



# TRANSFERT DE TECHNOLOGIE EN AGRICULTURE

MAPM/DEFR

• Octobre 2009 •

PNTTA

## Le risque sécheresse en agriculture pluviale

### *Cas des céréales*

#### Introduction

L'agriculture marocaine est presque entièrement dépendante de la pluviométrie dont la quantité varie selon les régions et les années agricoles. La production céréalière, réalisée essentiellement en zones pluviales, est sujette aux fortes fluctuations interannuelles de la pluviométrie. Les superficies irrigables qui pourraient réduire cette dépendance vis-à-vis du climat, représentent moins de 9% des superficies cultivées et contribuent à moins de 17% de la production totale.

La pluie est un événement aléatoire dont on ne peut prévoir à moyen terme ni les volumes ni les épisodes. Le temps qui s'écoule, entre deux épisodes pluvieux, peut varier de quelques jours à quelques mois. Le temps écoulé durant lequel il n'y a pas eu suffisamment de pluie pour subvenir aux besoins en eau de la culture est appelée période de sécheresse. Pour palier à ce problème d'imprévisibilité de la pluviométrie, les recherches ont opté pour l'approche qui consiste à fixer une période et calculer la quantité reçue durant cette période. La période en question peut être une semaine, une décennie, deux décennies, un mois, une phase du cycle, ou tout le cycle. Dans les études hydrauliques ou climatiques, la période considérée peut correspondre à plusieurs années. Si les besoins en eau des cultures au cours du cycle ne sont pas satisfaits, la croissance normale de la culture peut être affectée. Sur une période donnée, plus la pluviométrie est inférieure aux besoins et plus la sécheresse est importante. La sécheresse est donc une insuffisance de pluviométrie, pendant une période de temps, qui aurait un effet négatif sur la culture.

Les appellations de la sécheresse sont nombreuses, selon la cible touchée. Elle est appelée sociale si une population est touchée, climatique si le niveau global des ressources hydriques chute, hydraulique si les réserves d'eau sont affectées, agronomique lorsqu'il s'agit des cultures, physiologique s'il s'agit d'une plante. On peut imaginer d'autres définitions pour des cibles plus larges ou plus petites.

Au niveau de l'agriculture, le sol joue le rôle de tampon, en conservant l'eau entre deux épisodes pluvieux et en la mettant à la disposition de la plante. La sécheresse peut donc ne pas être ressentie par la plante même en absence de pluie, tant que l'humidité du sol reste suffisante et que la plante n'a pas épuisé toutes ses ressources internes.

La sécheresse agronomique n'est pas seulement une insuffisance de pluviométrie pendant une période de temps donnée, mais un manque d'eau sur une période suffisamment longue pour être ressentie par la culture. L'événement de sécheresse ne peut pas être dissocié de la culture et de son environnement. Durant les deux grandes sécheresses survenues au Maroc, durant les campagnes agricoles 1994-1995 et 1999-2000, des cultures installées après jachère ou après des cultures irriguées n'ont pas souffert de la sécheresse car le sol avait conservé suffisamment d'eau.

Dans la littérature, l'analyse de la sécheresse agronomique s'est basée sur l'exploitation des données historiques de la pluviométrie en vue de générer des normes statistiques de référence ou des probabilités d'occurrence d'une classe de pluviométrie, indépendamment des besoins des cultures. Selon cette approche statistique, on considère qu'il y a sécheresse lorsque la pluviométrie est infé-

### SOMMAIRE

# n° 181

#### Agriculture pluviale

- Risque de sécheresse.....p.1
- Analyse agro-climatique.....p.2
- Analyse Pluviométrie-rendement.....p.3
- La prévision des rendements céréalières.....p.5
- Actions pour réduire la vulnérabilité.....p.6

rieure à une pluviométrie seuil, qui est généralement prise comme la moyenne ou la médiane d'une longue série chronologique.

De façon générale, le risque de sécheresse est calculé en fonction d'un facteur naturel aléatoire (la pluviométrie) et de la réponse de la culture à cet aléa (vulnérabilité), schématisé mathématiquement ainsi:

$$\text{Risque sécheresse} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$$

La vulnérabilité prend plusieurs significations selon la cible touchée par la sécheresse. On parle de la vulnérabilité des terres à l'échelle d'une grande région, de la vulnérabilité sociale à l'échelle d'une population, de la vulnérabilité du système de production à l'échelle d'une exploitation, de la vulnérabilité des cultures à l'échelle d'un champ cultivé, et de la tolérance à la sécheresse à l'échelle d'une plante.

Le risque de sécheresse peut être mesuré par une variable économique (rendement, production), l'aléa peut être mesuré en termes de pluviométrie reçue pendant une période donnée, et la vulnérabilité par une statistique qui mesure la réaction face à cet aléa.



Le risque peut théoriquement être atténué en agissant sur l'un ou l'autre des deux termes de l'équation, aléa ou vulnérabilité. En l'état actuel du progrès technologique, il n'y a pas beaucoup d'options pour réduire l'aléa, à l'exception des pluies artificielles provoquées. C'est donc au niveau de la vulnérabilité, qu'il peut exister des choix possibles d'intervention.

La vulnérabilité des cultures peut résulter d'une vulnérabilité liée à la variété cultivée (génétique), d'une vulnérabilité liée à la conduite technique (agronomique) ou d'une vulnérabilité liée au milieu naturel (environnementale). Comme le milieu naturel est difficile à modifier à l'échelle du champ cultivé, l'utilisation d'une variété résistante à la sécheresse et des techniques agronomiques économes en eau, sont en mesure de réduire la vulnérabilité des cultures. D'autres actions d'ordre politique, informationnelle (systèmes d'alerte à la sécheresse), socio-économique (assurance sécheresse), et technologique, peuvent être engagées pour réduire la vulnérabilité de la population rurale, des agriculteurs, des systèmes de production, ou des régions à l'aléa climatique.

