

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université de Ferhat Abbas –Sétif

MEMOIRE

Présenté à la faculté des Sciences
Département d'Agronomie
Pour l'obtention du Diplôme de :

MAGISTER

Spécialité : Agriculture et Développement Durable
Option : Production végétale

Par : ROUABHI Amar

Thème

**Efficacité d'utilisation de l'eau
et sélection de variétés de blé dur
sous les conditions du climat semi aride**

Soutenu le : 12-03-2008

Devant le jury :

Président :	Bouzerzour. H	Prof Université Ferhat Abbas Sétif
Encadreur :	Hafsi. M	M.C Université Ferhat Abbas Sétif
Examineur :	Fenni. M	M.C Université Ferhat Abbas Sétif
Examineur :	Laouar. H	M.C Université Ferhat Abbas Sétif

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements pour Monsieur Hafsi Miloud, Maître de conférences à l'Université de Sétif et encadreur de ce mémoire, pour la confiance et la liberté qu'il m'a accordée, pour avoir partagé son savoir, pour ses critiques et pour ses encouragements.

Je remercie également Monsieur Bouzerzour Hemena, Professeur à l'Université de Sétif qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette soutenance.

Je tiens aussi à remercier messieurs Fenni Mohamed Maître de conférences à l'Université de Sétif et Laouer Hocine Maître de conférences à l'Université de Sétif également, d'avoir accepté d'évaluer ce travail et de faire part du jury.

Egalement, un grand nombre de personnes ont participé de manière directe ou indirecte à l'élaboration de ce travail, je tiens à les remercier de tout cœur, tous sans oublier personne :

- Les membres de ma famille
- Les étudiants de fin de cycle du département d'agronomie
- Les membres de l'EAC Kerbab Rabie (Ain Abessa)

DEDICACE

LA MEMOIRE DE MA CHERE REGRETEE "MA"

TABLE DE MATIERES

Remerciement

Résumé

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

1- CHAPITRE 1. LE BLE : CULTURE, ENJEU ET PERSPECTIVES

1-1 Origine et historique de la culture de blé.....	3
1-2 Changements climatiques et tendances de la sécheresse	5
1-3 Le blé transgénique.....	6
1-4 Durabilité et organismes génétiquement modifiés (OGM).....	8

CHAPITRE 2. CONDITIONS DE CULTURES ET ADAPTATIONS

2-1 Climat méditerranéen	9
2-2 Notions de sécheresse.....	10
2-3 Adaptations aux conditions de stress.....	11
2-3-1 Adaptation morphologique.....	11
a les racines.	
b les feuilles.	
2-3-2 Adaptation biochimique.....	12
2-3-3 Adaptation phénologique.....	13
2-4 Critères de sélection en zones semi arides	13
2-5 Notions relatives à l'état hydrique du sol	14
2-6 Etat hydrique de la plante.....	16

CHAPITRE 3. EFFICACITE D'UTILISATION DE L'EAU ET CRITERES ISOTOPIQUES

3-1 Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE).....	17
3-1-1 Efficacité d'utilisation de l'eau intrinsèque (EUE _i).....	19
3-2 Discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$).....	21

3-2-1 Rapport ou ratio isotopique (R).....	22
3-2-2 Effet isotopique (α).....	22
3-2-3 Composition isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$).....	22
3-3 Efficacité de l'utilisation de l'eau en relation avec la discrimination isotopique du carbone.....	24
3-4 Efficacité de l'utilisation de l'eau en relation avec le Stress hydrique.....	26
3-5 Efficacité de l'utilisation de l'eau en relation avec la différence de vapeur d'eau entre l'air et la feuille.....	26
3-6 Efficacité de l'utilisation de l'eau en relation avec la Concentration du CO_2	27

CHAPITRE 4. IMPORTANCE DE LA MODELISATION ET SES PERSPECTIVES

4-1 Problématique et opportunité de l'étude	28
4-2 Modèles de culture et leurs Structures.....	29
4-2-1 Modèles de culture.	29
4-2-2 Structures des modèles de culture.....	30
4-3 Domaines d'utilisation des modèles de culture.....	31

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE 5. MATERIEL ET METHODES

5-1 Le site expérimental.....	32
5-2 Matériel Végétal et outils de simulation et d'analyse.....	32
5-2-1 Matériel végétal.....	32
5-2-2 Dispositif expérimental.....	32
5-2-3 Outil d'analyse statistique.....	33
5-3 Le logiciel « <i>Budget</i> ».....	33
5-3-1 paramétrage optimal du logiciel.....	33
5-3-2 Le climat.	33
5-3-3 le sol.....	34
5-3-4 la culture.....	34
5-4 Mesures et notations effectuées.....	35

5-4-1 Paramètres climatiques.	35
5-4-1-1 Température et pluviométrie.....	35
5-4-1-2 Humidité du sol.....	35
5-4-2 Notations et mesures des composantes.....	35
5-4-2-1 Levée et épiaison.	35
5-4-2-2 Chlorophylle.	35
5-4-2-3 Surface et poids spécifique de la feuille drapeau.....	36
5-4-2-4 Hauteur de la paille.....	36
5-4-2-5 Remplissage du grain.....	36
5-4-2-6 Récolte.....	36
5-4-2-7 Critères isotopiques du carbone.....	37

CHAPITRE 6. RESULTATS ET DISCUSSION

6-1 RESULTATS	38
6-1-1 Températures.	38
6-1-2 la pluviométrie.	38
6-1-3 Humidité du sol.....	41
6-1-4 Levée.....	42
6-1-5 Epiaison.....	42
6-1-6 Teneur en chlorophylle	43
6-1-7 La hauteur de la paille.....	44
6-2 DISCUSSION	45
6-2-1 Rendement grain.....	45
6-2-1-1 Rendement grain et précocité.....	45
6-2-1-2 Fertilité.....	47
6-2-1-3 Poids de mille grains (PMG).....	47
6-2-1-4 Nombre d'épi par m ²	48
6-2-1-5 Indice de récolte.....	48
6-2-2 Discrimination isotopique du carbone.....	49
6-2-3 Surface foliaire.	50
6-2-4 Poids spécifique de la feuille (PSF).....	51

6-2-5 Hauteur de la paille.....	51
6-2-6 Vitesse de remplissage de grain.....	52
6-2-7 Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE).....	55
6-3 Simulation par le modèle de culture « <i>Budget</i> ».....	57
6-3-1 Comparaisons entre données calculées et simulées.	58
6-3-1-1 Humidité du sol	58
6-3-1-2 Prédiction des stades phénologiques.....	59
6-3-1-3 la période de stress hydrique.	59
CONCLUSION.....	64

Liste des abréviations

Annexes

Liste des références bibliographiques

ملخص

إن تحسين فعالية استعمال الماء من طرف النبات يعد من بين الإستراتيجيات المثلى لمواجهة الجفاف في ظروف الزراعات البعلية, العديد من الدراسات أثبتت أن عملية انتخاب الأصناف بالاعتماد على فعالية استعمال الماء تؤدي إلى تحسين المردودية. إن الأهداف الرئيسية في المناطق الشبه الجافة تتمثل في الوصول الى فعالية قصوى لاستعمال الماء بتحسين مردودية المادة الحية في وحدة الماء المستعملة و تحويلها إلى محصول اقتصادي تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مجموعة من أصناف القمح الصلب قد تمت دراسة سلوكها من قبل و علاقته بالتمايز النضائري للكربون , لكن دون متابعة للمحتوى المائي للتربة. في هذا العمل نقوم لأول مرة باستخدام نموذج محاصيل "بيدجت" , هذا الأخير تمت معايرته و تجربته في ظروف مناخية متوسطة مشابهة للمناخ المحلي (تونس). إن استخدام مثل هذه الآليات للمحاكاة يساعد على فهم سلوك النبات في الظروف الجافة و على معرفة فترات الإجهاد المائي بالتحديد, و تأثيرها على مردودية المحاصيل. إن استعمال هذا النموذج مكن من حساب بعض العوامل المناخية مثل النتح و التبخر و كذلك تم تقدير تأثير الإجهاد المائي على المردود. و قد أتاحت المعاملات و الثوابت الحسابية الخاصة بالمناخ المقدمة من طرف النموذج, سهولة تحليل و محاكاة الديناميكية المائية للتربة و علاقتها بمراحل النمو.

RESUME

L'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) reste parmi les stratégies les plus appropriées pour faire face aux intermittences de sécheresse en condition de culture pluviale. Divers travaux ont montré que la sélection sur la base de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) a conduit à une amélioration du rendement.

Maximiser l'efficience de l'utilisation de l'eau du sol, accroître la productivité de la biomasse par unité d'eau utilisée et améliorer la conversion de la biomasse végétative en rendement économique sont les objectifs recherchés en zones semi-arides

Notre étude a pour objectif, l'évaluation d'une collection de variétés de blé dur ayant fait l'objet d'une étude de comportement en relation avec le critère isotopique mais sans le contrôle hydrique du sol. Le présent travail présente une première utilisation du modèle "*Budget*" en relation avec le critère de discrimination du carbone isotopique. Ce modèle de culture utilisé dans notre cas a été testé et validé auparavant en zone méditerranéenne (Tunis). L'utilisation de ce type d'outil de simulation pourra améliorer la compréhension du comportement variétal en conditions de contrainte hydrique et aider à déterminer les phases de stress avec exactitude et leur impact sur le potentiel de production.

L'utilisation de ce modèle de culture a permis de déterminer des paramètres climatiques tels que l'évapotranspiration et la transpiration de la culture. Le modèle a également permis d'estimer l'impact du stress sur la diminution du rendement. Le calcul des différents coefficients et ratio utilisés par le modèle, confère une souplesse d'analyse, tel que le facteur de stress, la simulation de la dynamique de l'état hydrique du sol relativement à différents stades phénologiques.

INTRODUCTION

L'impact grandissant de la croissance rapide de la population mondiale génère des besoins en ressources hydriques et alimentaires de plus en plus importants. La gestion des ressources hydriques en agriculture sur le plan local et universel prend de plus en plus de l'importance en raison des changements climatiques universels. En effet, l'accroissement du taux de CO₂, la compétition des secteurs économiques sur les ressources naturelles, la réduction des terres cultivées (Smith, 2000 ; Rijsberman, 2004) et l'extension de l'amplitude de la sécheresse sur les régions à potentiel agricole sont autant de préoccupations.

En ce sens, la durabilité a été introduite en tant que concept de protection des équilibres naturels (Pretty *et al.*, 2003). En effet, le génotype, les pratiques culturales et les conditions environnementales interagissent pour déterminer le rendement d'une culture (El Hani *et al.*, 2007). Le stress hydrique est l'un des facteurs majeurs de limitation du rendement en zones méditerranéennes (Bennet *et al.*, 1998), surtout en conditions pluviales (Loss and Siddique, 1994; Royo *et al.*, 1998).

La sélection pour la tolérance à la sécheresse, la productivité de la biomasse et l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) sont considérées comme des caractères agronomiques (Blum, 1993). En effet, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) des cultivars à potentiel élevé de croissance et de rendement en condition de stress hydrique revêt un intérêt croissant (Boyer, 1996 ; Ehdaie, 1995).

Dans ce contexte, les techniques de la discrimination isotopique du carbone ont pu être un moyen potentiel dans les programmes de sélection et d'identification des cultivars tolérant la sécheresse. L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) reste parmi les stratégies les plus appropriées pour faire face aux intermittences de sécheresse en conditions de culture pluviale. Divers travaux ont montré que la sélection sur la base de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) a conduit à une amélioration du rendement (Wright *et al.*, 1994 ; Condon *et al.*, 2002; Rebetzke *et al.*, 2002).

Maximiser l'efficience de l'utilisation de l'eau du sol, accroître la productivité de la biomasse par unité d'eau utilisée et améliorer la conversion de la biomasse végétative en rendement économique sont les objectifs recherchés en zones semi-arides (Krishnamurthy *et al.*, 2007).

Les modèles de simulation de la croissance qui ont été développés depuis une trentaine d'années, offrent un cadre conceptuel pour étudier les interactions dynamiques entre la plante, le sol, le climat et les techniques culturales à l'échelle parcellaire. L'essentiel des efforts de modélisation jusqu'à maintenant a porté sur les grandes cultures (Brisson *et al.*, 1998 ; 2002).

L'utilisation des modèles de simulation de croissance pour différentes conditions de culture peut prédire le rendement (Hartkamp *et al.*, 2002; Brisson *et al.*, 2003; Stöckle *et al.*, 2003; Van Ittersum *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2003; Ziaei and Sepaskhah, 2003; Yang *et al.*, 2004). En plus de la prédiction du rendement, ces types de modèles sont capables de simuler la croissance végétale sur la base de l'introduction de larges séries de données empiriques. L'application de ces modèles est conditionnée par la calibration et la validation dans le site d'application.

Notre étude a pour objectif, l'évaluation d'une collection de variétés de blé dur ayant fait l'objet d'une étude de comportement en relation avec le critère isotopique mais sans le contrôle hydrique du sol. Le présent travail présente une première utilisation du modèle "*Budget*". Ce modèle de culture utilisé dans notre cas a été testé et validé auparavant en zone méditerranéenne (Tunis). L'utilisation de ce type d'outil de simulation pourra améliorer la compréhension du comportement variétal en conditions de contrainte hydrique et aider à déterminer les phases de stress avec exactitude et leur impact sur le potentiel de production.

PREMIERE PARTIE
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1. LE BLE : CULTURE, ENJEU ET PERSPECTIVES

1-1 Origine et historique de la culture de blé

Le blé constitue l'aliment de base pour un tiers de la population mondiale, il occupe avec le riz une place très importante dans l'alimentation humaine.

Le lieu d'origine du blé (*Triticum spp*, Poacées) est très controversé, en fait, le développement et le progrès de la civilisation humaine sont liés à l'histoire du blé. L'ancêtre commun de toutes les variétés de blé serait l'engrain sauvage (*Triticum monococcum*) retrouvé dans des ruines en Mésopotamie et en Asie du Sud-Ouest.

On croit que l'être humain utilisait le blé comme aliment il y a plus de 12 000 ans; des tombeaux le long du Nil renferment des murales datant de 5 000 ans avant notre ère.

Jusqu'à nos jours, le blé est considéré comme une culture sacrée dans certaines régions de Chine. Il a aussi revêtu une signification religieuse et fut l'objet de cultes primitifs; les Grecs et les Romains ont des divinités du blé et du pain.

Christophe Colomb introduisit le blé au Nouveau Monde lors de son deuxième voyage en 1493. Quatre siècles plus tard, des immigrants russes établis au Kansas (à la fin du XIXe siècle) apportèrent avec eux un blé rouge supérieur aux variétés cultivées jusque-là, le turkey red et c'est à ce type de blé que l'industrie céréalière américaine doit son importance. Il existe aujourd'hui plus de 20000 variétés de blé au niveau mondial (Canadas, 2006).

Les plus grands pays producteurs de blé sont :

La Chine (91 330 265 tonnes), l'Inde (72 060 000 tonnes), les Etats-Unis (58 881 368 tonnes), la Russie, la France et le Canada (Anonyme, 2007). Il existe plusieurs blés, dont deux ont une importance économique réelle à l'heure actuelle :

- Le blé dur (*Triticum turgidum ssp durum*) est surtout cultivé dans les zones chaudes et sèches, il est très riche en gluten, sa teneur en protéines est plus élevée que le blé tendre; Il est utilisé pour produire les semoules et les pâtes alimentaires ;

- Le blé tendre, ou froment, (*Triticum aestivum*) est davantage cultivé dans les hautes latitudes. Il est cultivé pour faire de la farine panifiable utilisée pour le pain.

La taille de la plante varie entre 60 cm et 1,2 m de hauteur, selon les variétés, le degré d'humidité, la fertilité du sol et le temps d'ensoleillement. Elle développe des épis

formés de groupes de fleurs (épillets) comportant chacun de 3 à 5 fleurs. Après la fécondation, la fleur qui reste fermée à maturité développe un grain (caryopse) de forme ovale, orné d'un profond sillon longitudinal. L'extrémité supérieure porte de petits poils et l'extrémité inférieure porte l'embryon, qui donnera éventuellement naissance à une nouvelle plante qui peut produire jusqu'à une cinquantaine de grains. Le grain varie de taille, de forme et de couleur, selon les variétés (Anonyme 2007c)

L'amélioration des techniques culturales, la sélection génétique et l'amélioration variétale ont conduit à un accroissement considérable du rendement grain à l'échelle mondiale, passant de moins de 10 q/ha en 1900 à plus de 25 q/ha en 1990. Les rendements des pays de l'Amérique du Sud demeurent stables avec 20 q/ha, et d'Afrique et du Proche-Orient avec 10 q. L'Égypte et l'Arabie saoudite ont atteint en culture irriguée des rendements de l'ordre de 35 à 40 q. En Europe, des rendements très élevés sont obtenus en culture intensive. Le rendement moyen est passé de 30 à 60 q/ha durant les 30 dernières années, soit une progression moyenne d'un quintal/ha/an. L'augmentation du niveau de rendement et des surfaces cultivées a ainsi conduit à un fort accroissement de la production, qui atteignait 275 millions de tonnes en 1965 et 600 en 1998. Le blé est également la première céréale du point de vue des échanges commerciaux (45 % des échanges totaux en 1998).

En Algérie, selon Badrani (2006), le rendement moyen des céréales en 2004 représente presque 200% du rendement moyen des années 1991-2000. Selon le même rapport en 2004 les céréales ont enregistré un taux de croissance négative de moins 6% par rapport à 2003 ; ceci est expliqué en grande partie par les fluctuations interannuelles des précipitations.

La polyploïdie est commune chez le blé, cependant, tous les blés ne sont pas polyplôïdes, il existe par exemple deux blés diploïdes, *Triticum urartu* et *Triticum boeoticum*. Les cellules des blés diploïdes contiennent deux jeux de sept chromosomes.

Des études ultérieures de cytogénétique mirent en évidence que les différents blés formaient une série allopolyploïde avec $X = 7$ (Feldman *et al.*, 1995).

Les blés polyplôïdes sont tétraploïdes ($2n = 4x = 28$), ou hexaploïdes ($2n = 6x = 42$). Les blés sauvages tétraploïdes sont l'engrain sauvage et *Triticum*. L'engrain sauvage est l'ancêtre de tous les blés tétraploïdes domestiqués, Cette découverte des progéniteurs

sauvages de l'engrain et de l'amidonnié aboutit à la première classification naturelle des blés, bien vite renforcée par les premiers travaux en cytogénétique (Sakamura, 1918 in anonyme (2007a)) qui aboutirent à la détermination des nombres chromosomiques des différents blés.

La polyploïdie est importante pour la classification du blé pour trois raisons :

- les blés partageant le même niveau de ploïdie seront plus étroitement apparentés entre eux.
- le niveau de ploïdie influence certaines caractéristiques de la plante ; ainsi un plus haut niveau de ploïdie tend à être lié à une taille de cellule supérieure.
- la polyploïdie apporte de nouveaux génomes dans une espèce. Par exemple, *Aegilops tauschii* a apporté le génome D chez les blés hexaploïdes, leur conférant une plus grande résistance au froid et certaines caractéristiques morphologiques distinctes.

1-2 Changements climatiques et tendance de la sécheresse

Aujourd'hui l'activité industrielle affecte significativement la planète et son fonctionnement, le dioxyde de carbone et la température moyenne globale ont tendance à croître (Jonny *et al.*, 2005)

Actuellement, quelques statistiques annoncent qu'environ deux milliards de personnes à travers le monde souffrent de manque d'eau et les changements du climat s'accroîtront durant les décennies futures. Thomas *et al.*, (2004) dans la revue *Nature* estime que le quart des espèces vivantes disparaîtront d'ici un demi siècle sous l'effet du réchauffement du globe.

Le niveau de la mer a crû d'environ 10-25 cm par rapport aux cent ans passés (Nicholls *et al.*, 1996). Beaucoup de travaux sur la sécheresse ont vu le jour depuis les années soixante dix à travers le monde (Dai *et al.*, 1998), cependant le même auteur avait souligné une légère augmentation de la pluviométrie globale moyenne durant cette période. La sécheresse s'étend sur plusieurs millions d'hectares à travers le monde. Elle est définie selon Cooper *et al.*, (2006) comme un manque d'eau dans l'environnement de la culture qui a le pouvoir de réduire son rendement . Quand ce déficit intervient avant l'accomplissement de la croissance de la culture, il peut réduire son développement.

