rappoldt, C., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1):16–24.
- Van Keulen, H. and H.H. van Laar, 1986. The relation between water use and crop production. In: *Modelling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops* (H. van Keulen and J. Wolf, eds). Simulation monographs. Wageningen, Pudoc.
- Van Kraalingen, D.W.G., 1991: *The FSE System for Crop Simulation*. Simulation reports CABO-TT No. 23, CABO-DLO. Wageningen, Wageningen Agricultural University.
- Van Oijen, M., 2002. On the use of specific publication criteria for papers on process-based modelling in plant science. *Field Crops Research* 74, 197-205.
- Varaldi-Conia A., 1953. Un exemple d'utilisation du milieu pour une étude sur l'érosion et ses conséquences dans une zone aride. In: *L'information géographique*. Volume 17 n°4. pp. 148-153. [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ingeo\\_0020-0093\\_1953\\_num\\_17\\_4\\_1299](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ingeo_0020-0093_1953_num_17_4_1299)
- Ward, M.N., Lamb, P.J., Portis, D.H., El Hamly, M., Sebbari, R., 1999. Climate Variability in Northern Africa: Understanding Droughts in the Sahel and the Maghreb. In: Navarra A (ed), *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Springer Verlag, Berlin, pp. 119-14.
- Watts, D., El Mourid, M., 1988. Rainfall patterns and probabilities in the semi-arid cereal production region of Morocco. USAID Project No. 608-0136. Settat: Aridiculture Center INRA. <http://archives.cnd.hcp.ma/uploads/news/94-0207.pdf>
- Watson, D.J., 1947. Comparative physiological studies in growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Anatomy and Botany* 11, 41–76.
- WMO, 2010. Guide to Agricultural Meteorological Practices n°134. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. 799p. [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/gamp\\_en.php](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/gamp_en.php)
- WMO, 2006. Commission for Agricultural Meteorology (CAgM). The first fifty years. WMO-No. 999, Geneva, 44 p. <http://www.wamis.org/agm/pubs/brochures/wmo999e.pdf>

## Dr Riad BALAGHI



Dr Riad BALAGHI, né le 7 juin 1964 à Casablanca, est ingénieur agronome, lauréat de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Il est titulaire d'un diplôme d'Études Approfondies en sciences de l'environnement délivré par la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (Belgique) ainsi que d'un diplôme de Doctorat en Sciences de l'Environnement délivré par l'Université de Liège (Belgique).

Il a débuté sa carrière de chercheur en 1992 à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA – Centre régional de Meknès) où il a été par la suite coordinateur de l'Unité de Recherches sur l'Agronomie et la Physiologie Végétales. Il est actuellement Chef du Département de l'Environnement et des Ressources Naturelles à l'INRA, Rabat.

Il s'est intéressé aux études agro-climatiques pour les céréales dès le début de sa carrière à l'INRA-Meknès en 1992. Ses publications scientifiques et techniques nationales et internationales traitent de la sécheresse ainsi que des moyens à mettre en œuvre pour atténuer les risques climatiques sur l'agriculture marocaine. Ses recherches ont porté sur la gestion du risque de sécheresse, l'impact de la sécheresse sur les rendements agricoles, la prédiction des productions agricoles, ainsi que l'impact du changement climatique sur le devenir de l'agriculture marocaine.

Il a été consultant pour la FAO dans plusieurs pays, dans le domaine de la prédiction des récoltes. Il a été également consultant national dans le domaine du changement climatique et de sa prise en compte dans la mise en œuvre du Plan Maroc Vert. Il coordonne plusieurs projets de recherche et développement, nationaux et internationaux. Il a publié les premiers bulletins de prédiction des récoltes céréalières du Maroc. Il contribue à la diffusion de l'information scientifique et technique à travers le site SAADA <https://sites.google.com/site/aridoculture/>, dont il est co-fondateur avec Dr Mohammed JLIBENE.

En récompense de ses travaux sur les changements climatiques, il lui a été décerné la Médaille du Mérite par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), à l'occasion de la Journée Mondiale de l'Alimentation du 16 octobre 2008 à Rabat.

## Dr Mohammed JLIBENE



Dr Mohammed JLIBENE, né le 11 mai 1952 à Taza, est lauréat de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II avec le diplôme d'Ingénieur d'État en Agronomie, obtenu en 1979. Il a également obtenu le doctorat ès-sciences en génétique et amélioration des plantes, en 1990 à l'Université de Missouri aux USA.

Il a travaillé durant toute sa carrière à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), depuis 1979, où il a été responsable de la sélection variétale du blé tendre à l'INRA. C'est un scientifique reconnu, aussi bien au Maroc qu'à l'étranger. Il a créé plus de vingt variétés de blé tendre, très prisées par les agriculteurs marocains, en raison de leur productivité ainsi que de leur résistance à la sécheresse, aux maladies et ravageurs. Parmi les variétés qui ont connu le plus de succès, on citera « Marchouch », « Achtar », « Amal », « Rajae », « Mahdia » et « Arrehane ». Ces variétés sont actuellement largement cultivées au Maroc, ayant contribué à la sécurité alimentaire du pays, à lutter contre la sécheresse, à augmenter le revenu des agriculteurs et à limiter les importations céréalières.

Dr. Jlibene a aussi mis en place et géré des équipes de recherche multidisciplinaires, des laboratoires scientifiques et des programmes de recherche, à l'INRA de Rabat, Settat et Meknès.