Le présent bulletin a pour objet d'analyser la sécheresse au Maroc, mais sous l'angle de vue agronomique, en relation avec les cultures des céréales d'automne.

## Analyse climatique

### Analyse spatiale 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 sont en général secs. Le volume pluviométrique annuel reçu change avec la latitude, la longitude et l'altitude. Il y a un gradient croissant d'humidité du sud vers le nord due à l'influence désertique, d'est en ouest à cause de l'influence océanique et des basses températures vers les hautes altitudes.

Cette grande répartition spatiale de la pluviométrie est structurelle. Elle indique le niveau d'aridité des régions, qui s'accroît en s'approchant du désert et diminue en allant vers le nord et l'océan. Selon le niveau d'aridité, le climat du Maroc a été subdivisé en classes: aride, semi aride, subhumide, et humide. On retrouve la montagne (régions d'altitude à hivers froids) et l'irrigué (régions des périmètres hydrauliques) dans ces quatre étages climatiques. Sur la figure 1, quatre étages climatiques sont représentés, du sud vers le nord, avec des niveaux de pluviométrie de moins de 50 mm au sud du pays à plus de 1000 mm au nord.



### Analyse fréquentielle de la pluviométrie

L'analyse fréquentielle est une approche statistique, indépendante du type de culture considéré, qui permet de modéliser ou de capturer 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 a été adopté pour aider à la prise de décision en agriculture.

On calcule les probabilités de réalisation pour une période, prise séparément (jour, décennie, ou mois) de manière à représenter la distribution de la pluviométrie au cours de la saison (Fig. 2). On peut ainsi observer que la distribution de la pluviométrie (sur la période 1988 à 2008) est bimodale avec un premier pic en fin novembre – début décembre et un deuxième pic, de moindre importance, en début avril. L'analyse fréquentielle permet aussi de constater que la pluviométrie est plutôt concentrée en automne, montrant ainsi l'importance de la réussite des semis pour valoriser l'eau de pluie et donc améliorer les rendements agricoles. Par exemple, la probabilité est de 70% que la pluviométrie soit égale ou inférieure à 32 mm à la troisième décennie de novembre. Les probabilités sont calculées séparément pour chaque décennie, indépendamment des autres décennies de l'année. Il ne faut donc pas en déduire que

la distribution de la pluviométrie sur toute la saison, telle que représentée en bleu sur la figure 2, a une probabilité de 70% de se produire. Dans la réalité, une pluviométrie annuelle telle que celles représentées en rouge ou en violet dans la figure 2, ont des probabilités infimes de se réaliser, égales à 0,1<sup>27</sup>.

## Analyse agro-climatique

### Analyse de la longueur de la période de croissance

Une méthode a été proposée par la FAO en 1978 pour déterminer le positionnement des cultures dans la saison agricole, qui tient compte de la pluviométrie, de la demande évaporative de l'atmosphère (ETP), du stock d'eau dans le sol et des exigences des plantes. On suppose qu'une pluviométrie comprise entre la moitié et le dixième de l'ETP serait suffisante pour entamer les préparations du sol, qu'une pluviométrie comprise entre l'ETP et la moitié de l'ETP serait favorable à la croissance des plantes, et qu'une pluviométrie supérieure à l'ETP correspondrait à la période humide. A partir de ces hypothèses, on peut déterminer les différentes phases d'intervention (préparation du sol, semis, croissance et fin de cycle) par rapport à la longueur de la période de croissance, schématisées dans la figure 3, tout en tenant compte de la réserve en eau du sol. On peut calculer selon cette méthodologie et à partir d'une longue série de données climatiques,