L'impact négatif de la sécheresse dépend essentiellement du stade végétatif, de la durée et de l'intensité du stress.

Selon McKay, (1985) *in* Boostma *et al.*, (1996) la sécheresse est un déficit marqué qui réduit significativement les rendements agricoles par rapport à la normale pour une région de grande étendue ; alors que Cruisat, 1980 *in* Casals, (1996) considère qu'une plante est en situation hydrique limitante quand son évapotranspiration réelle est inférieure à l'évapotranspiration maximale.

Le problème fondamental de la sélection pour la tolérance à la sécheresse présente deux facettes : i) premièrement, la complexité du phénomène de stress hydrique rend difficile la définition de l'idiotype pour la tolérance à la sécheresse (Ribaut *et al.*, 2004) , ii) deuxièmement, en condition de bas potentiel hydrique ,les réponses des plantes sont complexes et dépendantes des stades de développement. Jusqu'à maintenant, les mécanismes de tolérance à la sécheresse restent non cernés (Bartels and Sunkar, 2005).

1-3 Le Blé transgénique

Depuis plusieurs décennies, le développement des connaissances en biologie, tant au niveau cellulaire qu'au niveau moléculaire ont donné naissance aux biotechnologies modernes, sources de progrès et d'innovations. Le champ révolutionnaire dans la recherche agricole est celui du développement du génie génétique appelé aussi culture transgénique (Daniel *et al.*, 2000)

La culture et la sélection empirique du blé par l'homme de la préhistoire entre 6 000 et 5 000 ans avant J-C ont abouti à la différenciation du blé dur et du blé tendre (Anonyme, 2007b). Les efforts conjugués entre la biologie cellulaire et moléculaire ont permis de modifier l'information génétique en introduisant de nouveaux gènes ou QTL (*Quantitative trait loci*). L'introduction des plantes transgéniques en agriculture vise à améliorer les conditions de culture ou à créer de nouvelles variétés végétales tolérantes aux contraintes environnementales.

La création de nouvelles variétés pour les agriculteurs doit tenir compte des critères suivants :

- une meilleure résistance aux pathogènes (virus, insectes, ...),
- une plus grande tolérance aux stress.

- une meilleure adaptation aux différents types de sols.
- une utilisation limitée d'intrants.
- une bonne productivité.
- une meilleure qualité nutritionnelle. (Anonyme, 2007b)

Ainsi, pour répondre à toutes ces nouvelles exigences, la sélection dispose actuellement de nouveaux outils, comme la biotechnologie.

En effet, les biotechnologies ouvrent de nouvelles perspectives en matière d'amélioration des plantes, sur le plan quantitatif et qualitatif et contribuent notamment à l'optimisation de la gestion agronomique par :

- La tolérance aux mauvaises herbes
- La résistance aux ravageurs
- La résistance aux virus
- La tolérance à la sécheresse et aux basses températures
- La stérilité mâle

La population mondiale est passée à plus de six milliards d'habitants (Reid, 1998), dont 842 millions de personnes souffrent de sous-alimentation (FAO, 2005). Elle continue de croître durant le vingt et unième siècle et probablement elle dépassera les dix milliards d'habitants avant 2050 (Muray, 2003) à cause de l'amélioration des conditions de vie et la recrudescence de la mortalité par rapport à la natalité.

Globalement, en 1998 il y'avait cinq nouveaux nés contre deux décès (Reid, 1998).La question qui se pose aussitôt, c'est comment arriver à nourrir toute cette population grandissante ?

Rosielle (1999) estime que les rendements des terres cultivées actuellement devront augmenter de 75% d'ici l'an 2020 pour répondre aux besoins alimentaires mondiaux. Cependant les compagnies multinationales de l'agroalimentaire revendiquent l'utilisation des Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) comme solution de l'augmentation des rendements, la résistance aux maladies, l'amélioration des qualités nutritives des cultures. Selon Ye *et al.*, (2000) le riz doré, grâce au génie génétique produit du bêta carotène, le précurseur de la vitamine A.

L'utilisation de plantes transgéniques pourrait améliorer la tolérance à la sécheresse (Garg *et al.*, 2002; Dubouzet *et al.*, 2003; Kasukabe *et al.*, 2004; Pellegrineschi *et al.*,

2004). L'avènement des OGM est compris par certains économistes comme une deuxième révolution verte qui fait rappeler les premières productions de variétés naines de blé au CIMMYT.

1-4 Durabilité et Organismes Génétiquement Modifiés (OGM)

La réunion de Montréal du 25 au 28 janvier 2000 sur la biosécurité où les représentants de plus de 130 nations ont tenté de conclure un protocole qui établirait des règles internationales du commerce des organismes génétiquement modifiés (OGM).

Le groupe des principaux producteurs de céréales et de soja OGM (Argentine, Canada, Australie, Chili, Uruguay) soutenu par les Etats-Unis, étaient pour le libre échange des marchandises ; Les pays en développement, au contraire veulent un contrôle plus strict sur le commerce des OGM qui sera soutenu par un protocole. Quant aux pays européens, ils réclament une analyse scientifique des risques liés aux OGM.

Un compromis sous l'égide des Nations Unies devrait en effet respecter les règles du commerce international fixées dans le cadre de l'Organisation Mondiale du Commerce. (OMC), gardienne du libre-échange mais qui ne reconnaît pas le principe de précaution et interdit de bloquer l'importation de produits dont la nocivité n'a pas été prouvée scientifiquement.

Ce protocole a été contesté par une bonne partie des pays surtout en voie de développement. En effet, la FAO reconnaît le potentiel de ces nouvelles technologies mais est également consciente du risque que peut représenter l'éloignement du cadre naturel.

CHAPITRE 2. CONDITIONS DE CULTURES ET ADAPTATIONS

2-1 Climat méditerranéen

Le climat méditerranéen touche une grande partie du globe réparti sur le bassin méditerranéen, le sud de l'Australie, l'Afrique du sud et des parties de l'Amérique du nord et du sud et sur l'ouest asiatique. Il touche environ 50% des cultures de blé touchées par la sécheresse à travers le monde (Rajaram *et al.*, 2005) Les climats de type méditerranéen se caractérisent par un été long, chaud et sec et des hivers courts, doux et humides (Aschmann, 1973). Il est considéré par Simane *et al.*, (1993) de climat traditionnel du blé dur où le stress hydrique est la contrainte principale pour son développement.

La pluviométrie annuelle varie dans cette région de 400 à 800 mm (Loss and Siddique, 1994) et sa distribution est aléatoire durant la saison. Royo (2003) note que la fréquence, la période et la quantité des pluies est largement variable d'une année à l'autre. A titre indicatif, durant la campagne 2006/07, la quantité de pluie enregistrée pendant cinq jours seulement durant le mois de mars était équivalente à la quantité de toute la période précédente de la campagne.

Dans ces conditions, le principal facteur qui limite la productivité des cultures est bien l'eau. Les cultures sont souvent soumises à une sécheresse irrégulière à n'importe quel moment de leur cycle de vie, mais sont dans tous les cas soumises à la sécheresse de fin de cycle surtout pour les cultures tardives.

Dans les régions semi-arides de type méditerranéen, malgré le faible niveau des précipitations (<400mm), les pluies sont efficaces à cause de la faible demande évaporatoire de l'air, mais sont souvent insuffisantes pour couvrir les besoins des cultures vers la fin de leurs cycles. Par contre, dans les régions semi-arides à climat continental ou tropical et subtropical, la saison des pluies est caractérisée par de fortes chaleurs et une plus grande demande évaporatoire de l'air qui fait accélérer l'évapotranspiration (ETP) (Hatfield, 1990).

La majorité des cultures en Algérie sont classées dans l'étage bioclimatique aride à semi-aride. Ces étages sont définis et classés à l'aide d'indices d'aridité climatique. L'indice le plus utilisé est le "quotient pluviothermique" d'Emberger.

L'UNESCO utilise l'indice d'aridité (P/ETP) pour définir les zones arides ($0,03 < P/ETP < 0,20$) et semi-arides ($0,20 < P/ETP < 0,50$).

La FAO a utilisé la période de croissance permise par le climat pour définir les étages bioclimatiques. La période de croissance étant définie par le nombre de jours dans l'année où la pluviométrie est supérieure à la moitié de l'ETP.

2-2 Notions de sécheresse

Selon Parr *et al.*, (1990) les régions arides et semi-arides représentent environ 40% de la surface terrestre. Ces régions sont touchées par la sécheresse qui est considérée comme l'un des principaux facteurs environnementaux limitant le développement des plantes et la productivité de plusieurs récoltes (Araus *et al.*, 2002; Chaves, 2002),

La notion de sécheresse est complexe à définir, et varie souvent selon les champs d'application (météorologie, géographie, production végétale,...). Dans un rapport sur la sécheresse et l'agriculture, Hounam *et al. in* Arnon, (1992) ont recensé plus de 60 définitions concernant la sécheresse.

Lorsqu'on fait le tour de la littérature, il y a une certaine confusion entre la sécheresse climatique, qui est une manifestation périodique et donc prévisible et la sécheresse agronomique qui est un phénomène aléatoire pouvant se produire aussi bien en climat sec qu'en climat humide. La sécheresse agronomique de par son caractère aléatoire est donc la plus redoutable.

La sécheresse peut surprendre les plantes à toutes les étapes de leur développement et ses effets sur la productivité sont fonction de l'intensité et de la distribution temporelle du déficit hydrique. Les zones où la pluviométrie annuelle normale ne permet pas une production végétale économiquement acceptable devraient alors être considérées comme des zones à problèmes d'aridité. (Léifi, 1997), donc on peut dire qu'il y a deux types de problèmes à résoudre dans ces régions :

- i) la productivité agricole est faible comparativement à celle des régions plus humides
- ii) les récoltes dans ces régions sont très instables à cause du caractère aléatoire de la sécheresse agronomique.

2-3 Adaptation aux conditions de stress

Les plantes soumises à la combinaison de ces stress développent différentes adaptations au niveau des organes, allant des réactions moléculaires jusqu'au changements morphologiques et phénologiques.

L'action de la température peut altérer l'activité de la photosynthèse (Wardlaw *et al.*, 1980; Blum, 1986), ces altérations peuvent être accompagnées par des pertes en chlorophylle **a** et **b** dues à la sénescence prématurée des feuilles (Harding *et al.*, 1990)

2-3-1 Adaptation morphologique

a - les racines

Les caractéristiques des racines, telle que la capacité de croître en profondeur et la densité sont associées à la performance du blé sous sécheresse dans beaucoup d'études (Blum, 1988). Cependant, le faible investissement des racines dans les premiers 30 centimètre du sol a été considéré comme un trait adaptatif, lorsque le stress se produit avant la floraison, et est associé apparemment à une stratégie de conservation de l'humidité du sol (Richards, 1991). C'est intéressant de noter qu'aucune étude n'a pu démontrer l'effet des gènes de nanisme sur l'adaptation à la sécheresse ou sur les types d'enracinement, malgré le fait que certaines catégories de hauteur spécifique peuvent être avantagés sur d'autres sous certains environnements de stress hydrique (Richards, 1992).

b- les feuilles

La couverture précoce du sol par le feuillage, la glaucescence de la feuille (Richards, 1996) et son port dressé (Innes and Blackwell, 1983) sont associés à la conservation de l'eau par le végétal.

En effet, certaines espèces sont caractérisées par l'existence de poils épidermiques qui reflètent le rayonnement incident à différents degrés (Ehleringer, 1980). La taille de la feuille en condition de rayonnement fort est réduite en réponse au stress causé par le rayonnement. Ces mêmes plantes produisent de petites feuilles et de grandes feuilles pour créer de l'ombre (Smith, 1978).

Certaines plantes ont la capacité de faire mouvoir leurs feuilles dans le but d'éviter ou de profiter davantage du rayonnement selon leur besoin en eau. Dans des cas

extrêmes, les plantes tournent leurs feuilles afin qu'elles ne créent pas d'ombre (Shake and Hall 1979). Ce mouvement change la température de la feuille ainsi que le gradient de pression de vapeur d'eau entre la feuille et l'atmosphère.

2-3-2 Adaptation biochimique

Probablement, le cas le plus documenté est celui du maintien de la turgescence de la feuille par l'ajustement osmotique (AO). L'avantage de cet ajustement osmotique a été démontré par Morgan et Condon (1986) qui ont utilisé des croisements entre haut "AO" et bas "AO" ; Les descendants ont exprimé des caractéristiques intéressantes de tolérance à la sécheresse telle que l'efficacité d'utilisation de l'eau et la performance de l'enracinement.

L'accumulation de l'acide abscisique (ABA) semble être impliqué dans le déclenchement des enzymes précurseurs de la remobilisation qui a une relation avec la translocation des réserves de la tige vers le grain (Innes *et al.*, 1984).

La tolérance aux températures élevées chez le blé est due à l'enzyme impliqué dans le remplissage, l'amidon synthase soluble (*soluble starch synthase*) qui est désactivé (Keeling *et al.*, 1994). Si la conversion du saccharose en amidon limite le rendement sous stress thermique, cela expliquerait l'observation de niveaux élevés de sucres dans les tissus du blé lorsque le remplissage a été limité par le stress thermique (Spiertz, 1978)

La thermostabilité membranaire joue un rôle important dans la tolérance thermique chez diverses variétés de blé de printemps (Blum and Ebercon, 1981). Shanahan *et al.* (1990) ont obtenu une augmentation significative de rendement de blé en régions chaudes en sélectionnant des lignées ayant une thermostabilité membranaire.

Les protéines du choc thermique sont abondamment synthétisées sous stress thermique, il semble qu'elles ont un rôle protecteur dans la détermination des différences génétiques vis-à-vis de la tolérance au stress thermique. D'autres techniques d'adaptation pouvant intégrer des processus physiologiques sur la totalité ou sur une partie du cycle végétal telle que la discrimination isotopique du carbone qui est basée sur l'affinité de l'enzyme de fixation du carbone (Rubisco) pour le ^{12}C au détriment de ^{13}C .

Comme la concentration du CO_2 intercellulaire chute dans la feuille, le ratio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ chute et permet ainsi moins de discrimination en faveur de ^{12}C . Une faible concentration interne

du CO₂ est associée à une conductance stomatique réduite qui augmenterait l'EUE, si la fixation du CO₂ n'est pas limitée à l'origine par d'autres facteurs (par exemple l'inhibition thermique de la photosynthèse ou autres processus métaboliques). Une faible discrimination isotopique serait associée à une forte EUE.

Quand une caractéristique est assez héritable, sa relation précise avec le rendement sous sécheresse doit être caractérisée (Richards, 1996). Une alternative vraisemblable et bon marché relative à la discrimination isotopique du carbone est celle de l'analyse des cendres (Araus, 1996), basée sur le principe que l'accumulation relative des sels minéraux dans le tissu de la feuille qui est en rapport avec le taux d'évapotranspiration et en rapport inverse avec l'EUE. Le contenu cendré relatif est mesuré après combustion complète du tissu.

Le stress thermique est presque une composante du stress hydrique. Le refroidissement des feuilles par évaporation est un effet de la sécheresse. Néanmoins, les traits qui confèrent une tolérance thermique ne sont pas tous associés à la variabilité génétique de la tolérance à la sécheresse comme la thermostabilité membranaire (Blum, 1988). De plus, les cultivars de blé qui performant sous stress thermique ne le sont pas nécessairement en conditions de sécheresse (Rajaram *in* Anonyme, 2007a).

2-3-3 Adaptation phénologique

L'évitement du stress hydrique à travers la manipulation phénologique des plantes est une stratégie génétique exploitée pour assurer des rendements relativement stables sous conditions de stress terminal (Richards, 1991).

2-4 Critères de sélection en zones semi arides

Les programmes de sélection du blé à travers le monde ont réalisé des gains génétiques considérables dans l'amélioration des rendements sans recourir aux outils de sélection physiologiques (Rajaram and Ginkel, 1996). Les sélectionneurs et les physiologistes admettent que les succès futurs passeront à travers une grande intégration d'une recherche multidisciplinaire (Jackson *et al.*, 1996). Le modèle proposé par Passioura en 1977 est une vue appropriée pour identifier les caractéristiques qui peuvent limiter le rendement du blé aux environnements à contrainte hydrique. Ce modèle est basé sur le

rendement grain, et non pas sur les critères de protection ou de survie longtemps usités sous des conditions de sécheresse dans le passé, en grande partie sans succès.

Passioura (1977) considère que le rendement grain est fonction de i) la quantité d'eau utilisée par la récolte, ii) la façon dont l'eau est utilisée par la récolte pour le développement de la biomasse et iii) l'index de récolte (IR ou *HI*), c'est à dire le rapport entre le rendement grain et la biomasse totale.

Au CIMMYT, des recherches ont montré l'interrelation de plusieurs caractéristiques physiologiques, incluant la conductance stomatique et la capacité photosynthétique, sur une série historiques de cultivars dans un environnement considéré à haut potentiel de production (Fischer *et al.*, 1998). Certains travaux ont montré qu'une variation faible de température de la couverture végétale, quand elle est mesurée sous des climats chauds est fortement associée au rendement (Reynolds *et al.*, 1994). De plus, les caractéristiques de la sélection physiologique pour la tolérance à la sécheresse ont été introduites dans plusieurs programmes de sélection de blé en Australie, telles que l'efficacité de la transpiration, la vigueur précoce et le tallage réduit (Richards *et al.*, 1996).

Actuellement, au CIMMYT les techniques de la sélection physiologique ont un rôle complémentaire dans la sélection du blé (Reynolds *et al.*, 1998). On peut citer les caractéristiques physiologiques qui peuvent avoir des implications sur le potentiel du rendement par exemple les translocations des sucres solubles des tiges vers le grain et la capacité pour maintenir aussi longtemps la feuille verte (*stay-green*) durant toute la période de remplissage (Jenner and Rathjen, 1975). Stoy, (1965) et Austin *et al.*, (1980) ont montré dans une étude que des lignées performantes dépendent moins des réserves de la tige que des lignées moins performantes.

2-5 Notions relatives à l'état hydrique du sol

La rétention en eau d'un sol est un phénomène complexe qui dépend de sa constitution physico-chimique mais aussi de l'organisation structurelle qui est influencée à son tour par le climat, le travail du sol et la végétation. Rappelons que la capacité au champ (CC) est définie comme la quantité d'eau retenue dans le sol après la perte de l'eau gravitationnelle à flux rapide. Tandis que Ratliff *et al.* (1983) ont défini le point de flétrissement (PF) comme la teneur minimale en eau du sol après que les plantes ont

arrêté l'extraction d'eau et sont proches d'une mort prématurée ou de la dormance comme résultat du stress hydrique.

La réserve utile (RU) d'eau dans le sol est la différence entre la capacité au champ et au point de flétrissement et elle dépend de la porosité du sol. L'eau utile totale du sol est la somme de la quantité d'eau de tous les horizons où les racines sont présentes. Lorsque l'eau utile du sol est supérieure approximativement à 30-40% du réservoir utile, la transpiration des plantes est peu affectée par le régime hydrique du sol (Ritchie, 1981 ; Meyer and Green, 1981) et l'absorption de l'eau par horizon est proportionnelle à la densité racinaire existante (Maertens *et al.*, 1974).

Dans une situation de sécheresse, le dessèchement du sol commence par les horizons supérieurs où la densité racinaire est maximale et l'eau disponible pour les plantes est restreinte aux horizons profonds, où la quantité des racines est minimale. Néanmoins, Bonachela (1996) a démontré que des plantes de triticale et d'orge sont capables d'extraire toute l'eau nécessaire pour la transpiration avec une densité racinaire de 0.5-0.7 cm·cm⁻³, ce qui est une valeur très faible.