Dr Mohammed JLIBENE s'est vu décerner en 2009 le premier prix du *Grand Prix Hassan II pour l'invention et la recherche dans le domaine agricole*, pour la création de variétés résistantes à la sécheresse et aux hautes températures, et aux principaux parasites du blé (septoriose, rouilles, cécidomyie). Son intérêt pour la résistance variétale à la sécheresse et pour l'agrométéorologie remonte à 1995. Il contribue à la diffusion de l'information scientifique et technique à travers : la publication de plus d'une centaine d'articles et documents aux échelles internationales et nationales, la contribution à la formation d'étudiants stagiaires, le conseil aux agriculteurs et l'expertise dans le domaine des céréales, et à travers le site SAADA <https://sites.google.com/site/aridoculture/>, dont il est co-fondateur avec Dr Riad BALAGHI.

## Dr Bernard TYCHON



Dr Bernard TYCHON, 48 ans, ingénieur agronome (Université Catholique de Louvain, 1987) et docteur en Sciences de l'Environnement (Fondation Universitaire Luxembourgeoise, 1993) est Chargé de Cours dans le Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de la Faculté des Sciences de l'Université de Liège en Belgique.

Il dirige depuis 15 ans un groupe de recherche en agrométéorologie. Les thèmes étudiés dans ce groupe concernent la relation agriculture-environnement physique. Plus précisément, les principales activités qui sont liées aux besoins et exigences en eau, rayonnement et température des cultures sous différentes latitudes pour pouvoir prévoir les niveaux de production agricole. Les recherches de ce groupe ont notamment contribué à la mise en place d'outils de prédiction de rendement des cultures dans plusieurs pays du monde (Belgique, Maroc, Éthiopie, Sénégal, Chine,...), à la conception d'un système d'avertissement opérationnel contre les maladies du blé (Belgique et Grand-duché de Luxembourg) et à la proposition d'outils de gestion intégrée de l'eau à usage agricole (Burkina Faso). Dr Bernard TYCHON a également contribué à la formation pour ces types d'outils notamment au Niger, Pakistan, Bangladesh, Turquie, Afghanistan et en Arménie via des formations organisées pour le compte de la FAO.

Il dispense des cours en agrométéorologie, traitement des données et modélisation, télédétection et systèmes d'information géographique, et pollution diffuse. Il a encadré de nombreux étudiants ressortissants de Pays en Voie de Développement effectuant des DES, DEA, Masters, Masters Complémentaires et Doctorats. Il a publié plus de 100 communications scientifiques (livres, rapports de projets de recherche, actes de colloques, revues scientifiques nationales et internationales).

Il fut lauréat du *Outstanding Young Person Award of the Belgian Junior Economical Chamber* en 2004 et il est représentant de la Belgique au sein de la Société Européenne d'Agronomie depuis 2004. Il est également Président du Collège de Doctorat en Sciences et Gestion de l'Environnement et co-responsable du Master Complémentaire en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Voie de Développement.

## M. Herman EERENS



M. Herman EERENS est diplômé d'un master en sciences agricoles et biologie appliquée de l'Université de Leuven (Belgique), en 1980. Il a travaillé au sein de cette université pendant près de 15 années, premièrement dans le Département de foresterie puis, à partir de 1985, dans le domaine de la télédétection spatiale. Ses principales activités ont porté sur des domaines de recherche tels que la radiométrie des cultures et des sols, la modélisation de la réflectance des cultures, la correction atmosphérique et la classification des images de haute résolution spatiale. En 2007, il a rejoint l'Institut flamand pour la recherche technologique (VITO, Belgique). Depuis cette date, il a travaillé principalement sur le traitement des images satellitaires de basse résolution spatiale provenant des capteurs SPOT-VEGETATION, NOAA/METOP-AVHRR, MODIS et MSG ainsi que l'extraction d'informations utiles pour les statistiques agricoles. M. Herman EERENS travaille actuellement à fournir les informations nécessaires au projet Monitoring Agricultural Resources (MARS) de l'Union Européenne aussi bien qu'à des projets en Chine et en Afrique. Il a développé des logiciels de traitement des images satellitaires tels que *Glimpse* et *Spirits*, dans le cadre de ces projets.



### **Dr Riad BALAGHI**

né le 7 juin 1964 à Casablanca, est ingénieur agronome, lauréat de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Il est titulaire d'un diplôme d'Études Approfondies en sciences de l'environnement délivré par la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (Belgique) ainsi que d'un diplôme de Doctorat en Sciences de l'Environnement délivré par l'Université de Liège (Belgique). Il est Chef du Département de l'Environnement et des Ressources Naturelles à l'INRA.



### **Dr Mohammed JLIBENE**

né le 11 mai 1952 à Taza, est lauréat de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II avec le diplôme d'Ingénieur d'État en Agronomie, obtenu en 1979. Il a également obtenu le doctorat ès-sciences en génétique et amélioration des plantes, en 1990 à l'Université de Missouri aux USA. Il a travaillé durant toute sa carrière à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), depuis 1979.



### **Dr Bernard TYCHON**

48 ans, ingénieur agronome (Université Catholique de Louvain, 1987) et docteur en Sciences de l'Environnement (Fondation Universitaire Luxembourgeoise, 1993) est Chargé de Cours dans le Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de la Faculté des Sciences de l'Université de Liège en Belgique.



### **M. Herman EERENS**

est diplômé d'un master en sciences agricoles et biologie appliquée de l'Université de Leuven (Belgique), en 1980. Il a travaillé au sein de cette université pendant près de 15 années, premièrement dans le Département de foresterie puis, à partir de 2007, dans le domaine de la télédétection spatiale à l'Institut flamand pour la recherche technologique (VITO, Belgique).