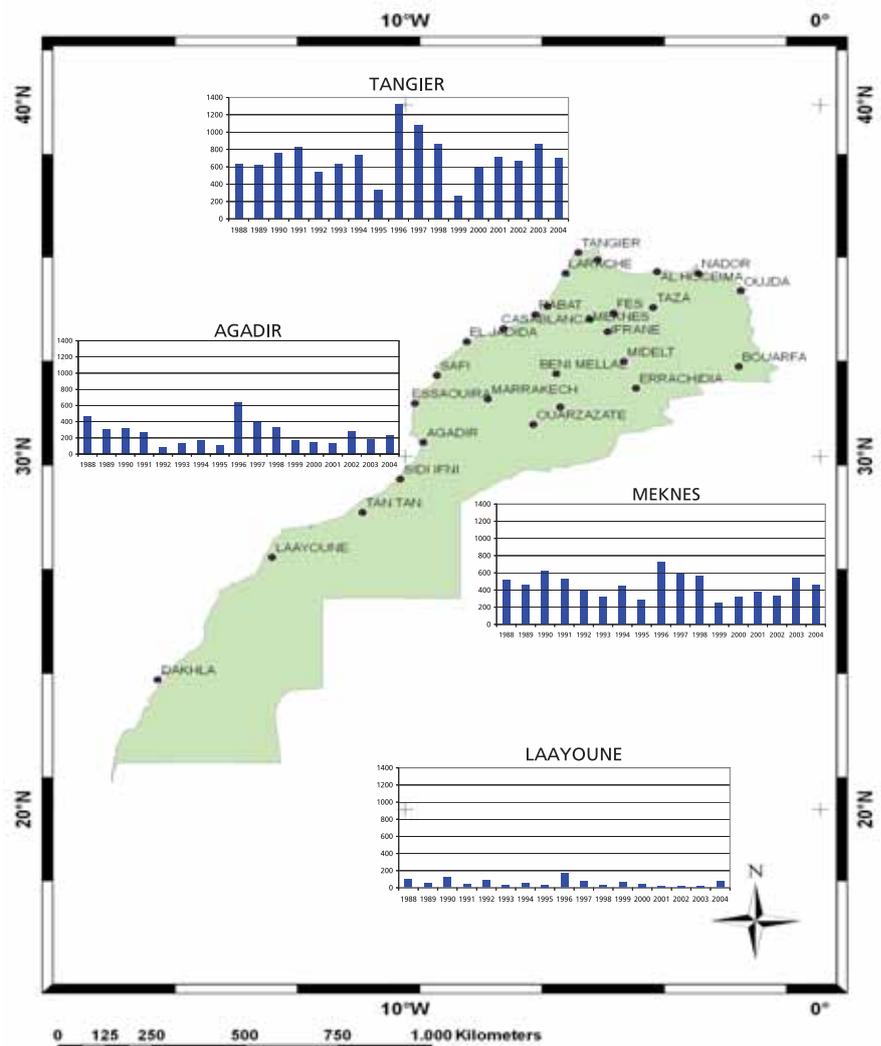


Figure 1: Répartition spatiale de la pluviométrie annuelle au Maroc

que les préparations du sol dans la région du Loukkos, par exemple, doivent se faire avant le 18 octobre, les semis avant le 5 novembre, sinon on tombe dans la période humide où l'accès au champ sera difficile. La floraison du blé se situe vers la fin de la période humide. Appliquée à la culture du blé dans la région du Loukkos, on a pu déterminer les différentes phases de culture qui sont résumées dans la figure 3.

### Analyse de la relation pluviométrie - rendement des céréales

Une augmentation ou une diminution du volume pluviométrique durant le cycle des céréales d'automne (entre début septembre et fin mai) par rapport à celui de la campagne précédente, se répercute en général par une évolution de la productivité dans le même sens (Fig. 4). A la fin du mois de mai, toutes les céréales ont atteint le stade de maturité physiologique qui correspond à la pleine formation du grain. Il y a cependant quelques exceptions, où une baisse de la pluviométrie par rapport à la campagne précédente s'est accompagnée d'une augmentation du rendement, comme en 1997-1998 ou bien, à l'inverse, une augmentation de la pluviométrie s'est accompagnée d'une baisse du rendement comme en 1989-1990 et en 1999-2000. Cela souligne l'importance de la distribution de la pluviométrie à l'intérieur de la campagne agricole. Durant la campagne 1997-1998, les mois de janvier, février et mars ont été suffisamment pluvieux. Ce sont les mois pendant lesquels la demande en eau par les céréales d'automne est forte. Par contre, en 1989-1990 et en 1999-2000, les mois de janvier, février et mars ont été secs, la pluie n'étant survenue que trop tard, en avril, après la maturité forcée des céréales d'automne.

### Définition d'une année normale du point de vue agro-climatique

Pour situer les différentes saisons agricoles, les unes par rapport aux autres, on a souvent besoin d'une année de référence que l'on peut définir comme "normale". Cette année, dite normale, a été définie dans la bibliographie comme étant la moyenne de la pluviométrie mensuelle sur une série chronologique suffisamment longue. Cependant, une année dont la pluviométrie mensuelle correspond à la moyenne des mois de plusieurs années est fictive n'ayant pas de semblable dans la réalité.

En terme biologique, un état normal est un état sans stress. Une plante est dans un état normal lorsque ses fonctions physiologiques ne sont pas altérées par un quelconque stress. En conformité avec cette définition, il faudra tout d'abord connaître les besoins en eau de la culture tout au long de son cycle, ce qui est une donnée qui fait souvent défaut au Maroc. Comme alternative, on peut considérer comme normale une année à l'issue de laquelle le rendement des cultures est satisfaisant sans que la pluviométrie ait été élevée. C'est manifestement l'année où il devrait y avoir une bonne distribution de la pluviométrie au cours de la saison. Les années 1988, 1991 et 1994 ressemblent à ce type de normalité, c'est à dire une pluviométrie moyenne mais un rendement élevé.

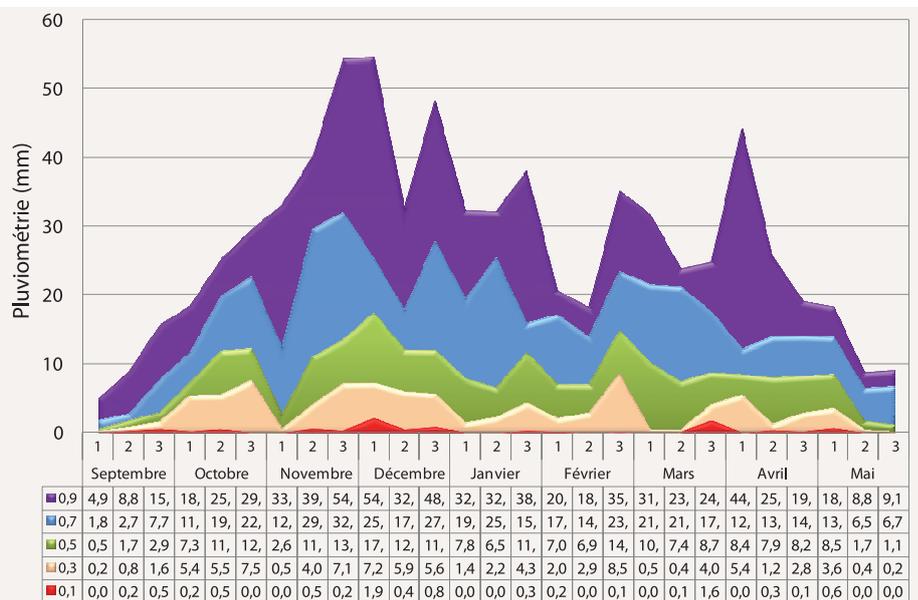


Figure 2: Distribution fréquentielle de la pluviométrie décadaire nationale sur la période 1988 à 2008, par groupe de probabilité (de 0,1 à 0,9). Il s'agit de la probabilité de recevoir une quantité de pluie inférieure ou égale aux valeurs indiquées sur le graphique pour chaque décade prise indépendamment des autres.