L'état hydrique du sol peut être caractérisé soit par la teneur en eau (humidité), soit par le potentiel hydrique du sol qui définit le travail requis pour déplacer l'eau de sa situation actuelle à son état libre. Il est contrôlé par différents types de potentiels dont la somme régit l'énergie de liaison de l'eau du sol (Bourrié and Pédro, 1979). Le potentiel total peut s'écrire comme suit :

$$\phi_t = \phi_g + \phi_m + \phi_o + \phi_a + \phi_e$$

ϕ_g : Potentiel gravitaire.

ϕ_m : Potentiel matriciel.

ϕ_o : Potentiel osmotique (nature et composition chimique de la solution du sol).

ϕ_a : Potentiel pneumatique (relatif à la différence de pression de l'air dans le sol et la pression atmosphérique).

ϕ_e : Potentiel enveloppe (*over-burden potential*), (relatif à la pression mécanique exercée par les couches supérieures du sol sur les couches inférieures).

2-6 Etat hydrique de la plante

L'état hydrique instantané des plantes est défini par son potentiel. L'utilisation du potentiel hydrique donne la possibilité de faire la connexion avec le flux d'eau existant dans la plante. Ce dernier est toujours la résultante d'un gradient de potentiel. Ce flux d'eau résultant de la demande évaporatoire dans les feuilles est régi par la loi de la tension-cohésion dans le continuum sol- plante- atmosphère (Dixon and Joly, (1895) *in* Gonzales, (2006) ; Philippe, (1966) ; Wei *et al.*, (1999) ; Tyree and Cochard, (2003)).

Le potentiel hydrique total des plantes est la résultante de la différence entre la pression hydrostatique et la pression osmotique (Passioura, 1980).

$$\Psi = P - \Pi$$

Où :

Ψ : le potentiel hydrique de la plante

P : la pression hydrostatique

Π : la pression osmotique

Il a été montré que l'état hydrique des plantes s'améliore en général à une teneur élevée en CO₂. Une part de cet effet peut être attribuée à une demande de transpiration réduite (par unité de surface foliaire), et de là, résulte un soulagement partiel du stress hydrique (Paez *et al.*, 1984). De même, chez les plantes normalement pourvues en eau, on a trouvé que les potentiels hydriques avant l'aube et à midi sont moins négatifs à une concentration du CO₂ élevée (Clifford *et al.*, 1993; Jackson *et al.*, 1994).

CHAPITRE 3. EFFICACITE D'UTILISATION DE L'EAU ET CRITERES ISOTOPIQUES

3-1 Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE)

L'Efficacité de l'utilisation (EUE) est considérée comme une caractéristique de sélection pour l'amélioration des rendements en zones arides (Condon and Richard 1992 ; Rebetzke *et al.*, 2002).

Auparavant, L'EUE était définie par de Wit,(1958) et Hanks *et al.*,(1969) comme étant l'efficience de la transpiration (TE) qui est équivalente au ratio entre de la biomasse ou le rendement grain (Y) (kg.ha⁻¹) et la quantité d'eau transpirée par la végétation (T) en (mm).

$$EUE=TE=Y/T.$$

Selon Richards (1991) L'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) exprime généralement le ratio entre la production de la matière sèche totale et l'évapotranspiration, formulée selon l'équation:

$$EUE (\text{matière sèche ou biomasse}) = TE / (1 + Es/T)$$

Où :

TE est l'efficacité de la transpiration (poids sec de la biomasse aérienne/ transpiration).

Es est l'eau perdue par évaporation de la surface du sol.

T est l'eau perdue par transpiration.

Cependant, l'EUE décrit par Tanner et Sinclair (1983) comme le ratio entre la biomasse (kg.ha⁻¹) ou le rendement en grain Y (kg.ha⁻¹) et l'évapotranspiration saisonnière ETP (mm).

$$EUE = Y/ETP.$$

$$EUE = \text{Biomasse}/ETP.$$

Certains auteurs utilisent ces deux formules différentes pour le calcul de l'EUE relativement à la matière sèche EUE(ms) ou EUE(biomasse) et au rendement grain EUE(grain).

$$EUE(ms) = \frac{\text{Matière sèche (MS)}}{ETR} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{EUE}(\text{grain}) = \frac{\text{Rendement grain}}{\text{ETR}}$$

L'équation (1) qui par ailleurs est probablement la plus appropriée pour les zones arides et semi-arides à caractère pastoral du fait de l'importance de la paille. Par définition, l'évapotranspiration réelle (ETR) est composée de la somme de deux quantités qui sont la transpiration (T) du végétal et l'évaporation du sol (Es):

$$\text{ETR} = T + E_s$$

Le rapport MS/T traduit la quantité de matière sèche produite par unité de transpiration et de ce fait, il est appelé "efficacité de transpiration".

Par ailleurs, la matière sèche (grain+paille) produite par la culture peut être exprimée comme suit:

$$\text{MS} = T (\text{MS}/T)$$

L'équation (1) peut donc être reformulée comme suit:

$$\text{EUE} = \frac{\text{MS}/T}{1+(E_s/T)} \quad (\text{IAVHII}, 1998)$$

Le ratio de transpiration est le nombre de molécules d'eau nécessaires au cours de la photosynthèse pour la fixation d'une molécule de CO₂.

A ce propos, les plantes dites en C3 utilisent environ 500 molécules d'eau pour fixer une molécule de CO₂, dans ce cas le ratio de transpiration est égal à 500 et réciproquement l'EUE est de 1/500 (Anonyme, 2002)

L'EUE peut se calculer à plusieurs échelles du temps et à différents niveaux d'analyse.

Pour un physiologiste, cette notion traduit l'efficacité des feuilles à échanger l'eau contre le gaz carbonique, ou en d'autres termes le ratio entre la photosynthèse et la transpiration.

Pour un agronome, l'EUE est le ratio entre la production de matière sèche (ou le rendement) et la consommation d'eau (ETR).

Il y'a souvent confusion, quant à la définition de l'efficacité de l'utilisation de l'eau quand elle signifie la mesure de la biomasse par unité d'eau évapotranspirée, l'EUE ne fait pas de distinction entre eau évaporée et eau transpirée (Tanner and Sinclair, 1983).

L'EUE est un critère de sélection de polémique pour l'amélioration des rendements en zones de déficit hydrique.

La production des végétaux sous stress hydrique ne dépend pas seulement de l'EUE mais pour une grande partie de la capacité du génotype à gérer la transpiration (Blum, 1993). En outre, il peut y avoir une association négative entre l'EUE et la transpiration, comme pour les génotypes relativement tolérants à la sécheresse, qui gèrent bien leur transpiration et maintiennent leur statut hydrique et qui peuvent présenter une EUE relativement basse comparativement aux génotypes moins résistants (Mokhtari *et al.*, 1997).

Duan and Zhang (2000) ont étudié l'EUE lors d'une enquête sur plusieurs sites/saisons ; Leurs données ont indiqué que l'EUE moyenne des principales récoltes était de 1.1 kg m^{-3} , et que, depuis 1953 à 1986 le rendement de blé et l'EUE ont augmenté de la même manière. En condition expérimentale, l'EUE variait de 6 à $12 \text{ kg.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (Xin and Wang 1998; Wang *et al.* 2002) et une EUE potentielle de $20 \text{ kg.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ a été obtenue pour le blé dans une région d'Australie en climat Méditerranéen (French and Schultz, 1984).

Ces dernières années, une expérimentation de démonstration en zone aride a montré que le rendement grain peut croître à plus de 50% et le rendement par mm de pluie peut passer à plus de $6 \text{ kg.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (Shan, 2003)

3-1-1 Efficacité d'utilisation de l'eau intrinsèque (EUE_i)

Il existe une forte relation entre la croissance de la végétation et la transpiration à cause de l'association dans les processus et les chemins partagés entre transpiration et assimilation du CO₂. De la même manière il y'a une forte relation entre le développement végétal et l'évapotranspiration, car l'accumulation de la matière sèche et l'évapotranspiration sont intimement liées avec le rayonnement solaire (Bhattarai, 2005).

En littérature on peut trouver plusieurs synonymes de l'efficacité de l'utilisation de l'eau intrinsèque EUE_i, telle que l'efficacité de l'utilisation de l'eau instantanée de la feuille qui est le ratio entre l'activité photosynthétique de la feuille ou l'assimilation du CO₂ (A) et la transpiration (T)

$$\text{EUE}_i = A / T \text{ (mgCO}_2\text{/g H}_2\text{O) ou (mmol CO}_2\text{/mol H}_2\text{O)}.$$

L'EUE_i est déterminée habituellement avec un équipement de mesure de l'échange gazeux. Une petite réduction dans la conductance stomatique peut conduire à une

augmentation relative de l'EUE_i (Nobel, 1991), car la transpiration est généralement plus sensible que la photosynthèse à toute variation de la conductance stomatique (Ehleringer, 1988).

Les feuilles épaisses ou composées de nombreuses petites cellules de mésophile peuvent avoir une EUE_i élevée à cause de la forte capacité photosynthétique par unité de surface de la feuille. Donc, la capacité photosynthétique de la feuille est en rapport avec la dimension de la feuille (Nobel, 1980; 1991).

L'Estimation de l'EUE_i basée sur l'échange gazeux de la feuille est fortement affectée par les caractéristiques de la plante telle que la morphologie de la feuille, l'ouverture des stomates et le type d'environnement (Fischer and Turner; 1978; Coyne and Bradford, 1985; Pettigrew *et al.*, 1993).

Quelques chercheurs ont estimé l'EUE_i comme étant le rapport sus cité: A / T (Valle *et al.*, 1985; Ehleringer *et al.*, 1991), entre autre (Morgan and LeCain, 1991; Pettigrew *et al.*, 1993; Sharifi and Rundel, 1993) utilisent le ratio entre la photosynthèse et la conductance stomatique (gs) (EUE_i = A/gs). Cet usage a minimisé la variation dans le dénominateur en utilisant un instrument de mesure de gaz échangé comparativement avec la transpiration utilisée pour l'estimation de l'EUE_i.

Selon Farquhar, (1989) l'EUE intrinsèque, peut aussi être exprimée par la formule:

$$\mathbf{EUE_i = A/T = P_a (1 - P_i/P_a) / 1.6D.}$$

Où

A = le taux de l'assimilation de CO₂ ou flux de CO₂.

T = le taux de la transpiration ou flux de H₂O.

D = la différence de la pression de la vapeur entre la feuille et l'air.

P_a = la pression partielle du CO₂ atmosphérique.

P_i = la pression partielle du CO₂ intercellulaire.

1.6 = le ratio du diffusivité binaire d'eau et de CO₂ dans l'air.

Depuis que T est une fonction de la conductance stomatique (gs) et D ; A/T peut être estimé en fonction du ratio A/gs sous conditions que D ne varie pas de P_i / P_a (exprimé par A et gs) (Donovan and Ehleringer, 1994).

En général, le rapport instantané (A/T) varie au cours du cycle végétatif et diffère selon le type de culture (Cowan, 1990). C'est une conséquence de la sensibilité de

l'évaporation et la conductance stomatique vis-à-vis de D. par conséquent, la conductance stomatique (g_s) répond plus rapidement aux changements de la température de l'air et de l'humidité atmosphérique que A (Shultz and Hall, 1982; Sharkey, 1985, Salisbury and Ross, 1992; Jones, 1992).

La fermeture des stomates tend à augmenter l'EUEi aux dépens de la production absolue ; elle peut aussi être calculée à partir des concentrations du CO_2 et de la vapeur d'eau comme suit :

$$EUE_i = A/T = [g_c (c_a - c_i)] / [g_w (w_i - w_a)] \approx 0.6 c_a (1 - c_i / c_a) / (w_i - w_a).$$

Où :

g_c : conductance stomatique de CO_2 .

g_w : conductance stomatique de la vapeur d'eau.

c_a : concentration du CO_2 atmosphérique.

c_i : concentration intercellulaire du CO_2 .

w_a : concentration du H_2O atmosphérique.

w_i : concentration intercellulaire du H_2O .

0.6: diffusion relative du CO_2 et l'eau dans l'air.

3-2 Discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}C$)

Le CO_2 Atmosphérique est composé de 98.89% de ^{12}C et 1.11% de ^{13}C et de 0.10 à 0.11% de ^{14}C . Au cours de la photosynthèse, les plantes discriminent contre le ^{13}C (Farquhar *et al.*, 1982; O'Leary, 1988; Farquhar *et al.*, 1989, Guy *et al.*, 1993). Ce phénomène de discrimination est dû à quelques mécanismes physiologiques et biochimiques :

1) le coefficient de diffusion dans l'air qui est inversement proportionnel à la racine carrée de la masse moléculaire, par conséquent, le ^{13}C est diffusé plus lentement à travers les stomates que le ^{12}C , soit un fractionnement d'environ 4‰ pour les C3.

2) le ^{12}C est favorisé par les enzymes lors des processus chimiques (carboxylation) à cause de son faible poids moléculaire, sa forte énergie vibrationnelle et sa faible force de liaison comparée à celle du ^{13}C . Cela mène au fractionnement isotopique proche de 30 ‰ au sein du tissu végétal des plantes en C3. Comme le carbone est assimilé dans les tissus de la plante, où une composition isotopique distincte évolue, qui n'est pas en état

d'équilibre stable avec l'air environnant (Farquhar *et al.* 1982; O'Leary, 1988; Farquhar *et al.*, 1989).

3-2-1 Rapport ou ratio isotopique (R)

L'abondance naturelle des isotopes stables du carbone se caractérise par le rapport isotopique (R). Ce rapport pour les isotopes de carbone est variable d'un composé à l'autre et est défini par l'équation :

$$R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$$

3-2-2 Effet isotopique (α)

L'effet isotopique α se produit lors de la transformation d'un substrat (**S**) en un produit (**P**) et se définit comme le rapport entre le R de la **source (substrat)** et celui du **produit** : $\alpha = R_{\text{source}}/R_{\text{produit}}$

3-2-3 Composition isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$)

La composition isotopique du carbone d'un tissu végétal est exprimée habituellement en référence à un standard comme suit:

$$\delta^{13}\text{C} = [R_e/R_s - 1] \times 1000 \quad (\text{Ehleringer and Osmand, 1989}).$$

Où :

R_e : le ratio isotopique de l'échantillon. .

R_s : le ratio isotopique du standard international.

Le R_s : est celui de PDB (PeeDee belemnite), un fossile calcaire, issue de la formation rocheuse PeeDee en Caroline du sud. Ce fossile est riche en ${}^{13}\text{C}$ et son rapport isotopique est de 0.011238 (Craig, 1957), l'unité de mesure de $\delta^{13}\text{C}$ est un pour mille (‰).

La composition isotopique du carbone $\delta^{13}\text{C}$ d'un composé est d'autant plus négative que ce produit est pauvre en ${}^{13}\text{C}$ comparativement au PDB. Par exemple, la $\delta^{13}\text{C}$ pour le CO_2 atmosphérique est de -8.0‰ . En plus, de la discrimination du ${}^{13}\text{C}$ lors de l'assimilation du CO_2 dans la matière sèche, tout échantillon végétal contemporain a une composition isotopique négative (Condon *et al.*, 2002)

Farquhar *et al.*, (1982) ont montré que le ratio isotopique du carbone d'un tissu foliaire reflète la variation de la pression partielle du CO₂ à l'intérieur des stomates de la feuille. Ils ont quantifié la discrimination par l'équation suivante:

$$\Delta = a + (b-a)P_i/P_a$$

Où :

a : la discrimination due à la diffusion lente de ¹³C dans l'air, qui est de 1.0044

b : la discrimination due à la carboxylation, qui est de 1.0029 ; données pour la plupart des conditions aux champs.

P_a : (constante) est la pression partielle du CO₂ atmosphérique

P_i : la pression partielle du CO₂ intercellulaire.

Des études ont vérifié la corrélation entre le ratio du carbone isotopique avec les valeurs à long terme de P_i/P_a (French and Farquhar, 1982; Guy *et al.*, 1983; 1985).

La valeur P_i/P_a est importante car elle est fonction de la capacité photosynthétique et la conductance stomatique. Les changements dans P_i/P_a et le ratio du carbone isotopique de la feuille sont par conséquent fonction des changements de l'un ou des deux à savoir la capacité photosynthétique et la conductance stomatique (Farquhar *et al.*, 1989).

La discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$) est une mesure du ratio ¹³C/¹²C du matériel végétal, relativement à la même valeur du ratio de l'air environnant (Farquhar and Richards, 1984)

$$\Delta^{13}\text{C} = (R_a/R_p) - 1 \quad (\text{Condon } et \text{ al.}, 2002).$$

Où :

R_a est le ratio ¹³C/¹²C de l'air (atmosphère).

R_p est le ratio ¹³C/¹²C de la plante.

La discrimination isotopique du carbone prend des valeurs positives, ce qui explique le fait que les plantes en C3 discriminent activement contre le ¹³C au cours de la photosynthèse.

Depuis la publication de la théorie de Farquhar *et al.*, (1982) indiquant que le ratio ¹³C/¹²C de la matière sèche des plantes en C3 est le résultat de la discrimination du ¹³C au cours des processus vitaux. Ces processus sont inclus dans l'équation :

$$\Delta^{13}\text{C} = (a-d) + (b-a)c_i/c_a$$

Où :

a : la discrimination qui se produit pendant la diffusion de CO₂ à travers les stomates

b : la discrimination par la 'Rubisco' pendant le processus de carboxylation du CO₂ dans les premiers produits de photosynthèse

d : quelques fractionnements de métabolisme subséquent ; probablement la respiration.

Une autre équation donnée par (Farquhar et Richards, 1984) qui décrit la variation en ¹³C mesuré dans la matière sèche végétale :

$$\Delta^{13}\text{C} (\text{‰}) \approx 4.4 + 22.6 c_i/c_a$$

Depuis les équations précédentes, le $\Delta^{13}\text{C}$ est positivement corrélée avec le ratio c_i/c_a . Au départ, il a été noté que L'EUE_i devrait être négativement corrélée avec le rapport c_i/c_a ; par conséquent, le $\Delta^{13}\text{C}$ et L'EUE_i l'un vis-à-vis de l'autre devraient l'être aussi. Il y a eu de nombreuses études qui ont prouvé que cette corrélation négative entre $\Delta^{13}\text{C}$ et L'EUE_i est forte pour beaucoup d'espèces en C3.

La théorie proposée par Farquhar *et al.*, (1982) reliant le $\Delta^{13}\text{C}$ à L'EUE_i était donc bien établie pour les deux, la feuille et la plante entière.

Actuellement l'analyse de $\Delta^{13}\text{C}$, à cause de sa commodité et son coût relativement abordable, est devenue un indicateur utile dans l'analyse de L'EUE_i, en plus, de son avantage de gain de temps, de finesse et de fiabilité des mesures.

3-3 Efficacité d'utilisation de l'eau en relation avec la discrimination isotopique du carbone

Farquhar *et al.*, (1982a) ont rapporté une relation entre l'EUE des plantes en C3 et la discrimination du ¹³C, ultérieurement, ces deux traits ont été profondément étudié par Farquhar and Richards (1984), Condon *et al.*, (1990), Read *et al.*, (1991), Ebdon *et al.*, (1998), Teulat *et al.*, (2001), Rebetzke *et al.*, (2002) et ayant montré un rapport négatif. Tout facteur environnemental qui affecte la conductance stomatique et l'activité enzymatique affectera également l'EUE et la discrimination du ¹³C (Farquhar *et al.*, 1982a).

Théoriquement, la discrimination du ¹³C par les feuilles peut être associée au ratio entre l'assimilation du carbone (A) et la conductance stomatique (gs) (Farquhar *et al.*, 1982b). Donc, L'EUE_i de la feuille qui est le ratio entre le taux de l'assimilation du CO₂ (A)

et le taux de transpiration (T) devra avoir aussi une forte relation avec la discrimination du carbone.

La sécheresse et les différences génotypiques affectent également la discrimination du carbone et le ratio A/gs (Meinzer *et al.*, 1990). Ismail and Hall (1992) ont rapporté une réduction dans la discrimination du ¹³C sous sécheresse pour les géotypes du colza.

Farquhar *et al.*, (1982b) ont recommandé un modèle entre la discrimination et le ratio entre les concentrations intercellulaire et ambiante du CO₂ : (C_i/C_a).

$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b-a)(C_i/C_a)$$

Où :

a : la discrimination due à la diffusion du CO₂

b : la discrimination biochimique des enzymes

Généralement, en littérature, il devrait y avoir une corrélation négative entre l'EUE_i et la discrimination.

$$\text{EUE}_i = \frac{C_a (b-d-\Delta)}{(b-a)} \times \frac{(1-\Phi_c)}{1.6v (1+\Phi_w)}$$

Où :

Φ_c : Une fraction perdue du CO₂ assimilée pendant le jour à travers la respiration.

Φ_w : la perte d'eau à travers le cuticule ou à travers les stomates mal fermés lors de la transpiration au cours de la nuit

Donc, ces deux quantités devraient être considérées dans le rapport précité.

d : un facteur de correction (Farquhar *et al.*, 1989)

v : gradient de la pression de la vapeur d'eau entre la feuille et l'air ambiant.

Cette équation montre que la technique de la discrimination du carbone en général permet la prédiction de l'EUE sur le long terme pour les plantes en C₃.

La relation entre le Δ et EUE n'a pas été complètement établie dans les études sur champ.

Donc, les chercheurs doivent multiplier leurs efforts pour déterminer une relation pareille.

3-4 Efficacité d'utilisation de l'eau en relation avec le stress hydrique

Le stress hydrique est l'un des principaux facteurs de l'environnement qui affectent l'EUE. Toute réduction dans le potentiel hydrique du sol engendre une réduction du potentiel de turgescence foliaire et une réduction dans la conductance stomatique (Kanemasu and Tanner, 1969) ce qui fait augmenter l'EUEi (Nobel 1991).

Lorsque le potentiel hydrique du sol diminue, les plantes réagissent pour conserver l'eau et les stomates sont partiellement ou complètement fermés selon l'intensité du stress.

En effet, l'EUE est liée au mouvement stomatique.

La diminution de l'humidité du sol réduit la conductance stomatique, la photosynthèse et le taux de transpiration (Nobel, 1991; Payne *et al.*, 1992 ; Comstock and Ehleringer, 1993). Cependant, la réduction de la biomasse due au stress hydrique est moins importante comparativement aux pertes d'eau qui font augmenter l'EUE (Nobel, 1991; Ismail and Hall, 1992). Le stress hydrique augmente l'EUE pour une large gamme d'espèce (Hall *et al.*, 1990; Payne *et al.*, 1992; Osorio and Pereira, 1994).

3-5 Efficacité d'utilisation de l'eau en relation avec la différence de vapeur d'eau entre l'air et la feuille (DVP)

Les réponses stomatiques vis-à-vis du déficit de la vapeur de l'eau, reflètent un mécanisme empêchant l'extrême taux de transpiration lorsque les plantes sont soumises à de grandes demandes d'évaporation (Hall *et al.*, 1976).

Parmi les facteurs de l'environnement qui influencent l'EUE ; la concentration de la vapeur d'eau dans l'air et la différence de vapeur d'eau entre l'air et la feuille (DVP).

Bierhuizen and Slatyer, (1965); Rawson *et al.*, (1977) considèrent que l'EUE est linéairement associée à la DVP. L'EUE diminue aussi bien que la DVP augmente (Jonoudi *et al.*, 1993; Lindroth and Cienciala, 1996).

L'influence majeure de la température de l'air sur l'EUE opère via ses effets sur la DVP du continuum (feuille-air); la DVP est fortement associée à la température au champ (Schulze *et al.*, 1973). Donc, une température élevée de l'air réduit l'EUE, à moins que la température de la feuille soit au dessus de l'optimum pour la photosynthèse (Miller and Mooney, 1974). Cependant Dardanelli *et al.* (1991) ont observé une réduction de l'EUE en condition de faible humidité relative et de haute température.

3-6 Efficacité d'utilisation de l'eau en relation avec la concentration du CO₂

La production agricole est considérablement influencée actuellement par les changements climatiques. La réponse la plus remarquable est le réchauffement global et l'augmentation de la concentration du CO₂ ainsi que le développement des cultures en zones aride et semi-aride (Reuveni and Gale, 1985; Woodward, 1989; Thomas and Harvey, 1993; Polley *et al.*, 1993; Rogers *et al.*, 1996; Kirschbaum *et al.*, 1998; Hussain *et al.*, 2001; Qin, 2003 ; Asseng *et al.*, 2004).

L'augmentation de l'activité de la photosynthèse, L'EUE (Valle *et al.*, 1985. Radoglou *et al.*, 1992; Allen *et al.*, 1994), l'amélioration de la production de la matière sèche (Kimbal, 1983; Rogers *et al.*, 1983), la réduction de la transpiration (T) et de la conductance stomatique. Farquhar and Sharkey, (1982); Rogers *et al.*, (1983); Radoglou *et al.*, (1992) ont été rapportées à cause d'une augmentation de concentration de CO₂.

CHAPITRE 4. IMPORTANCE DE LA MODELISATION ET SES PERSPECTIVES

4-1 Problématique et opportunité de l'étude

Selon une simulation réalisée par un modèle conçu par *IPCC* (2001), les projections indiquent que les quantités d'eau relativement en zone méditerranéenne diminueront sévèrement à cause des futurs changements de climat, corrélés à leur tour avec la sécheresse et la désertification.

La sécheresse est probablement le plus important facteur qui limite la production agricole dans le monde (Jones and Corlett, 1992), c'est un événement naturel et une composante essentielle du climat de chaque région du monde. En plus, ce qu'engendre cet aléa de rareté en ressources hydriques souterraines agissant sur la vie des végétaux, des animaux et sur les systèmes de production des agro éleveurs. Près de 60% des régions arides et semi-arides du monde concernent des pays en voie de développement (Parr *et al.*, 1990), où la production agricole est dans sa quasi totalité dépendante de la pluviométrie. La solution à une telle situation s'avère ardue et compliquée d'où la multiplication des efforts des Etats et des organisations régionales spécialisées dans le diagnostic des systèmes complexes : social, économique, politique et technique ; d'où les contributions à améliorer les productions végétales par le biais des sélections des cultivars utilisant efficacement l'eau, cette eau devenant très demandée soit en cultures pluviales ou irriguées à cause de la croissance démographique, faisant appel à des stratégies de développement des cultures utilisant efficacement l'eau (Li and Yul, 2007).

Aujourd'hui, l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) est largement estimée et utilisée par les scientifiques, les consultants et les agriculteurs.

Autrement dit, c'est la bonne gestion de l'eau disponible par le végétal au cours de son cycle de vie et pendant les conditions hostiles, pour avoir un rendement acceptable. Cet objectif peut être obtenu par diverses approches : à savoir l'approche physiologique et génétique qui vise à expliquer le rendement à travers ses composantes et l'analyse de paramètres physiologiques et la sélection des traits susceptibles d'être responsable de l'utilisation efficace de l'eau.

Depuis quelques années, l'outil informatique conférait une forte aptitude de traitement de données, l'étude des comportements à travers les simulations, ouvre des

horizons très prometteurs dans la compréhension des phénomènes physiologiques et les tendances du changement climatique universel. Aujourd'hui, l'utilisation de modèles de cultures est devenue une orientation incontournable relativement à plusieurs cultures dans les endroits potentiels de production.

4-2 Modèles de culture et leurs Structures

4-2-1 Modèles de culture

Depuis les premiers essais de modélisation de de Wit en 1965, les modèles de culture se sont largement répandus, touchant une grande partie des cultures et offrant un outil de réflexion sur les relations entre les cultures et leurs environnements (Bonhomme, 1997)

Ces modèles synthétisent, avec des degrés de complexité, les connaissances acquises sur les mécanismes de croissance et l'élaboration du rendement. Ils rendent compte aussi des effets des principaux facteurs du milieu (l'état hydrique du sol, la température, le rayonnement, le type de sol et la fertilité du sol) sur les mécanismes sus cités.

Les modèles constituent une synthèse des connaissances acquises sur les cultures et le fonctionnement du système sol – plante et environnement, à travers des relations empiriques qui rendent compte de ces relations. Ainsi, ils constituent des outils d'analyse et de prévision des effets et des modifications appliquées à ce système (Boote *et al.*, 1996). Bouman *et al.*, (1996) font le classement de trois groupes majeurs de modèles :

1- le groupe de modèles américains (IBSNAT) *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer* (Uehara and Tsuji, 1993) ce projet qui a produit la fameuse famille des modèles CERES.

2- le groupe de modèles australiens qui a développé le simulateur de système de production agricole (*APSIM*) (*The Agricultural Production system Simulator*) (McCown *et al.*, 1995).

3- le groupe de modèles hollandais qui a développé une famille décrite par Van Ittersum *et al.*, (2003).

Ces dernières années, une série de nouveaux modèles est apparue et utilisée d'une manière croissante tel que *CropSyst* (Stöckle and Nelson, 1999; Stöckle *et al.*, 2003) et STICS un modèle français développé par l'INRA en 1996.

Dans notre étude, nous essayons de tester un modèle mécaniste belge « *Budget* » développé en 2001. Ce travail est un premier pas dans le domaine de la modélisation relative à nos conditions locales, souffrant souvent de périodes imprédictibles de stress.

Wolf, (1993); Rosenzweig and Parry, (1994); Downing *et al.*, (2000) rapportent l'utilité de la simulation dans la prédiction du comportement complexe des cultures. La réponse des cultures aux variations hydriques sont de plus en plus utilisées dans l'évaluation de l'impact possible des changements climatiques sur la sécurité alimentaire. L'intérêt de ces modèles est lié à leurs possibilités de représenter quantitativement, l'action combinée et dynamique des différents facteurs environnementaux sur le fonctionnement d'ensemble de la culture.

Les modèles de culture, représentent selon la démarche analytique le fonctionnement du système sol-plante-milieu dans son cadre physique et technique. Ils visent à estimer des grandeurs agronomiques telles que le rendement, la date de récolte, la consommation en eau, en azote, ou l'impact environnemental des techniques culturales sur le système (les rotations). Ces grandeurs agronomiques sont estimées à partir des calculs de flux de matière ou d'informations entre les différents compartiments du système. La complexité des relations existantes dans ce système ne peut être prise en compte dans son ensemble. Les modèles de culture reposent donc sur une hiérarchisation des processus en fonction des variables de sortie visées et des conditions de leur utilisation. Ils sont donc une représentation simplifiée du système en interaction avec les pratiques agricoles.

4-2-2 Structures des modèles de culture

Les modèles de culture sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sus cité de manière dynamique, dont l'unité de temps est souvent le jour, c'est-à-dire qu'ils décrivent l'état du système chaque jour (Whisler *et al.*, 1986). Ils comprennent un ensemble de variables d'entrée (l'état initial du système au début de la simulation, le climat journalier, et les techniques culturales), de paramètres (coefficients culturaux et mathématiques), de variables d'état (les variables décrivant le système chaque jour, par exemple la biomasse aérienne de la culture) et de

variables de sortie (à la fin ou en cours de la simulation) comme le rendement à la récolte, l'efficacité d'utilisation de l'eau ou de l'azote au cours du cycle de culture.

Selon la nature des variables d'état décrites dans le modèle et les équations mathématiques simulant leur évolution, on distingue les modèles de type « mécaniste » et les modèles de type « empirique » (Monteith, 1996 ; Passioura, 1996 ; Whisler *et al.*, 1986).

1- Les modèles de type mécaniste décrivent et quantifient chaque processus, sur des bases physiques ou physiologiques, c'est-à-dire que les équations décrivent finement les processus tels que la respiration, la croissance et le développement de chaque organe.

2- Les modèles de type « empirique », les relations décrivant ces processus sont une simplification des relations complexes existant au sein du système. Il s'agit par exemple de simples régressions linéaires entre deux variables d'état.

4-3 Domaines d'utilisation des modèles de culture

Les modèles de culture rencontrés dans la bibliographie consistent à utiliser les variables simulées comme un outil de prédiction de la stabilité des génotypes pour des variables d'intérêt. Ainsi, Mavromatis *et al.* (2001) dans une étude sur différents génotypes de soja ont montré qu'il était possible, à l'aide d'un modèle de culture, de reproduire non seulement l'effet de l'interaction entre des caractéristiques génotypiques et l'environnement, mais de classer correctement les différents génotypes sur les environnements testés et de mesurer l'interaction de façon similaire au réel.

L'effet des caractéristiques variétales sur la production a été récemment proposé par certains modélisateurs comme une piste de travail intéressante, afin d'identifier les facteurs d'adaptabilité pour le rendement ou pour toute autre composante d'intérêt (Saulescu and Kronstad, 1995 ; Shorter *et al.*, 1991).

Cependant l'utilisation d'un modèle de culture avec un outil de sélection permet d'étudier l'effet de gènes associés à des caractères phénotypiques sur des caractères d'intérêt tels que le rendement, sous l'influence de l'environnement (Chapman *et al.*, 2003).

DEUXIEME PARTIE
PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE 5. MATERIEL ET METHODES

5-1 Le site expérimental

L'expérimentation a eu lieu à l'EAC Kerbab Rabie, sise à la Commune de Ain Abessa (N : 36°18'14", E : 5°18'7" sur une altitude de 1166 m : position par *GPS Garmin 12*) à 19 km au nord-ouest du centre de la Wilaya de Sétif.

Le climat est de type semi aride supérieur (400-500 mm par an) la plus grande partie des précipitations a lieu pendant les mois d'hiver et seulement une partie minime est répartie sur le reste des mois de la saison. Ce climat est caractérisé par des vents chauds et secs et par des températures estivales de l'ordre de 35°C (Bechtel, 1975)

Le sol colluvionnaire de faible pente est relativement profond (supérieur à un mètre), de texture argilo-limoneuse, de couleur noire.

5-2 Matériel Végétal et outils de simulation et d'analyse.

5-2-1 Matériel végétal

L'ensemble des géotypes de blé dur testé comporte six variétés d'une sélection CIMMYT/ICARDA et deux variétés locales. Ces variétés ont des comportements différents (Tableau A1).

5-2-2 Dispositif expérimental

L'essai est conçu selon un dispositif en blocs complètement aléatoire. Huit géotypes sont répartis aléatoirement dans chaque bloc. Chaque géotype est répété trois fois. Quatre stations d'un mètre linéaire par parcelle élémentaire ont été choisies aléatoirement au sein de chaque parcelle des 24. Chaque parcelle a une dimension de 1.8m², soit 2.5m X 0.72 m X 4 lignes espacées de 18 cm.

Le semis a été effectué manuellement le 22-12-2006. La densité de semis au départ était de 75 grains/ml soit 417 grain/m², après levée totale (01-03-2007) elle a été ajustée à 60 plants/station soit 335 plants/m².

Le précédent cultural est une jachère travaillée qui a été repris au cover-crop en début d'Octobre pour l'application de la fumure de fond (TSP) à raison de 1q /ha.

Une dose de 0.8 q/ha de fumure azotée (Urée) a été épandue au début tallage (10-02-2007).

5-2-3 Outils d'analyse statistique

L'analyse de variance, les régressions linéaires, les matrices de corrélation et les comparaisons de groupes de moyennes ont été réalisées en utilisant :

Vista (The Visual Statistics System), version 6.4, (2001)

Past, version 0.45, (2001)

Le test Newman et Keuls pour la comparaison des moyennes a été effectué par le logiciel *STATISTICA*, version 5.1

Graphpad Prism (version 4.00) a servi pour établir quelques figures.

5-3 Le Logiciel « Budget »

« *Budget* » avec sa base de données est un modèle de simulation qui a été déjà utilisé à Tunis. Il est utilisé pour la première fois en Algérie. Ce logiciel conçu en 2004 est la propriété de la faculté d'agriculture et des sciences biologiques appliquées de l'université de Leuven, Belgique. C'est un logiciel téléchargeable (*freeware*) sur son site: <http://www.iupware.be>, d'une capacité de 1.76 Mo.

Budget comporte une base de données de paramètres par défaut, relative à certains types de culture, de sols et de climats et permet aux utilisateurs d'établir leur propre simulation en introduisant leurs données. Le logiciel peut faire des simulations du comportement de l'état hydrique du sol et de la cinétique de croissance du végétal. Il permet également de calculer les différentes composantes du bilan hydrique du sol, la période de stress hydrique et peut même prédire le rendement. Il a un programme accessoire « *ETo* version 1.0 » qui permet d'estimer l'évapotranspiration potentielle de référence.

5-3-1 Paramétrage optimal du logiciel

Afin d'approcher les conditions réelles, le paramétrage du logiciel « *Budget* » a été optimisé au maximum sur la base du continuum climat, sol, culture.

5-3-2 Climat

Le paramétrage de l'évapotranspiration a été réalisé sur la base des données calculées par le logiciel « *ETo* » en utilisant l'équation de Penman Monteith (FAO). Les précipitations sont introduites quotidiennement et directement sur « *Budget* ».

5-3-3 Sol

Le choix du type de sol a été fait sur la base du modèle prédéfini par le logiciel, tout en ajustant les critères propres au sol du site expérimental :

- une texture argilo limoneuse prend les paramètres suivants par défaut :

a- le point de saturation (SAT) = 50 (vol%)

b- le capacité au champ (FC) = 39 (vol%)

c- le point de flétrissement (WP) = 23 (vol%)

d- le coefficient de drainage (τ) = 0.4

e- le coefficient de saturation (Ksat) = 70 (mm/Jour)

*sol lourd homogène (sans couches distinctes) d'une profondeur supérieure à 1 m.

* sol à faible pente sans ruissellement important.

5-3-4 Culture

- Le type de culture annuel choisi par défaut est un blé d'hiver cultivé en sec.

- La période de croissance est ajustée en relation avec celle de notre essai (170 jours pour les variétés précoces et 176 jours pour les variétés locales).

- Le paillage à 0%, puisque, un désherbage manuel est souvent pratiqué.

- Le stress hydrique vis-à-vis d'une culture à tolérance modérée, ayant un ratio de correction en pourcentage de l'évapotranspiration (P) = 0.55 ; ce module comprend une série de sous modules qui traitent la rhizosphère.

a - Un sous module d'extraction racinaire est supposé linéairement régressif avec des correspondances de 40%, 30%, 20% et 10% relatives aux profondeurs 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm et 75-100 cm respectivement de la zone racinaire.

La profondeur maximale de la rhizosphère est paramétrée à un mètre pour les variétés précoces et 1.5 mètre pour les variétés locales.

b - Le coefficient cultural (Kc) est une composante essentielle pour le calcul de l'évapotranspiration. Elle tient en compte le type de culture et le stade de développement. Le calibrage du Kc est maintenu par défaut sur un intervalle allant de 0.17 pour les stades initiaux de croissance jusqu'à 1.15 correspondant aux stades de pleine végétation.

5-4 Mesures et notations effectuées

5-4-1 Paramètres climatiques

5-4-1-1 Température et pluviométrie

La pluviométrie ainsi que les minima et maxima de température sont enregistrés quotidiennement au niveau d'une station proche du site expérimental.

5-4-1-2 Humidité du sol

Un prélèvement de sol est effectué par décade à l'aide d'une tarière pédologique sur une profondeur de 1 mètre. Pour chaque prélèvement, cinq échantillons de terre sont constitués, soit un échantillon par niveau de profondeur de 20cm et ceci durant tout le cycle végétatif. Les échantillons sont pesés à l'état frais et passés à l'étuve à 85°C pendant 48h pour déterminer l'humidité du sol.

5-4-2 Notations et mesures des composantes

5-4-2-1 Levée et épiaison

Les dates de la levée sont notées pour chaque génotype, à l'apparition de 50% de plants levés ou épiés à partir du 11-01-2007 et du 12-05- 2007 respectivement.

5-4-2-2 Chlorophylle totale

Les mesures de la chlorophylle effectuées sur champs, le 10 mai, le 28 mai et le 14 juin, par un *chlorophyllmeter* (SPAD Minolta 5.1) sur la face abaxiale de la feuille drapeau.

La lecture finale étant la moyenne de dix mesures pour chaque variété, ces lectures sont données en unité (SPAD). Un échantillon ayant déjà subi une mesure au SPAD a fait l'objet d'une analyse de la chlorophylle par la méthode au solvant DMSO (diméthyle-sulfoxyde) sur un témoin pour définir la quantité de la chlorophylle a, b et totale.