Figure 3: Longueur de la période de croissance: période de préparation du sol (orange), période humide (vert foncé) qui est incluse dans la période de croissance (vert clair), et période de maturation (jaune), leurs durées et dates de début et fin, respectives.

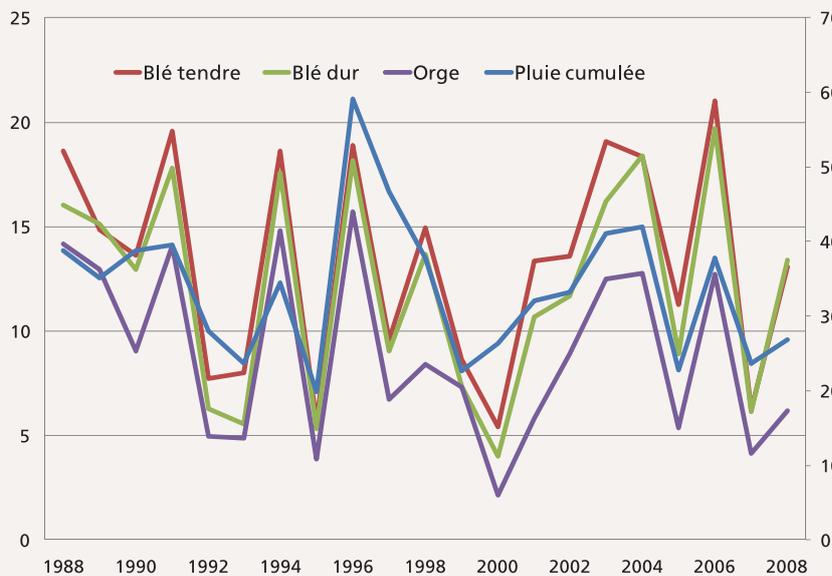


Figure 4: Evolution du rendement national (Qx/ha) des espèces céréalières au cours des années, en relation avec la pluviométrie moyenne annuelle cumulée entre septembre et mai (courbe en bleue).

Tableau 1: Campagnes agricoles classées par niveau de pluviométrie cumulée entre septembre et mars (nationale) et par niveau d'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie

Classe d'efficacité d'utilisation de l'eau (Kg/mm)	Type de campagne agricole		
	Pluvieuse (> 250 mm)	Moyenne (150 à 250 mm)	sèche (< 250 mm)
Elevée (> 7,5)		1991, 2002, 2006, 2008	1989, 1991, 2002, 2005
Moyenne (4,5 à 7,5)	1988, 1996, 1990, 2003, 1994	2004	1992, 1995, 1999, 2007
Faible (< 4,5)	1997		2000

Dans le tableau 1, les campagnes agricoles sont classées par ordre de pluviométrie et d'efficacité d'utilisation de l'eau. Elles peuvent être groupées en trois classes selon le niveau de pluviométrie (pluvieuse, moyenne et sèche) et trois niveaux d'efficacité (élevée, moyenne et faible). On constate que les années pluvieuses ne sont pas bien valorisées, alors que les années moyennes et sèches sont mieux valorisées.

Les campagnes qui ont mieux valorisé l'eau de pluie, parmi les campagnes sèches, sont celles de 2002, 2005 et 2008 pendant lesquelles la pluviométrie a été stable, de 12mm par décennie, durant la période de novembre à mars. Les campagnes moyennes les plus efficaces en eau sont celles de 1989, 1991 et 2006 qui ont reçu une pluviométrie stable à un rythme de 14mm à 18mm par décennie. En se basant sur l'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie, il n'y a pas de campagne idéale en général, mais une campagne idéale par type de campagne (pluvieuse, moyenne, sèche). L'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie durant les campagnes pluvieuses est encore modeste.

La campagne idéale serait celle où la pluviométrie est stable durant la période qui se situe entre le semis jusqu'à la floraison. Même si le volume total est faible, s'il est réparti de façon homogène entre les décennies, l'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie sera élevée.

En général, la pluie de novembre permet l'installation de la culture, et celle de janvier, février et mars, la constitution de la biomasse. En décembre, les températures sont relativement basses et la demande sur l'eau est minimale. La remobilisation des hydrates de carbone vers le grain nécessite moins d'eau, et se fait avec moins de contraintes, surtout après les améliorations génétiques apportées au niveau de la variété.

### Analyse du cumul pluviométrique

Le cumul de pluviométrie (Figure 5) donne une courbe lisible, interprétable et même potentiellement modélisable. Les courbes de la figure 5 correspondent aux cumuls de pluviométrie décennale au Maroc entre septembre et mars pour une série chronologique de 1988 à 2008. Elles peuvent être approchées par des courbes droites, linéaires simples, ou sigmoïdes. Les périodes d'absence de pluie (segments horizontaux) correspondent aux périodes de sécheresse qu'il est possible de localiser dans le temps et en estimer la longueur. Les stades de développement des cultures peuvent être affichés sur le même graphique, délimitant ainsi la période de sécheresse par rapport au cycle de la culture.