L'analyse DMSO de la chlorophylle repose sur les équations d'Arnon (1949) :

$$\text{Chlorophylle a } (\mu\text{mol /g}^{-1} \text{ MF}) = 0.0127 \times A663 - 0.00269 \times A645$$

$$\text{Chlorophylle b } (\mu\text{mol /g}^{-1} \text{ MF}) = 0.0229 \times A645 - 0.00468 \times A663$$

$$\text{Chlorophylle Totale } (\mu\text{mol /g}^{-1} \text{ MF}) = 0.0202 \times A645 + 0.00802 \times A663$$

La conversion des unités SPAD en g/l de la chlorophylle totale est établie sur la

base des données obtenues au laboratoire. Schepers *et al.*(1992), Dwyer *et al.* (1994), Smeal *et al.* (1994), et Westcott *et al.* (1995) notent que les valeurs SPAD surestiment légèrement la teneur en chlorophylle réelle.

5-4-2-3 Surface et poids spécifique de la feuille drapeau

Dix feuilles étendards de chaque variété sont coupées à la base du limbe après l'arrêt de la croissance, puis photographiées à l'aide d'un appareil photo numérique (FujiFilm à 3 méga pixels de résolution), chaque photo est traitée par le logiciel Image Tools 3.00 pour le calcul de la surface foliaire.

Les feuilles sont ensuite mises à l'étuve à 85°C pendant 48 heures pour avoir leur poids sec. Le poids spécifique de chaque variété est exprimé par le rapport du poids de la feuille (g) sur sa surface (cm²).

5-4-2-4 Hauteur de la paille

Cette mesure effectuée le 22-06-2007 sur 5 gerbes prises aléatoirement le long des stations de suivi. La mesure ne prend pas les barbes en compte.

5-4-2-5 Remplissage du grain

Pour l'étude de la cinétique de croissance du grain au cours de la période de remplissage. 10 grains du tiers médian de l'épi ont été prélevés sur 10 épis soit au total 100 grains/variété forme l'échantillon de chaque prise tous les deux jours jusqu'à la maturité physiologique et ce depuis le 16-06-2007. Les grains sont pesés à l'état frais ensuite mis à l'étuve à 85°C pendant 48 heures, puis repesés.

5-4-2-6 Récolte

La récolte des variétés précoces a été effectuée le 02-07-2007 et celle des variétés tardives le 08-07-2007. Toutes les stations destinées au calcul des composantes de rendement sont récoltées à part.

5-4-2-7 Critères isotopiques du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$)

Après récolte, on constitue un échantillon de 2 gramme par variété à partir de trois prélèvements de grains bien broyés des parcelles élémentaires. Ces échantillons sont envoyés aux laboratoires de Seibersdorf à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) à Vienne, (Autriche) ; Pour analyse par spectrométrie de masse (Spectrométrie de masse Optima, GV Instruments, Manchester, UK). Afin de calculer le rapport isotopique (R), la composition isotopique $\delta^{13}\text{C}$ et la discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$)

CHAPITRE 6. RESULTATS ET DISCUSSION

6-1 Résultats

6-1-1 Températures :

Les températures moyennes mensuelles de la saison 2006/07 du site expérimental sont similaires à celles des périodes 1932/1972 et 1982/2005 (Figure 1).

Le mois de Mars de la campagne 06-07 était plus frais (la différence entre les températures moyennes mensuelles des trois périodes est de 2.5 °C) ; Durant ce même mois, on a enregistré quatre jours de neige et des températures moyennes journalières trop basses allant de -1°C à -3°C pendant quatre jours successifs.

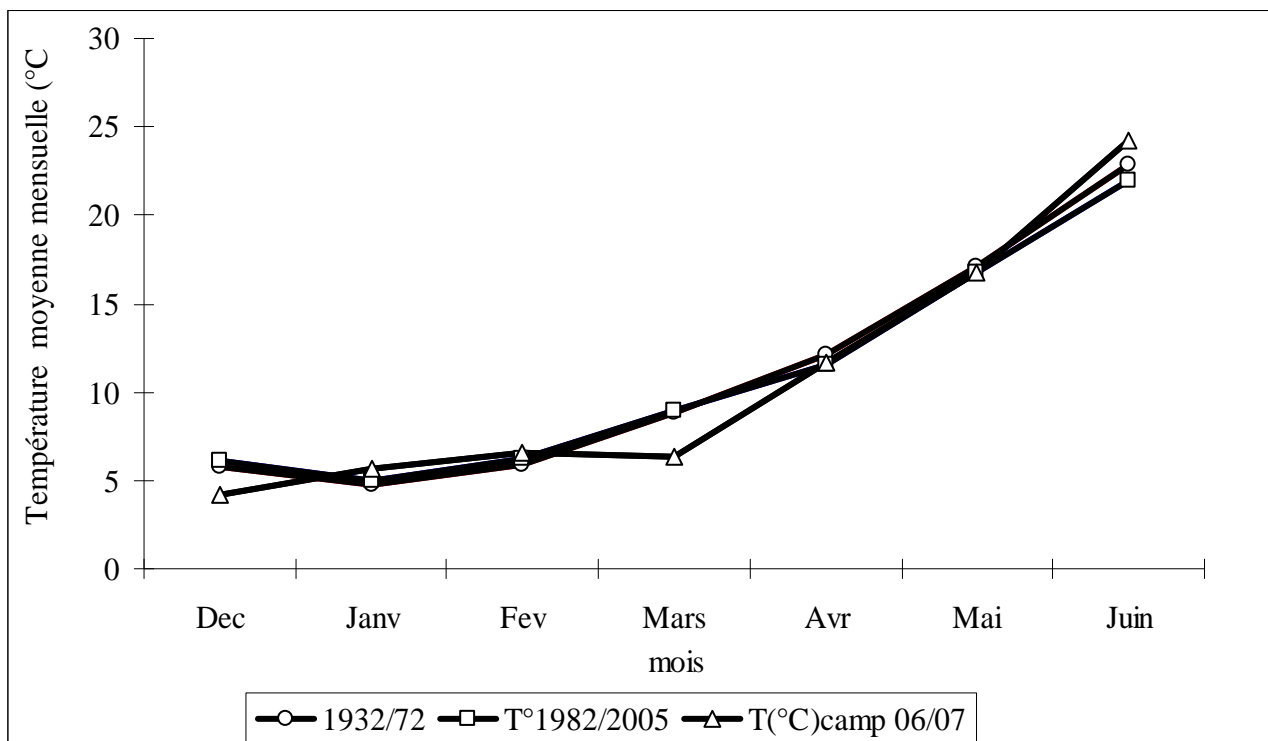


Figure 1. Températures mensuelles du cycle végétatif de trois périodes comparatives (1932/72), (1982/2005) et (camp 2006/07)

6-1-2 Pluviométrie

La comparaison de la pluviométrie entre la saison 2006/07 et la période 1982/2005 montre des différences sur le plan de la quantité et de la répartition (Figure 2). La saison 2006/07 peut être qualifiée d'exceptionnelle et caractéristique du climat méditerranéen de par son irrégularité inter saisonnière.

La quantité de pluie enregistrée durant les trois mois de février, mars et avril de la campagne 06/07 était de 324mm, elle dépasse de loin la quantité de pluie enregistrée durant les six mois d'hiver et de printemps (240mm) de la période 1982-2005. Mais cette abondance pluviométrique décroît en deçà de la moyenne à partir du mois de Mai jusqu'à la fin du cycle, coïncidant avec la période de floraison et de remplissage du grain,

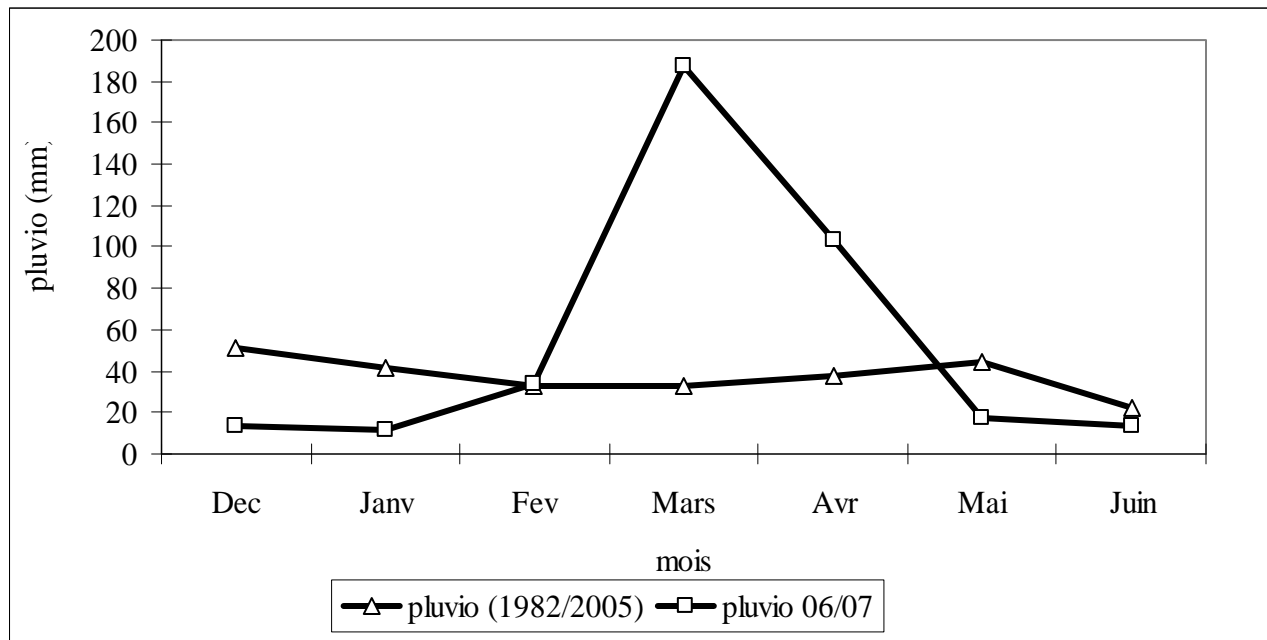


Figure 2. Pluviométrie mensuelle de la campagne 2006/07 et la période 1982-2005

En outre, la comparaison des deux diagrammes Ombrothermiques (Figure 3) et (Figure 4) montre que la saison sèche au cours de la campagne 2006/07 a débuté plutôt (début Mai), par contre elle commence vers la fin du mois pour à la période 1982/2005.

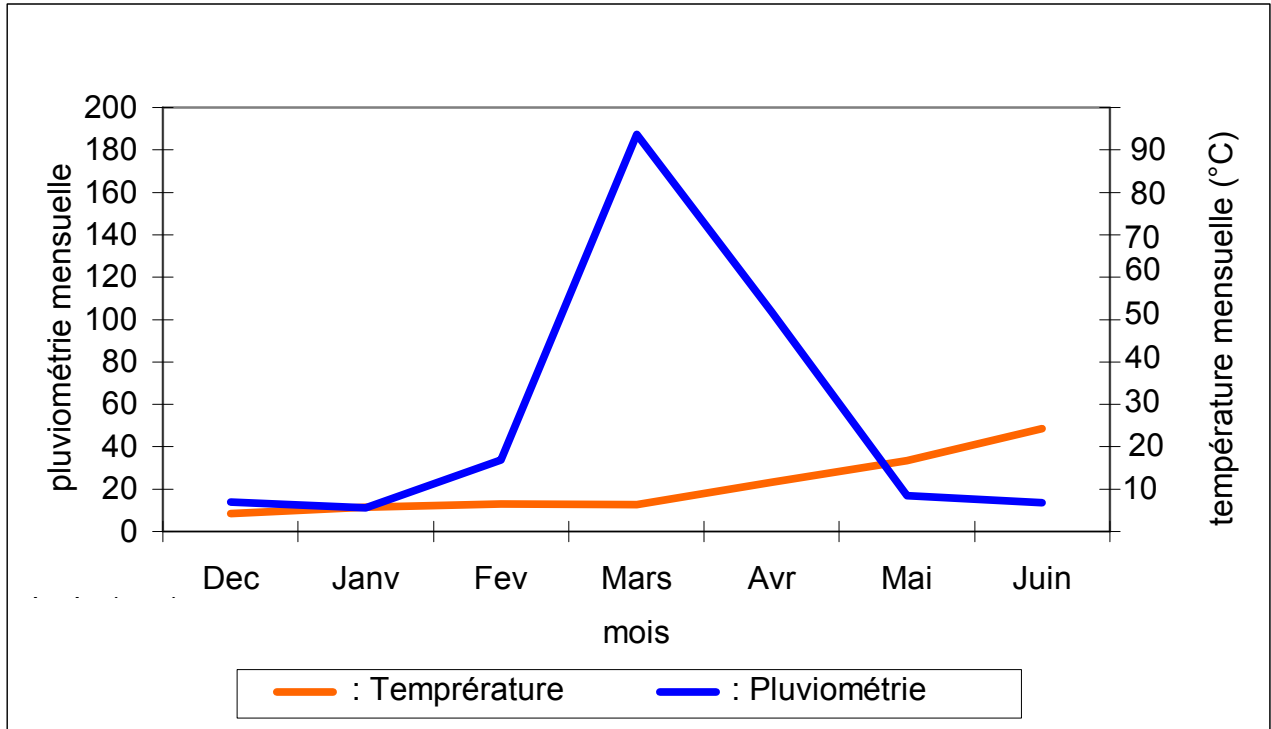


Figure 3. Diagramme ombrothermique campagne (2006/07)

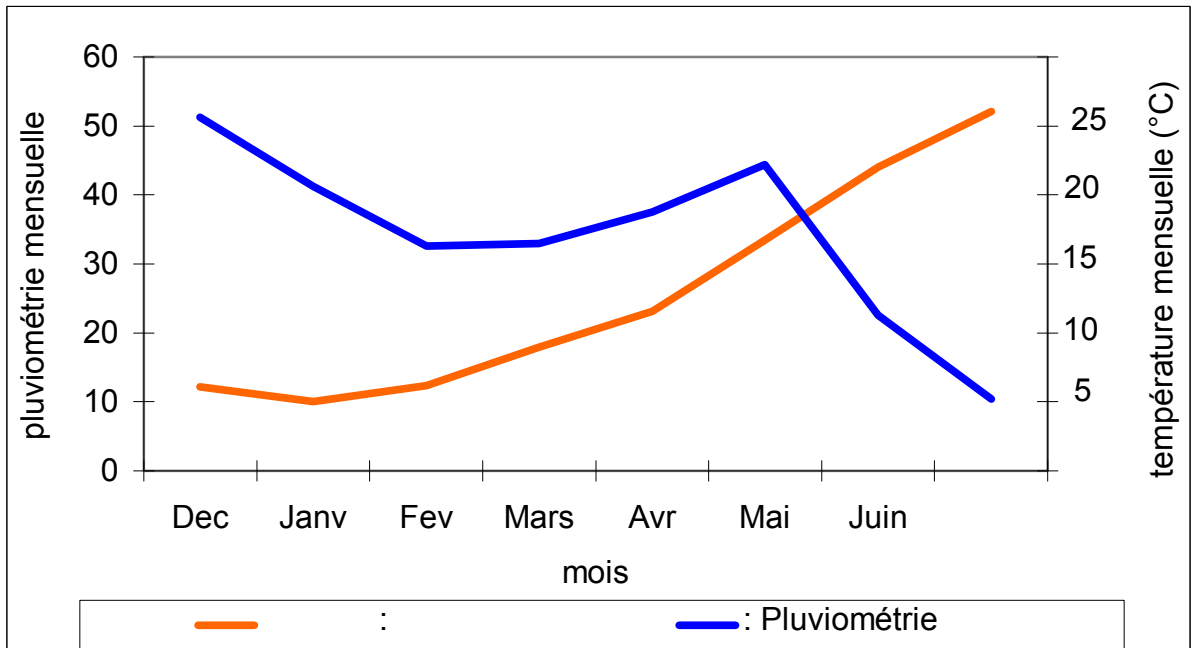


Figure 4. Diagramme ombrothermique de la période 1982-2005

6-1-3 Humidité du sol

Le suivi de l'humidité pondérée du sol par décade au cours du cycle végétatif sur les cinq niveaux de profondeur, montre de grandes fluctuations allant de 13.65% à 36.61% (figure 5)

Ces variations sont le résultat de l'interaction de la composante "pluie, température, vent, radiations " avec le stade de développement de la culture.

Les variations de ces teneurs en eau sont aussi fonction de l'interaction complexe entre les mécanismes hydraulique du sol (remontée capillaire, percolation, drainage) d'une part et le développement racinaire d'autre part.

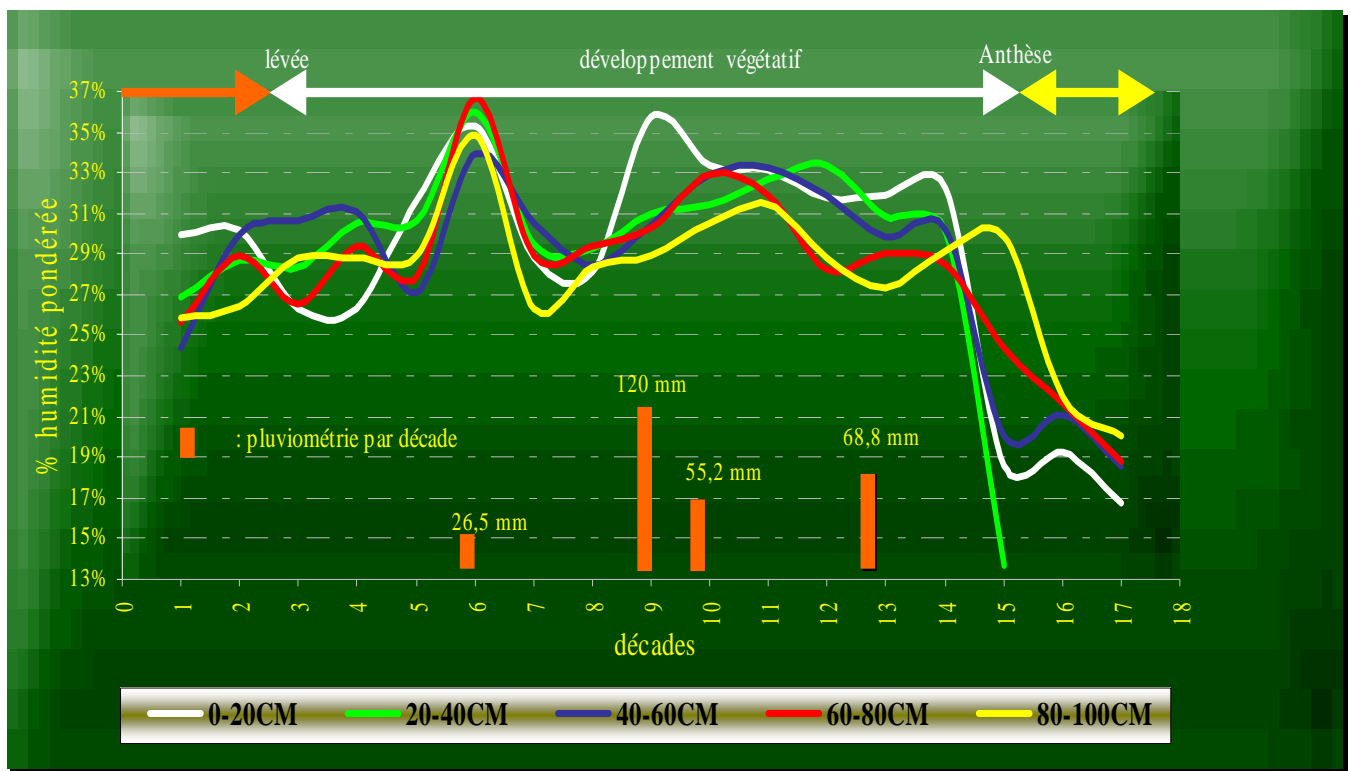


Figure 5. Fluctuation de l'humidité pondérée (observée) du sol au cours du cycle végétatif

6-1-4 Levée

Les variétés tardives (locales) ont été plus précoces à la levée que les variétés introduites. Oued zenati et Polonicum ont levé respectivement 22 et 24 jours après semis. La levée des variétés introduites a lieu un jour en plus en moyenne.

6-1-5 Epiaison

L'épiaison était relativement distincte au sein des variétés précoces, Mexicali a épié 123 jours après levée et est classé au premier rang, Altar et Waha au deuxième rang avec 124 jours après la levée, au troisième rang Sooty avec 126 jours après la levée, au quatrième rang Kucuk avec 127 jours après la levée et enfin Oued Zénati et Polonicum au dernier rang avec 131 et 129 jours après levée respectivement. (Tableau 1).

Tableau 1. Chronologie de la levée, l'épiaison et de la floraison

Variétés	Levée (jours après semis)	Epiaison (jours après levée)	Floraison (jours après levée)
Altar	24,12	123,34	127,34
Dukem	25,40	127,36	129,36
Kucuk	25,02	126,30	129,30
Mexicali	25,12	122,69	126,69
Oued Zenati	21,69	130,94	135,94
Polonicum	24,46	129,56	134,56
Sooty	25,12	125,28	129,28
Waha	25,80	123,38	127,38

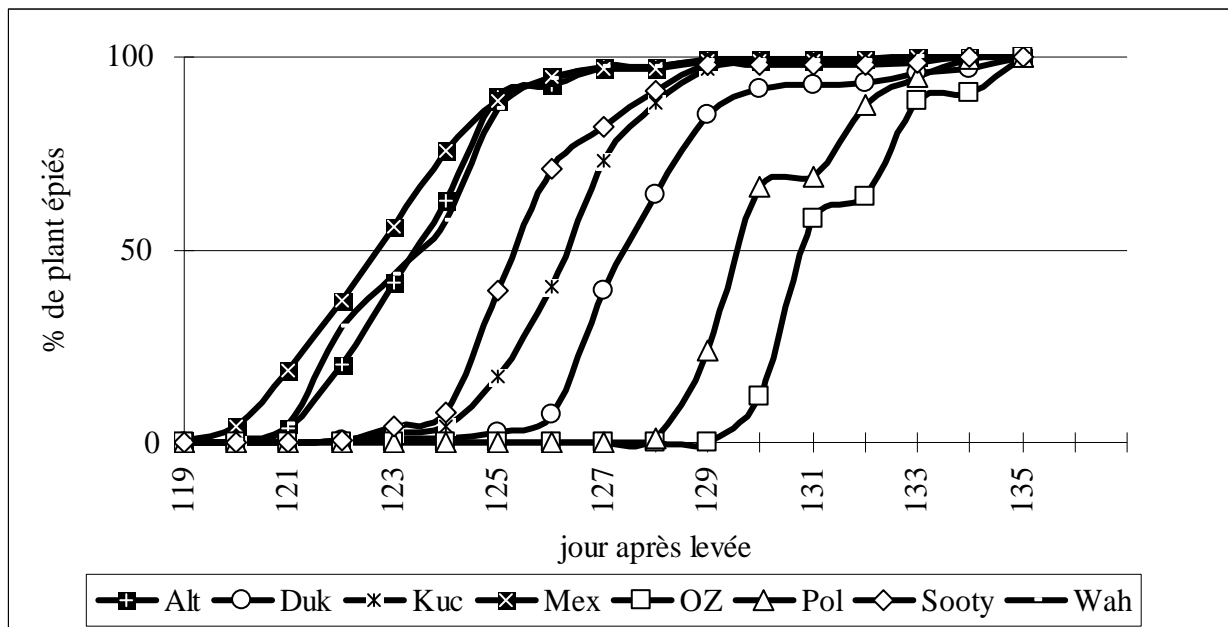


Figure 6. Evolution de l'épiaison (%)

6-1-6 Teneur en chlorophylle

L'analyse de la chlorophylle montre des différences en quantité entre les variétés. Oued Zenati et Polonicum ont les teneurs les plus faibles $6.29 \mu\text{molg}^{-1}\text{MF}$ et $6.40 \mu\text{molg}^{-1}\text{MF}$ respectivement. Les variétés précoces Sooty et Dukem enregistrent des moyennes supérieures $7.72 \mu\text{molg}^{-1}\text{MF}$ et $7.70 \mu\text{molg}^{-1}\text{MF}$ respectivement.

Sur les trois mesures effectuées, Sooty, Waha et Kucuk présentent des valeurs croissantes de chlorophylle alors le reste des génotypes voit leur teneur régresser à la troisième lecture qui coïncide avec la phase post anthèse.

Le rendement grain des différentes variétés semble être associé aux valeurs SPAD ($r = 0.601$) ; ce même constat est rapportée par Singh *et al.*,(2002) chez le blé (Figure 7).

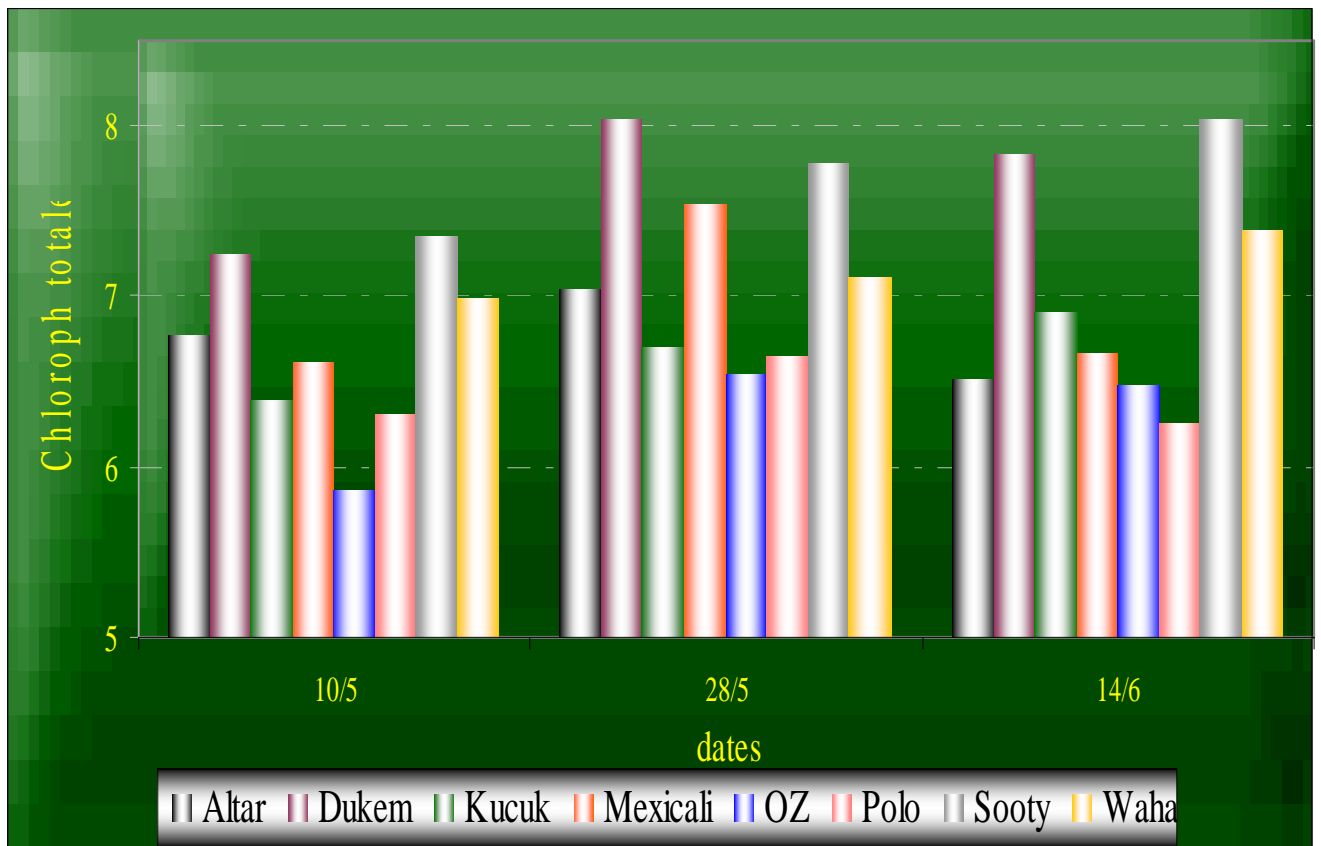


Figure 7. Evolution de la teneur de la chlorophylle totale de la feuille drapeau

6-1-7 Hauteur de la paille

A titre indicatif, Oued Zenati et Polonicum et Dukem enregistrent respectivement 124.28 cm ,124.4 cm et 80.8 cm.

6-2 Discussion

6-2-1 Rendement grain

Le rendement grain moyen du groupe de variétés tardives représenté par Oued Zenati et Polonicum diffère significativement du groupe de variétés précoces (Tableau : A2), Alors que la comparaison des moyennes, montre que Oued zenati se distingue de toutes les variétés (Tableau 2).

Tandis que l'analyse de la variance entre les géotypes précoces ne montre pas de différences significatives. Leurs rendements moyens sont respectivement de 49.75 et 67.46 q/ha. Les variétés Altar et Oued Zenati enregistrent le meilleur et le plus faible rendement avec 72.04 et 45.12 q/ha respectivement (Tableau : A2).

Tableau 2. Comparaison de moyennes par Test de Newman et Keuls

	Rendement grain (q/ha)	fertilité	PMG (g)	EPI/M ²	<i>HI</i>
Altar	(72,04) a	(38) b	(40.62) ab	(536) ab	(0.4) a
Dukem	(67,71) a	(45) a	(28.98) b	(601) ab	(0.37) a
Kucuk	(61,96) a	(44) a	(33.86) ab	(518) ab	(0.37) a
Mexicali	(70,44) a	(34) b	(38.7) ab	(619) a	(0.39) a
Sooty	(64,43) a	(48) a	(30.09) ab	(571) ab	(0.36) a
Waha	(68,22) a	(47) a	(31.75) ab	(524) ab	(0.39) a
OZ	(45,12) b	(33) b	(44.39) a	(381) b	(0.23) b
Polo	(54,38) ab	(36) b	(42.41) ab	(416) ab	(0.4) b

NB: les moyennes ayant une lettre en commun ne sont pas différentes significativement au seuil de 5%

6-2-1-1 Rendement grain et précocité

Le timing des événements phénologiques représente un facteur important pour l'adaptation dans un environnement donné (Richards, 1991; Shorter *et al.*, 1991). En zone méditerranéenne, la période de floraison optimale en condition pluviale, pour les blés se trouve bornée par les gelées précoces printanières d'une part et d'autre part par la

sécheresse tardive et le stress thermique qui coïncide avec la phase de remplissage. La transition des variétés locales tardives vers les variétés modernes (précoces) grâce aux efforts d'amélioration, chez le blé dur a été caractérisée par une avancée dans la date de floraison (Blum *et al.*, 1989; Motzo *et al.*, 2004), mais les conséquences d'une floraison précoce sur les événements phénologiques qui précèdent la floraison sont peu connues et de même sur les mécanismes par lesquels cette précocité est régie.

Dans notre cas, le rendement grain des variétés précoces est négativement corrélé au nombre de jours d'épiaison et de floraison (jours après levée) ($r = -0.909$) et ($r = -0.963$) respectivement et évidemment pour toutes les génotypes (Figure 8).

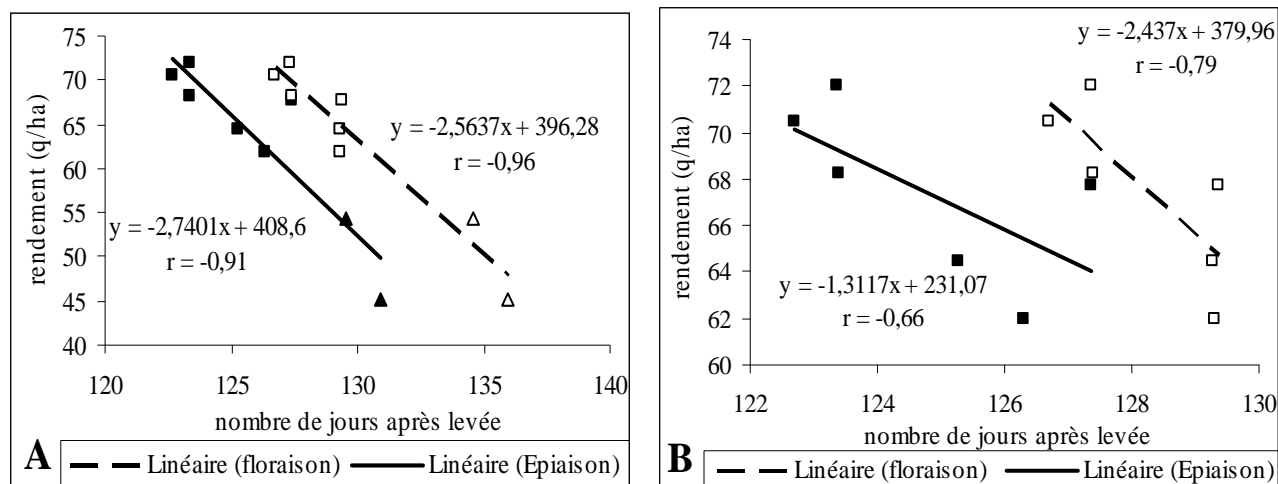


Figure 8. Relation entre précocité et rendement grain

(A : Toutes les variétés) (B : Variétés précoces)

NB : les variétés précoces sont représentées par des carrés et les variétés locales par des triangles.

La variation dans le rendement grain, au sein du même environnement et entre des environnements différents, est corrélée d'une manière consistante au nombre de grains plutôt qu'au poids du grain (Shanahan *et al.*, 1984), avec toutefois une plus grande diminution du poids du grain par rapport au nombre de grains en cas de stress hydrique en post-anthèse (Fischer and Maurer, 1978). Les génotypes qui épient et fleurissent tôt peuvent échapper au risque de stress hydrique et ainsi établir un potentiel large pour la taille du grain mais leur courte croissance végétative pourrait induire une plus faible fertilité de l'épi (Gebeyehou *et al.*, 1982) et une grande exposition aux gelées.

6-2-1-2 Fertilité

Fischer and HilleRis-Lambers (1978) ont montré que chez les génotypes de blé dur, une amélioration du nombre de grains par épi et du poids du grain a été réalisée grâce à une amélioration de la capacité photosynthétique en post-anthèse réduisant ainsi le risque d'un mauvais remplissage du grain. Dans une expérience menée par Mc Neal *et al.*, (1978), une réponse négative a été obtenue pour le nombre de grains quand la sélection s'est faite sur la base du poids du grain et une augmentation linéaire significative du poids du grain quand la sélection s'est faite sur le nombre de grains par épi.

La fertilité épi et poids de mille grains sont négativement corrélés, chez les variétés précoces ($r = -0.9$) et chez l'ensemble des génotypes ($r = -0.93$).

L'association entre le rendement et le PMG est négative pour l'ensemble des variétés ($r = -0.541$) ; Ainsi, Blum and Pnuel, (1990) ; Debaeke *et al.*, (1996) considèrent que le rendement grain du blé est plus lié à la fertilité de l'épi qu'à la taille du grain.

La fertilité de l'épi est la composante qui a été marquée par une variation importante ($C_v = 14.99\%$), Sooty a une fertilité épi de 48 grains tandis que Oued Zenati n'a que 33 grains. La comparaison des moyennes fait ressortir 2 groupes distincts à savoir (Waha, Dukem, Kucuk et Sooty) et (Altar, Mexicali, Polonicum et Oued Zenati).

Cette variation est peut être la résultante des conditions climatiques défavorables lors de la floraison, où la fécondation des variétés ayant des taux bas de fertilité (Altar et Mexicali) coïncidant avec des jours ayant des minima de températures de 8°C , cette température pourrait empêcher la fécondation ou même provoquer l'avortement.

6-2-1-3 Poids de mille grains (PMG)

Le nombre de grains par unité de surface est la composante la plus liée aux variations du rendement grain du blé (Frederick and Bauer, 1999) et par conséquent, le poids moyen du grain peut être une importante source de variation du rendement grain (Calderini *et al.*, 2001), particulièrement dans les régions caractérisées par des stress. (Acevedo *et al.*, 1999).

Les variétés locales enregistrent des valeurs de PMG élevées avec 44.39 g et 42.41 g pour Oued Zenati et Polonicum respectivement, Dukem se distingue du reste du groupe significativement avec un PMG de 28.98 g (tableau 2)

Une association négative est enregistrée entre le rendement grain et le PMG de l'ensemble des variétés ($r = -0.541$). Housley *et al.*, (1982); Bruckner and Froberg, (1987) ; notent que l'absence de relation significative entre le rendement et le PMG.

Elhani *et al.*, (2007) rendent cette association en conditions pluviales au stress hydrique en post anthèse et particulièrement lors du remplissage grain.

Alors qu'entre les variétés précoces est positive ($r = 0.61$) ; De résultats similaires ont été reportés par del Blanco *et al.*, (2001) et Ozturk and Aydin (2004), qui montrent une corrélation positive entre le PMG et le rendement

6-2-1-4 Nombre d'épi par m²

Les travaux sur le tallage épi et sa contribution à l'élaboration du rendement grain chez les génotypes de blé dur en conditions méditerranéennes ne sont pas nombreux.

La compréhension de cette contribution peut aider à la sélection des génotypes adaptés et hautement productifs. (Elhani *et al.*, 2007).

Le rendement grain a été fortement corrélé avec le nombre d'épis par m² ($r = 0.88$). Le nombre d'épis a été de 561.40 et 398.46 épi/m² pour les groupes de variétés précoces et locales respectivement (tableau A6). La comparaison des moyennes des deux groupes montre que la différence existe uniquement entre Mexicali et les deux variétés locales et entre Dukem et Oued Zenati.

Moragues *et al.*, (2006) notent que les génotypes évoluant dans les régions froides et humides produisent plus de talles par rapport aux génotypes des régions plus sèches (comparaison faite entre les variétés de la rive nord et sud de la méditerranée).

6-2-1-5 Indice de récolte

Le rendement grain peut être exprimé comme étant le résultat de trois processus physiologiques : les radiations interceptées par les organes photosynthétiques, la conversion des radiations interceptées en matière sèche et la répartition de cette matière sèche sous forme d'un indice de récolte (*Harvest Index*) (Hay and Walker, 1989).

Le premier processus est lié à la surface photosynthétique et par conséquent à l'indice foliaire ; le second est lié à l'efficacité photosynthétique. La biomasse totale est le résultat de ces deux processus. L'indice cultural est le ratio entre le rendement grain et la

biomasse aérienne (Donalds *et al.*, 1976 ; Hay, 1995), son amélioration peut être atteinte à travers une amélioration du poids du grain et/ou du nombre de grains/épi (Passioura, 1977).

Le meilleur indice de récolte enregistré dans notre étude est celui de la variété Altar de 0.40 avec un rendement grain de 72.04 q/ha. La variété locale Oued Zenati avec un indice de 0.23 un rendement grain de 45.12 q/ha se classe en dernier.

Le rendement grain est fortement corrélé à l'indice de récolte pour tout le lot de variétés expérimentées ($r = 0.967$). L'ensemble des variétés précoces dans notre cas a enregistré un indice de récolte (*HI*) supérieur à celui des variétés locales allant dans le même sens que les travaux de Merah *et al.*, (2001) dans une étude de comparaison des performances de variétés locales et améliorées.

La comparaison des moyennes montre deux groupes de moyennes distincts ; celui des variétés précoces et tardives ($P < 0.001$) (tableau A6). En effet, les deux variétés tardives Oued Zenati et Polonicum diffèrent entre elles significativement, elles enregistrent des indices de 0.23 et 0.27 respectivement.