Le cumul journalier de la pluviométrie rapporté sur un graphique montre des pas d'escalier plus fréquents, indicateurs de jours de sécheresse. Cependant, cela ne signifie pas forcément qu'il y a sécheresse, en raison de l'effet tampon du sol.

La sécheresse est moins ressentie dans un sol qui a une capacité à emmagasiner de l'eau que dans un sol à moindre capacité. La période requise pour l'analyse de la pluviométrie dépend ainsi de la nature du sol.

### Evolution de la culture du blé durant la saison agricole

La culture croît et se développe en fonction de l'évolution de la pluviométrie au cours de la saison. L'évolution de la matière sèche du blé tendre en une année favorable à Meknès (province représentative de la céréaliculture), comme cela a été le cas en 2003, indique une courbe de croissance d'une allure sigmoïde à trois phases: une phase lente de démarrage, suivie d'une phase de relance rapide, puis d'une phase de stagnation de la matière sèche. On peut déduire de cette courbe, que c'est au niveau de la phase d'accumulation rapide de la biomasse que la demande en eau par la culture est élevée. Cette phase correspond aussi à une hausse de température qui va se traduire par une demande accrue en eau par l'atmosphère. Durant cette phase, la sécheresse a des conséquences néfastes sur les rendements. L'analyse des courbes de croissance sur plusieurs campagnes contrastées permet d'analyser la relation entre l'élaboration du rendement et la répartition intra-annuelle de la pluviométrie.

L'évolution de la pluviométrie décennale au cours du cycle de croissance du blé en 2003

à Meknès suit une fonction linéaire, avec une progression constante de 20mm par décennie, entre le semis et la maturité. Cette campagne peut être prise comme référence, en raison de l'absence de période de sécheresse. La campagne de grande sécheresse de 1995, a enregistré une progression de la pluviométrie décennale pour la même période de 7mm par décennie, soit une quantité trois fois moindre.

Le volume total de la pluviométrie durant la campagne 2002-2003 a été le double de celui de 1994-1995, mais l'accroissement moyen par décennie a été trois fois plus élevé durant la période de croissance active du blé, qui s'est répercuté sur la productivité par un facteur de trois aussi. Les rendements du blé tendre, blé dur et orge ont été trois fois plus élevés en 2002-2003 qu'en 1994-1995.

### Sécheresse et productivité

Les trois phases de croissance (lente, active et stagnante) correspondent aux périodes "levée - tallage", "montaison - épiaison" et "floraison - maturité", respectivement. Toujours dans la région de Meknès, la première phase, la première phase se réalise durant les mois de décembre et janvier, la deuxième durant les mois de février et mars, et la dernière durant

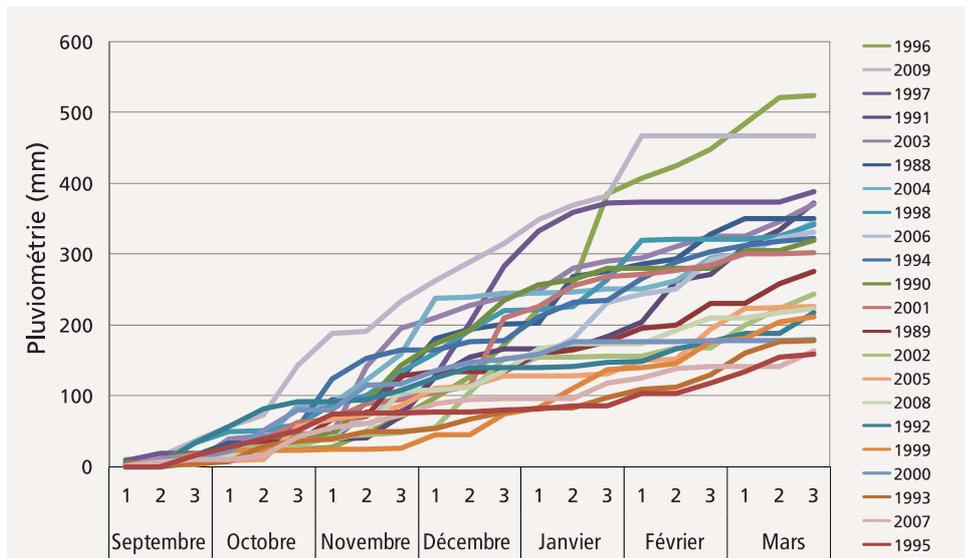


Figure 5: Cumul de pluviométrie décennale nationale pour 22 campagnes agricoles (de 1988 à 2009).



les mois d'avril et mai. Les températures de novembre et décembre sont relativement basses, celles de février et mars sont en hausse et celles d'avril et mai sont relativement élevées. Compte tenu des températures basses durant la première phase et le niveau de matière sèche faible, la demande en eau par la culture et par l'atmosphère est relativement basse. Pour la deuxième phase, la température augmente, la matière sèche aussi jusqu'à atteindre le maximum, la demande aussi bien atmosphérique que la demande en eau de la plante sont élevées. Pour la dernière phase, la demande atmosphérique est élevée en raison des hautes températures, ce qui est demandé pour le remplissage des grains et le dessèchement de la plante.

La sécheresse peut être évaluée de façon qualitative, par son absence ou sa présence au cours des phases importantes des cultures céréalières au cours de l'année. La présence ou l'absence de la sécheresse se dégage de la courbe de cumul pluviométrique. La courbe peut être subdivisée en trois phases: si dans une phase la courbe est ascendante cela indique qu'il n'y a pas eu de sécheresse et si elle est horizontale c'est qu'il y a eu sécheresse.

Cette méthode a permis d'apprécier l'importance de chaque type de sécheresse au Maroc. C'est ainsi qu'on a pu déterminer sur une période de 10 ans, pour le blé tendre dans la région de Meknès, que la sécheresse du milieu du cycle est responsable de 60% des pertes totales de rendement, que celle du début de cycle est responsable de 25% des pertes et que celle de fin de cycle est responsable de 15% des pertes, et que les effets de deux sécheresses successives au cours du cycle s'additionnent.

## La prévision des rendements céréaliers

La corrélation entre le rendement et la pluviométrie mensuelle, révèle une association significative au mois de novembre, suivie de celle de juin et puis février, mars et janvier. Cependant, ces corrélations peuvent cacher l'effet confondu de la pluviométrie des mois précédents. Pour éviter cette colinéarité entre variables prédictives, une régression linéaire multiple avec sélection de variable par la méthode "pas à pas" peut être utilisée. La régression multiple a permis de mettre en évidence l'importance de la pluviométrie du mois de novembre, suivie de celle des mois de janvier, février et mars. Pour la région du Loukkos, par exemple, le rendement du blé tendre a été expliqué par la pluviométrie d'octobre à novembre ( $P_{ON}$ ) à 52% et par celle de février ( $P_F$ ) à 64%, avec une efficacité d'utilisation de l'eau de pluie plus importante en février (6,5 kg/mm) qu'en octobre-novembre (5,2 kg/mm).

$$\text{Rendement (Kg/ha)} = 900 + 5,2 P_{ON} + 6,5 P_F$$

En moyenne, on peut espérer 200mm de pluie en octobre et novembre et 50mm en février au Loukkos. Plus de précision est donnée par la pluviométrie décadaire, qui confirme l'importance de la pluie de février, et montre que c'est la pluviométrie de la deuxième décennie de novembre, et non celle de tout le mois qui influence le rendement.

$$\text{Rendement (Kg/ha)} = 900 + 6,5 P_{0123N2} + 7,9 P_{F123}$$

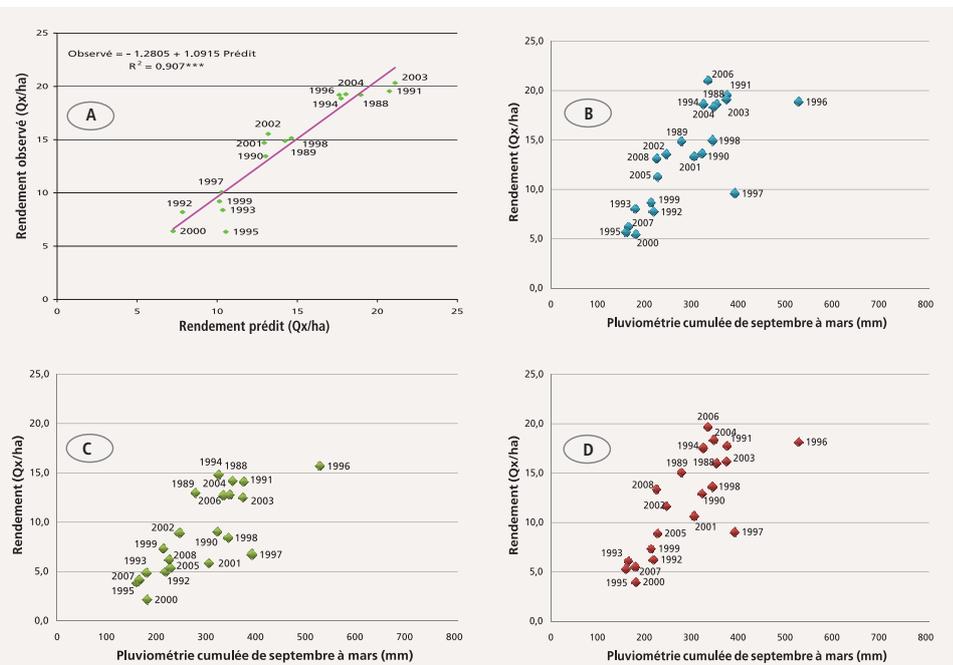


Figure 6: (A) Prévision des rendements nationaux à partir de la pluviométrie décadaire et évolution du rendement national du (B) blé tendre, (C) orge et (D) blé dur en fonction de la pluviométrie cumulée entre début septembre et fin mars.



La même approche, utilisant la régression linéaire multiple, peut être utilisée à l'échelle nationale en utilisant la pluviométrie décadaire pour prévoir les rendements céréaliers. Une approche empirique plus simple, et tout aussi efficace, peut être utilisée pour prédire le rendement des céréales à l'échelle nationale à partir de la pluviométrie nationale moyenne. Lorsque l'on corrèle les rendements des trois espèces avec les cumulés décennaux de pluviométrie, depuis le début de septembre jusqu'à fin mai, on constate des corrélations significatives dès la troisième décennie de novembre et des corrélations élevées à partir de fin février avec un pic de corrélation à fin mars. La chute de corrélation en janvier est probablement due à la baisse des températures qui ne permet pas de valoriser l'eau de pluie.