6-2-2 Discrimination isotopique du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$)

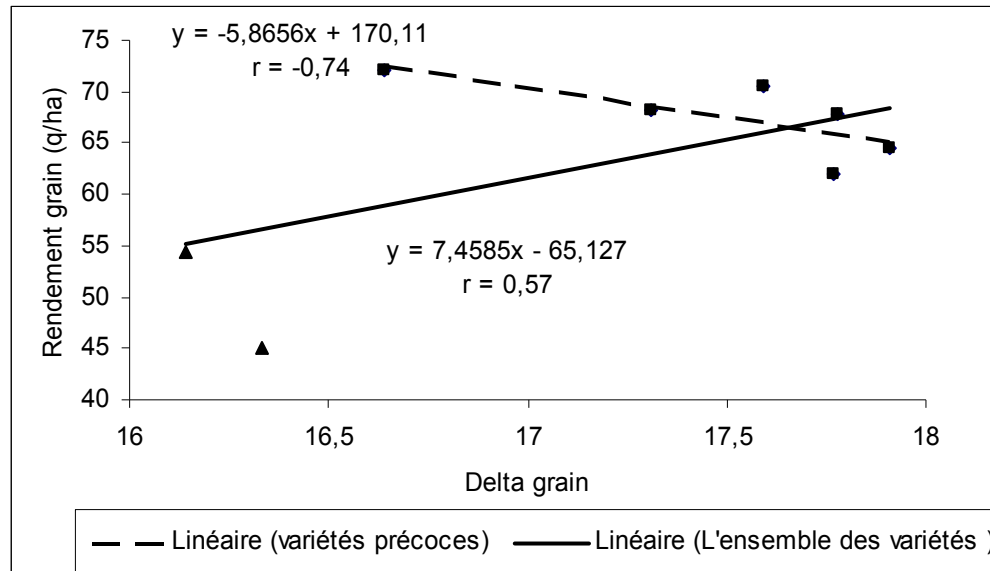
Les variétés précoces ont des valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ supérieures à celles des variétés tardives. Une association positive est notée entre le rendement grain de l'ensemble de variétés et les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ ($r = 0.57$). Ce résultat confirme les travaux de Monneveux *et al.*, (2001) ; Teulat *et al.*, (2001) ; Hafsi *et al.*, (2001) ; Merah *et al.*, (2002) ; Tokatlidis *et al.*, (2004).

L'analyse de variance montre une différence significative entre l'ensemble de variétés ($P < 0.0001$) (Tableau A5 N°6)

Cependant, cette association est négative entre les variétés précoces ($r = -0.74$) ; Ainsi, en conditions pluviales et en situation de stress hydrique modéré à intense Hafsi *et al.*, (2003 et 2007) n'observent pas de corrélation entre le rendement grain et la discrimination isotopique du carbone.

Tous ces travaux conduits en conditions méditerranéennes, mettent le point sur le caractère prédictif du $\Delta^{13}\text{C}$ où il est souvent suggéré comme critère de sélection. L'efficacité transpiratoire étant définie par Richards, (1999) par le rapport entre la

biomasse et la transpiration. Les valeurs de la discrimination isotopique grain ($\Delta^{13}\text{C}$) sont corrélées négativement avec l'efficacité transpiratoire ($r = -0.93$) entre les variétés précoces ; Un résultat similaire a été observé en conditions pluviales chez le blé (Ismail et al; 1993)



**Figure 9. Relation entre le rendement grain et le $\Delta^{13}\text{C}$
(Toutes les variétés et les variétés précoces)**

NB : les variétés précoces sont représentées par des carrés et les variétés locales par des triangles.

6-2-3 Surface foliaire

Pour réduire leurs besoins hydriques en conditions de déficit hydrique, certaines variétés diminuent la surface du limbe (Darera *et al.*, 1969).

Pour Adjab (2002), l'augmentation de la surface foliaire du blé soumis à un stress modéré où sévère pourrait être un caractère d'adaptation.

Une corrélation négative ($r = -0.72$) entre toutes les variétés est enregistrée entre la surface foliaire de la feuille drapeau et le rendement grain ; Alors qu'elle est insignifiante entre les variétés précoces.

6-2-4 Poids spécifique de la feuille (PSF)

Le déficit hydrique peut engendrer un épaissement de la feuille (Kramer, 1969). En effet, Dubey, (1994) pense que l'augmentation du poids spécifique foliaire chez les plantes stressées est due au rétrécissement des cellules qui provoque une diminution du volume et même du suc intracellulaire ce qui le rend plus concentré.

Dans une étude sur des cultivars de riz, Cabuslay *et al.* (2002) ont montré que le stress hydrique agit positivement sur le poids spécifique et la corrélation du poids spécifique avec le rendement est positive. Des résultats similaires ont été obtenus sur l'avant dernière feuille chez l'orge (Bort *et al.*, 1998) et chez le blé (Araus *et al.*, 1997). La même relation est observée dans notre cas pour l'ensemble des variétés ($r = 0.62$) et entre les variétés améliorées seules ($r = 0.89$) (Figure 10).

A titre indicatif, les variétés Sooty et Altar ont des PSF de $477 \cdot 10^{-5}$ et $641 \cdot 10^{-5}$ g/cm² respectivement et ceux, sont les valeurs extrêmes de PSF des variétés testées.

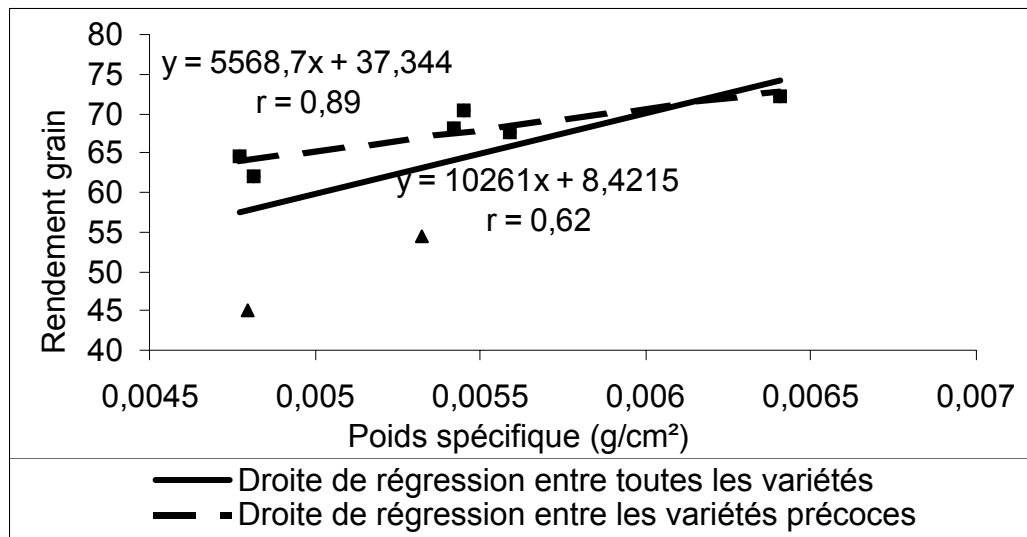


Figure 10. Relation entre le rendement grain et le poids spécifique (Variétés précoces et l'ensemble des variétés)

NB : les variétés précoces sont représentées par des carrés et les variétés locales par des triangles.

6-1-5 Hauteur de la paille

La hauteur de la paille était négativement corrélée avec le rendement ($r = -0.88$) (Figure 11). Et les variations du rendement sont expliquées à 78.81% par la hauteur de la paille, Machado *et al.*, (2002) rapportent que la hauteur explique 61% des variations de rendement chez le maïs.

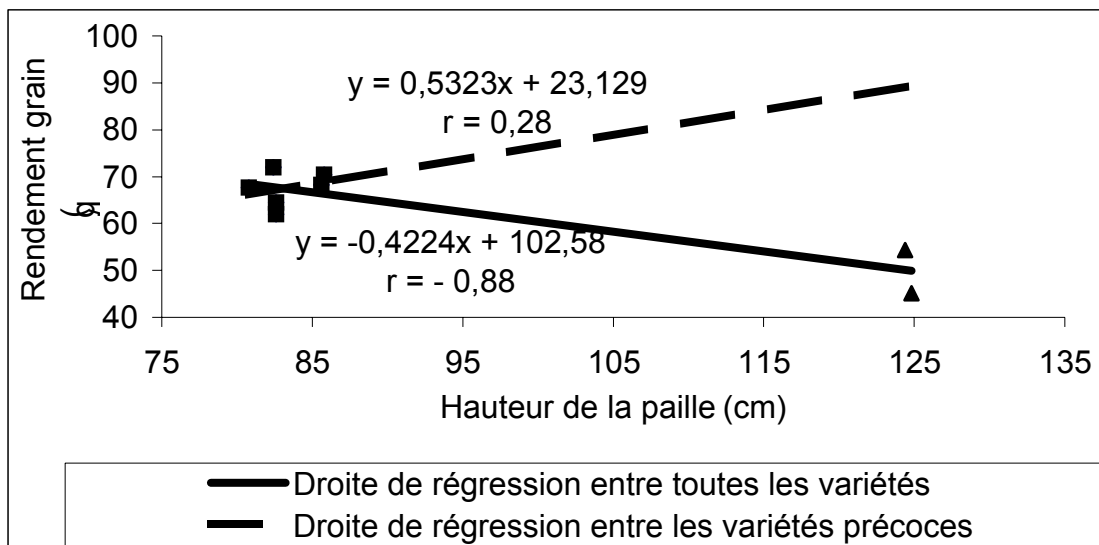


Figure 11. Relation entre le rendement grain et la hauteur de la paille

NB : les variétés précoces sont représentées par des carrés et les variétés locales par des triangles.

6-2-6 : Vitesse de remplissage de grain

Chez les céréales, la durée de remplissage est déterminée principalement par les températures (Sofield *et al.*, 1977; Slafer and Rawson, 1994; Wheeler *et al.*, 1996).

Pour les blés, les températures élevées (>31°C) en post anthèse peuvent affecter le remplissage du grain (Al-Khatib and Paulsen, 1984; Randall and Moss, 1990; Stone *et al.*, 1995; Wardlaw and Moncur 1995), cependant, l'action de la température avant la floraison peut affecter aussi le rendement grain (Wardlaw *et al.*, 1989; Tashiro and Wardlaw, 1990; Hunt *et al.*, 1991).

Les températures élevées au moment de l'anthèse peuvent réduire la fertilité ainsi que l'indice de récolte (Wheeler *et al.*, 1996). Le déficit hydrique lors de l'anthèse ou le début du remplissage, peut également affecter le poids du grain par l'inhibition de la translocation des assimilats des parties végétatives vers les épis (Wang *et al.*, 2005).

Le suivi de l'accumulation de la matière sèche du grain a montré différentes cinétiques pour les variétés testées (Figure 13), en effet les vitesses de remplissage exprimées à partir des pentes de régression ont mis en évidence plusieurs niveaux de translocation en fonction des cumules de température.

Tableau 3. Vitesses de remplissage, le rendement et le PMG des différentes variétés

Variété	Pente ou vitesse de remplissage (matière sèche cumulée en fonction de températures cumulées)	Rendement grain (q/ha)	PMG (g)
Altar	0,2701	72,04	40,619
Dukem	0,2078	67,713	28,983
Kucuk	0,1749	61,956	33,865
Mexicali	0,176	70,444	38,697
Oued Zenati	0,1259	45,123	44,392
Polonicum	0,1295	54,38	42,413
Sooty	0,2088	64,432	30,093
Waha	0,2617	68,218	31,749

La figure 12 montre une corrélation positive ($r = 0.81$) entre le rendement et la vitesse d'accumulation en fonction des températures cumulées, où les variétés précoces enregistrent tous des pentes supérieures à celles des variétés locales, Altar enregistre la pente la plus élevée de 0.27 et Oued zenati la plus faible de 0.125.

L'explication de ces performances des génotypes améliorés est due à l'esquive par le raccourcissement de la durée du cycle (Sayre *et al.* 1995).

Ainsi, Randall and Moss, (1990); Hawker and Jenner, (1993); Stone and Nicolas, (1994) notent que plus de 23% de la réduction du rendement grain dans différentes expérimentations était due à l'exposition à des températures extrêmes durant quatre jours consécutifs en période de remplissage du grain.

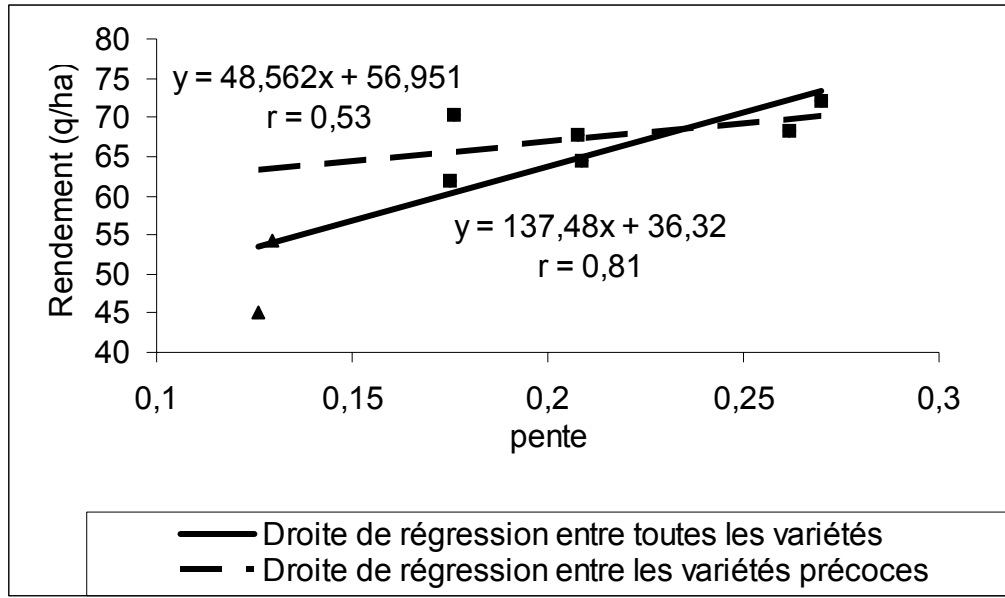


Figure 12. Relation entre le rendement grain et la pente de remplissage (Toutes les variétés et les variétés précoces)

NB : les variétés précoces sont représentées par des carrés et les variétés locales par des triangles.

Il semble que les températures élevées qui ont caractérisé la période de remplissage du grain aient eu un effet réducteur du poids du grain. En effet, une corrélation négative ($r = -0.50$) entre le PMG et les vitesses de remplissage est notée traduisant l'action négative des cumuls élevés de températures durant une échelle réduite de temps à savoir la période du remplissage du grain dans notre cas.

Abayomi *et al.*, (1999) rapportent aussi, que les effets du stress hydrique sur le blé sont plus graves lorsqu'ils interviennent aux stades tardifs du développement de la plante et du remplissage ; La sénescence tardive des feuilles des variétés locales est probablement la raison qui a favorisé le PMG.

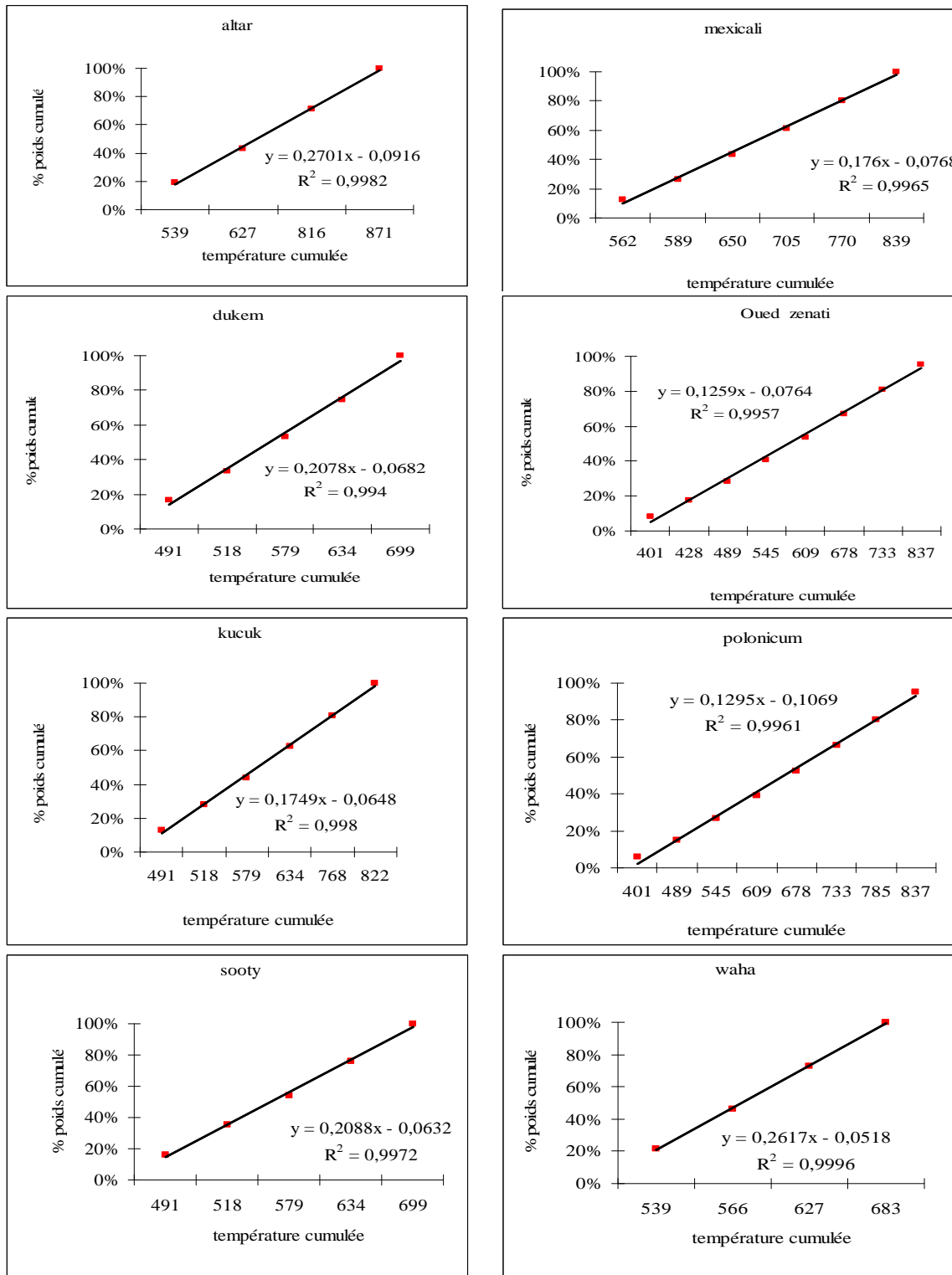


Figure13. Vitesse de remplissage variétale en fonction des cumuls de température

6-2-7 Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE)

La notion de l'efficacité d'utilisation d'eau est abordée dans la littérature sous plusieurs modèles et elle est variable dans le temps et dans l'espace et dépend des types de culture, des conditions édaphiques et les pratiques culturales incluant la fertilisation et les conditions climatiques (Hatfield *et al.* , 2001; Cox *et al.* , 2002).

Selon, Turner, (1997) l'EUE est exprimée par le rapport entre le rendement grain ou la biomasse totale et l'évapotranspiration.

Les variétés précoces ont une EUE(grain) moyenne plus supérieure (17.36 kg/mm/ha) que celle des variétés locales (12.71 kg/mm/ha) (Tableau A6). Altar et Oued Zenati enregistrent respectivement les valeurs maximales et minimale 18,54 et 11,61 kg/ha/mm (Tableau 4). Cependant les variétés locales ont des EUE(biomasse) plus élevées ; respectivement Polonicum et Oued Zenati enregistrent 51,33 et 49,6 (kg/ha/mm). Les variétés locales ont un comportement différent des variétés précoces ; elles produisent moins de grains par rapport aux pailles, ayant un rapport grain/paille de 0.25, contrairement aux variétés améliorées qui ont un rapport de 0.38.