Il est donc possible de prévoir facilement, tôt dans la saison, les rendements céréaliers à l'échelle du pays à partir de la pluviométrie décadaire cumulée (moyenne nationale). Si l'on régresse le rendement national des différentes espèces céréalières (blé tendre, blé dur et orge) sur la pluviométrie nationale cumulée entre les mois de septembre et mars (Figure 6 B, C et D), on constate qu'il y a une relation linéaire et positive, jusqu'à un niveau de pluviométrie d'environ 400mm. Les campagnes pluvieuses, dont la pluviométrie dépasse 400mm par an, sont rares et non valorisées. Au dessus des 400mm, comme cela a été le

cas en 1995-1996, le rendement national a tendance à plafonner. La campagne agricole 1996-1997 est particulière car la pluviométrie a été tardive, survenue après le mois de mars. En dessous de 400 mm, le rendement peut être prédit sur la base du cumul pluviométrique annuel de la période de septembre à mars, avec des coefficients de détermination élevés de 87%, 80% et 72%, respectivement pour le blé tendre, le blé dur et l'orge.

A l'échelle nationale, au-delà de 400mm de pluies, cumulées de septembre à fin mars, le rendement n'augmente plus. A fin février, le rendement n'augmente plus au-delà de 330mm de pluies cumulées. Le coefficient de détermination, de la relation qui existe entre le rendement et pluviométrie cumulée de septembre à fin février (sans les années 1995-1996 et 1996-1997), est de 75%, 70% et 58%, respectivement pour le blé tendre, le blé dur et l'orge.

Au Maroc, les données pluviométriques ne sont disponibles qu'à partir d'une quarantaine de stations météorologiques pour plus de cinq millions d'hectares cultivés. Il est évident que le réseau de stations synoptiques marocain est dilué et, de plus, mal distribué pour représenter les divers ensembles agro-écologiques. Aussi, de nouvelles approches ont été adoptées, particulièrement celles impliquant l'utilisation de la télédétection spatiale et, particulièrement, l'index de la végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI). Le NDVI est particulièrement

adapté aux zones arides et semi-arides dans lesquelles la variation de végétation est très bien capturée par le NDVI. Les données de NDVI peuvent être disponibles à une résolution spatiale de 1 km<sup>2</sup>, et même inférieure, sur l'ensemble du territoire national.

## Actions pour réduire la vulnérabilité des cultures

La quantité de pluie mesurée à la surface du sol ne profite pas en totalité à la culture (Figure 7). Une partie est évaporée juste après sa chute, une autre est perdue par ruissellement, et une autre s'infiltré dans le sol. La partie infiltrée se déplace soit latéralement, soit verticalement en profondeur (drainée) soit évaporée vers l'atmosphère. La partie de l'eau de pluie qui reste stockée dans le sol à différentes profondeurs est celle qui sert potentiellement à alimenter la culture, à condition que celle-ci soit capable d'explorer les horizons du sol par ses racines. Ajouté à cela, les plantes adventices, transpirent par leurs organes aériens l'eau absorbée au niveau des racines. C'est donc l'eau réellement transpirée par la culture qui profite à la plante cultivée.

Toute gestion du risque de sécheresse agricole repose sur l'équilibre atmosphère-plante-sol (Figure 7). Les techniques qui permettent d'améliorer le stock d'eau dans le sol, de conserver le plus longtemps possible l'eau dans le sol, de la mettre à la disposition de la culture hors de portée de parasites, et de mieux utiliser cette eau, en plaçant adéquatement le cycle de la culture et en utilisant les variétés efficaces en utilisation de l'eau, sont de mesures de réduire la vulnérabilité à la sécheresse.

Dans la figure 7, quatre mesures sont mentionnées pour réduire la vulnérabilité des cultures à la sécheresse. Parmi ces mesures, trois sont d'ordre génétique comme le développement du système racinaire, la résistance aux maladies et aux hautes températures et la résistance au stress hydrique. Les maladies et parasites peuvent être contrôlés par des mesures chimiques ou culturales. L'irrigation d'appoint permet d'améliorer le stock d'eau dans le sol, et de ce fait devrait figurer parmi les actions de réduire la vulnérabilité des sols, mais elle permet aussi à la plante de survivre à un moment difficile pour en attendant que la pluie revienne.

En modifiant la variété de blé tendre "Marchouch", en lui conférant une résistance génétique à la mouche de Hesse, un gain important de rendement a été réalisé. Dans les conditions de forte infestation, par la mouche au stade plantule, le gain a été de 30%, soit 7 quintaux à l'hectare de plus que la variété sensible. Sous des conditions où l'eau n'as pas été un facteur limitant, le gain a été plus important, pouvant atteindre 140% en cas de haute infestation par l'insecte.

La tolérance à la sécheresse du blé tendre a été améliorée de 78 kg/an durant les trois dernières décennies, en agissant en premier lieu (avant 1995) sur la longueur du cycle pour échapper à la sécheresse de fin de cycle, puis en deuxième lieu (après 1995) sur le système racinaire et la conservation de l'eau sous stress hydrique, en deuxième.

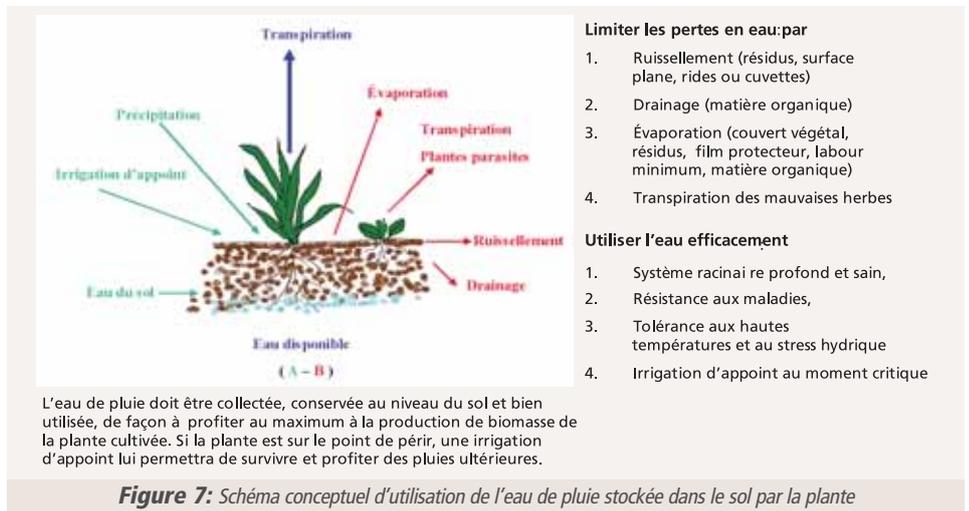


Figure 7: Schéma conceptuel d'utilisation de l'eau de pluie stockée dans le sol par la plante

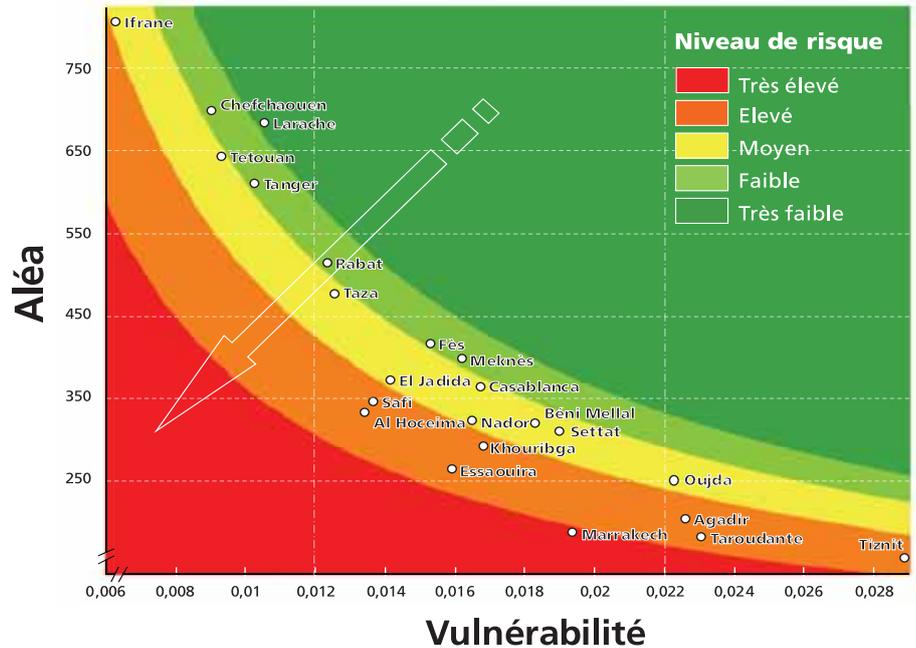


Figure 8: Vulnérabilité des terres, exprimée par le ratio de l'indice de végétation (NDVI) sur la pluviométrie de la saison. Les régions de production de blé tendre sont affichées par classe de risque croissant dans le sens de la flèche.

## Vulnérabilité des terres

La vulnérabilité des terres vis-à-vis de la sécheresse pour la production céréalière est une notion qui commence juste à être prise en compte au Maroc. Or, l'ampleur du risque de sécheresse sur les rendements à l'échelle d'une grande région dépend de la vulnérabilité de terres. Si le risque de sécheresse au niveau des provinces est mesurable par l'effet sur la production ou sur le rendement de la province, il n'en est pas de même pour la vulnérabilité. Aussi, une méthode a été développée à l'INRA et utilise le rapport NDVI/pluviométrie pour mesurer la vulnérabilité des terres. Ce rapport reste stable quelque soit la campagne, exprimant des caractéristiques intrinsèques des terres, indépendamment des fluctuations climatiques.

Les risques de sécheresse sur le rendement national du blé tendre ont pu être évalués, sur la base de la pluviométrie et de la vulnérabilité, selon l'équation:

$$\text{Rendement} = 0,213 \times \text{Vulnérabilité}^2 \times \text{Pluviométrie}^2$$

où vulnérabilité = NDVI/Pluviométrie.

Des courbes de iso-risque peuvent être ainsi délimitées, par l'affichage des deux variables (Pluviométrie et Vulnérabilité) sur un même graphe (Figure 8), permettant de classer les

provinces selon leur niveau de risque. Ainsi, la province de Larache est celle qui présente le moins de risque de sécheresse pour la production des céréales, suivie de celles de Chefchaouen, Tanger, Rabat, Fès, Meknès, qui sont à faible risque, puis de Tetouan, Taza, Casablanca, El Jadida, Beni Mellal, Settat, Nador, Oujda, à risque moyen, et de Safi, Al Hoceima, Khouribga, Essaouira, Agadir, Taroudant, Tiznit, à haut risque, et de Marrakech à risque maximal.

## Changement climatique

Le changement climatique n'est actuellement plus mis en doute, incitant les pouvoirs publics et les chercheurs à se poser des questions sur les mesures à prendre pour s'y adapter. Selon tous les scénarios climatiques, une diminution de la pluviométrie et une augmentation de la température, sont prévues jusqu'à la fin du siècle au Maroc, ce qui entraînera des pertes de rendements considérables, compensées jusqu'à 2030 par la lancée actuelle du progrès génétique. Au-delà, les rendements risquent de baisser dramatiquement, si rien n'est entrepris dès à présent pour contrecarrer cette tendance ■.

**Dr. Jlibene Mohamed et Dr. Balaghi Riad**  
Institut National de la Recherche Agronomique, Maroc