Tableau 4. Efficacité d'utilisation de l'eau et ses composantes

Variété	Rendement grain (kg/ha)	Biomasse (kg/ha)	L'évapotranspiration (mm)	EUE(grain) (kg/ha/mm)	EUE(biomasse) (kg/ha/mm)
Altar	7204	17833	388.5	18,54	45,9
Dukem	6771,34	18489	388.5	17,42	47,6
Kucuk	6195,6	16622	388.5	15,94	42,8
Mexicali	7044,43	18276	388.5	18,13	47
Sooty	6443,21	17972	388.5	16,58	46,3
Waha	6821,84	17497	388.5	17,55	45
OZ	4512,31	19275	393	11,48	49,04
Polo	5437,96	19942	390,1	13,94	51,12

L'évapotranspiration est calculée par « *Budget* » selon l'équation Penman Monteith (FAO)

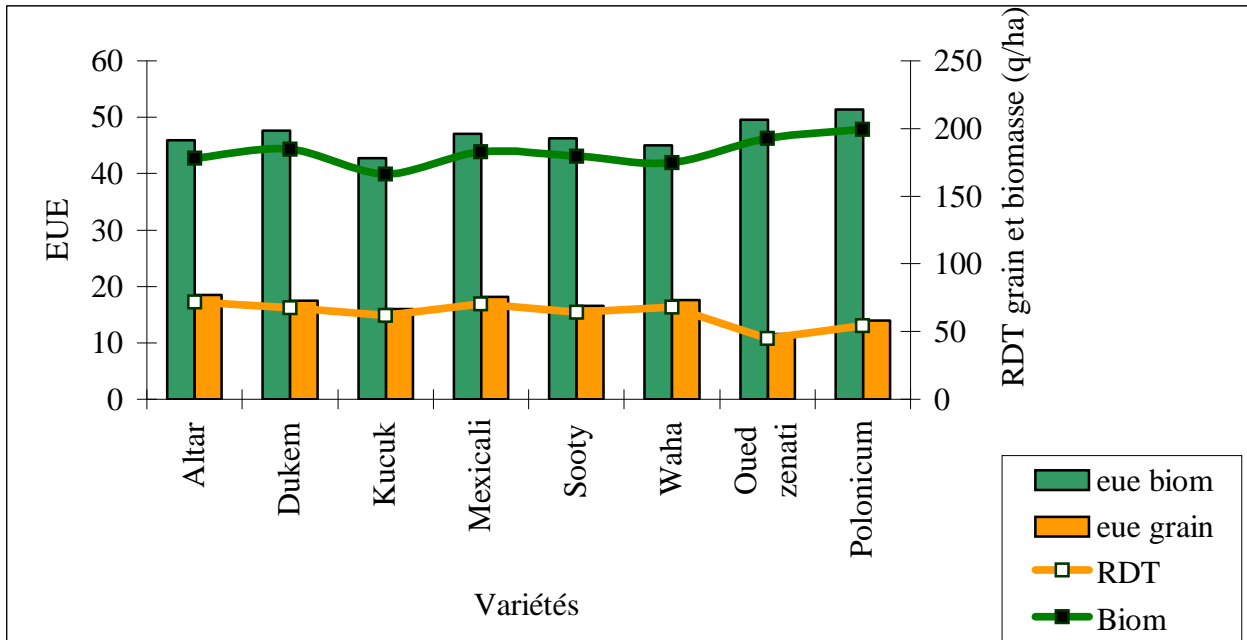


Figure 14. Relation entre rendement (q/ha) et EUE (grain) et EUE (biomasse)

La relation entre la discrimination isotopique du carbone et l'EUE a été profondément étudiée chez plusieurs espèces, en effet, ces deux traits étaient négativement associés (Farquhar and Richards 1984, Condon *et al.*, 1990, Read *et al.*, 1991, Ebdon *et al.*, 1998, Teulat *et al.*, 2001, Rebetzke *et al.*, 2002)

L'association enregistrée entre l'EUE et $\Delta^{13}\text{C}$ chez les variétés précoces ($r = -0.73$) (Figure 15) corrobore ainsi avec les résultats bibliographiques ci-dessus, cependant, la régression positive entre toutes les variétés ($r = 0.58$) allant à l'encontre de ce constat, expliquant les différents comportements des cultivars vis-à-vis de ces deux traits.

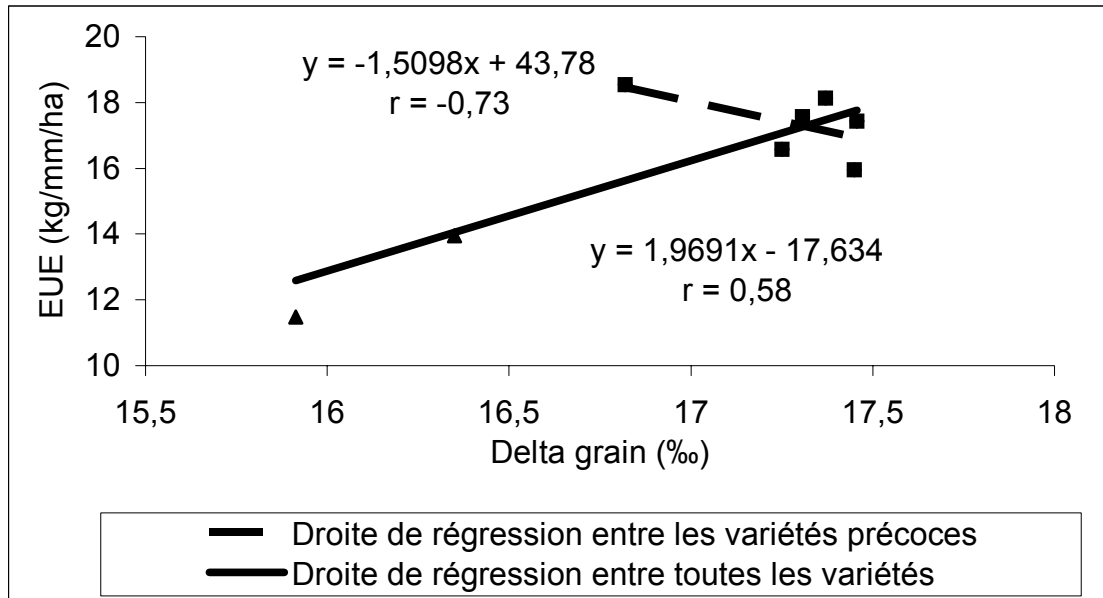


Figure 15. Relation entre $\Delta^{13}\text{C}$ et EUE(grain)

6-3 Simulation par le modèle de culture "Budget"

Les modèles de cultures peuvent être divisés principalement en deux catégories, de par leur complexité et leur utilité: d'une part les modèles "empiriques" dans lesquels les relations sont simplifiées et basées sur des analyses statistiques qui ne prennent pas en compte les processus internes du système et d'autre part, les modèles "mécanistes", lesquels décrivent et quantifient chaque processus à l'intérieur du système. Ce dernier type de modèles est plus en plus utilisé, il décrit en plus de la croissance, le développement de la culture, en tenant en compte le bilan hydrique du sol.

L'utilisation des modèles de simulation peut prédire le rendement en fonction des conditions climatiques et édaphiques (Heinmann *et al.*, 2002).

Le diagnostic du logiciel «*Budget*» consiste à valider et à comparer les résultats des modules **climat-sol-culture** du logiciel aux données réellement calculées.

La pertinence de cette validation repose sur le nombre de paramètres calculés, dans notre cas, on s'est limité de faire le constat sur quelques paramètres ayant été disponibles relativement aux considérations du site expérimental.

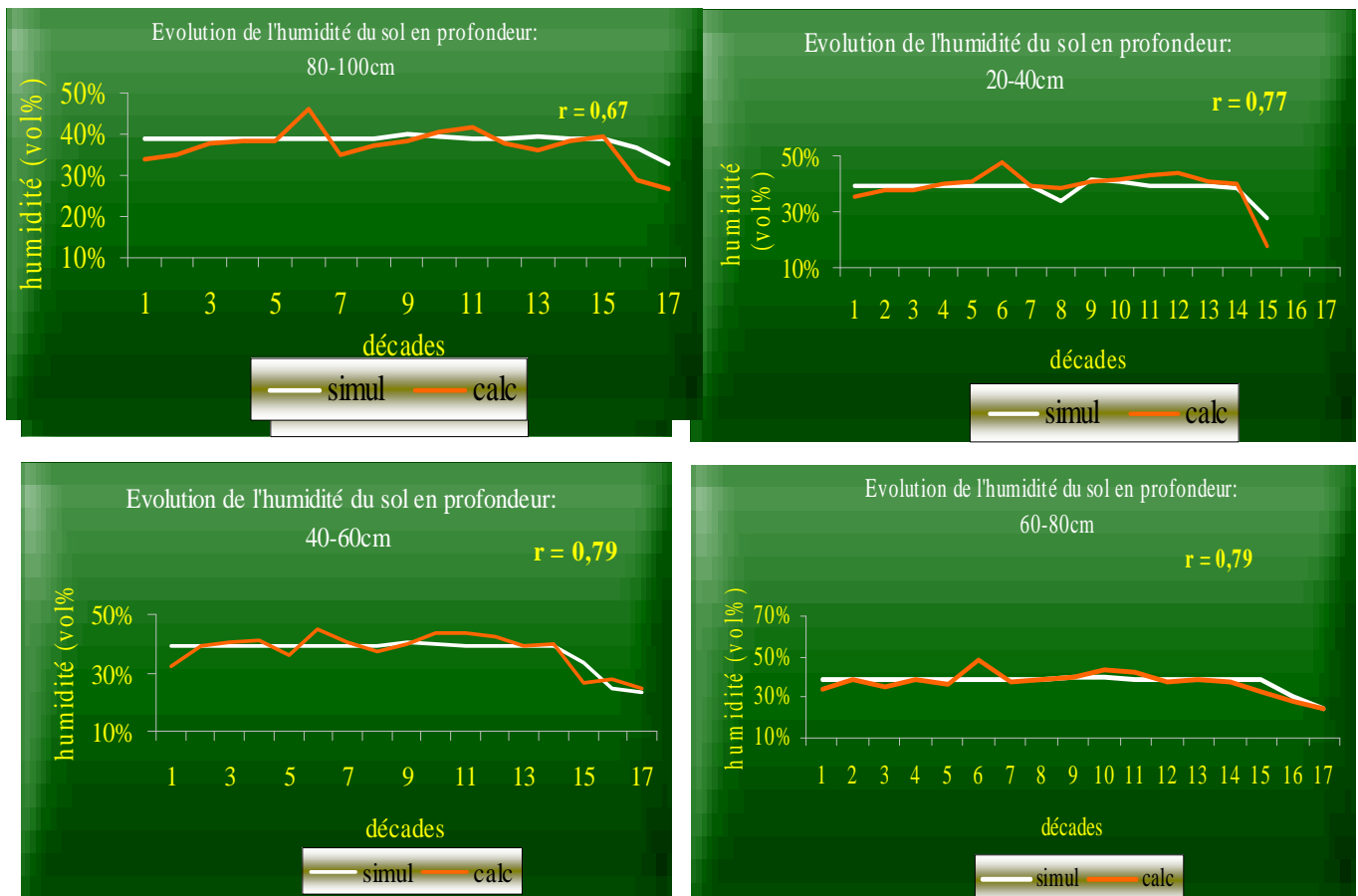
6-3-1 Comparaisons entre données calculées et simulées.

6-3-1-1 Humidité du sol.

La simulation établie par « Budget » sur le contenu hydrique du sol, donnée en pourcentage du volume de sol, comparativement aux données réelles de l'humidité pondérée notées le long de 17 décades de suivi, montre une similitude pour toutes les profondeurs de prélèvement (0-20cm, 20-40cm, 40-60cm, 60-80cm et 80-100cm)

(Figure 16)

L'utilité de la simulation des taux d'humidité du sol au cours du cycle de végétation, réside dans la prédiction des périodes du stress hydrique puisqu'il est en relation directe avec l'état hydrique du sol et les contraintes agissant sur la croissance et l'élaboration du rendement.



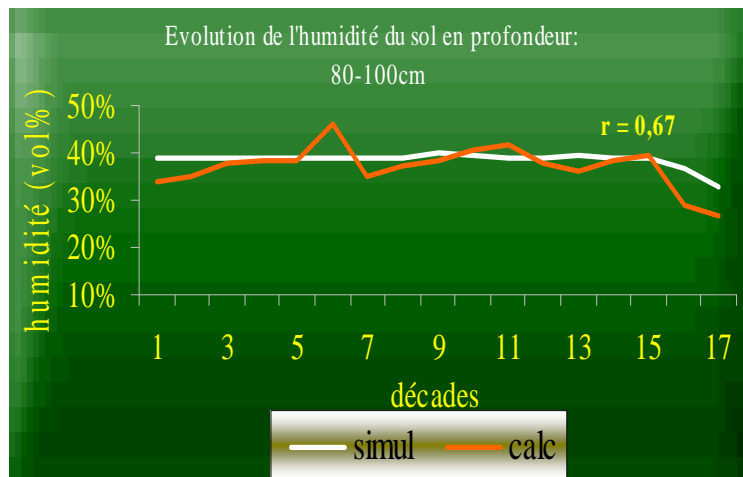
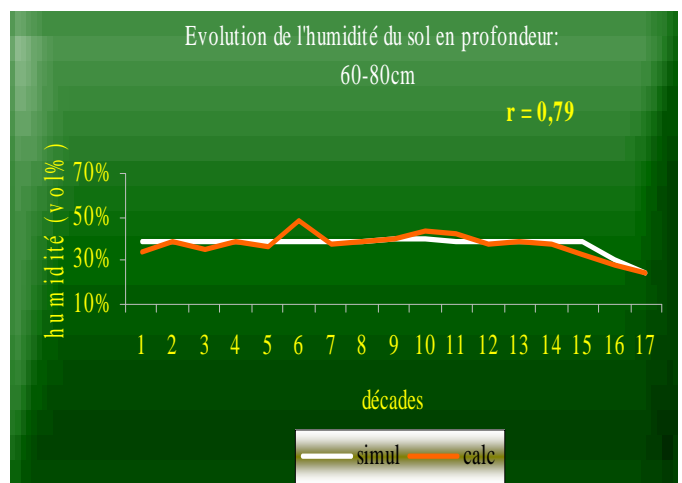
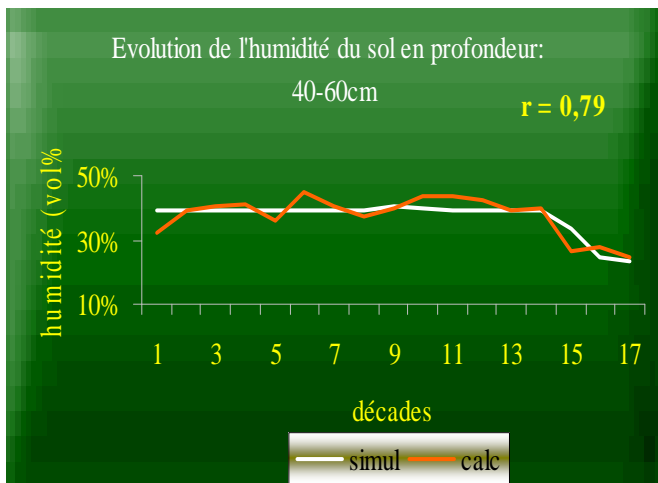
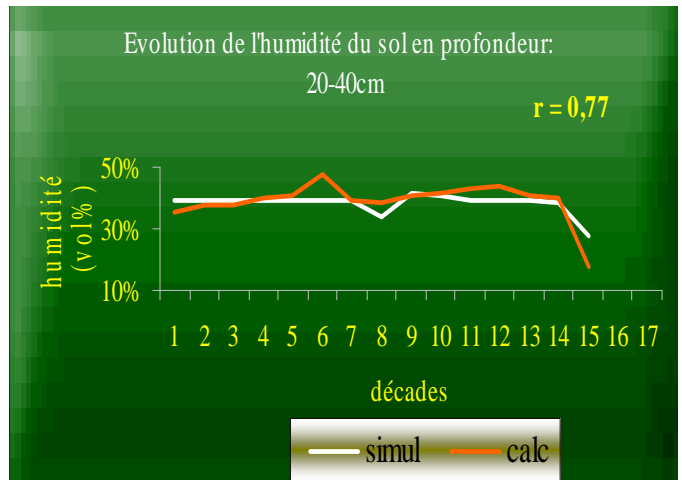
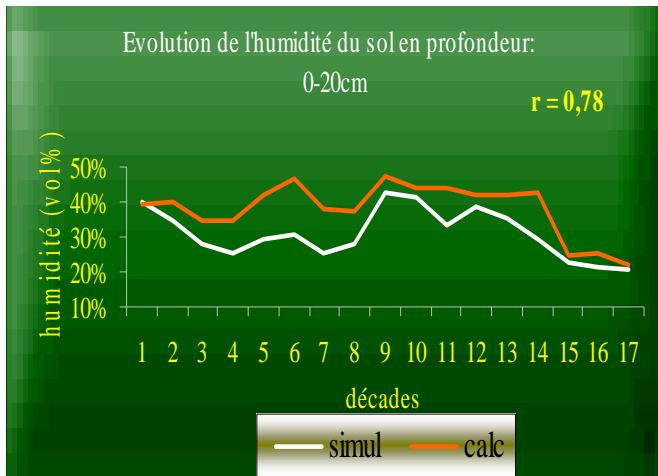


Figure 16. Evolution de l'humidité calculée et simulée du sol sur différentes profondeurs

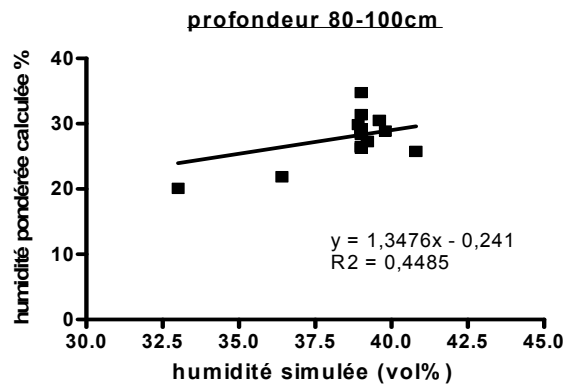
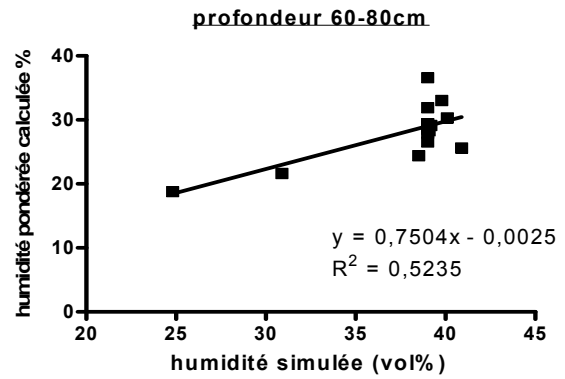
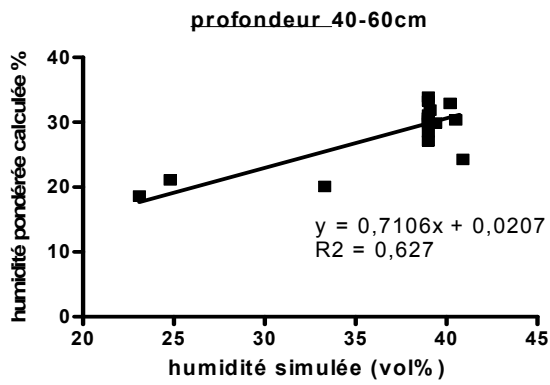
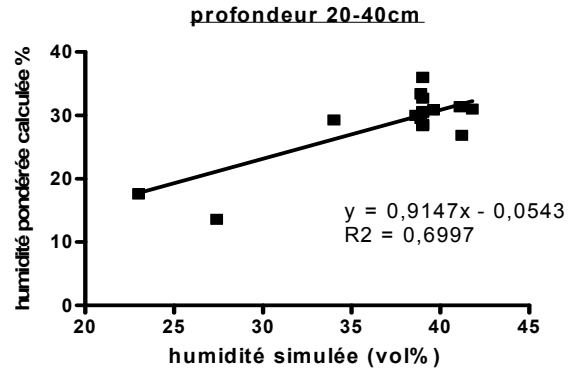
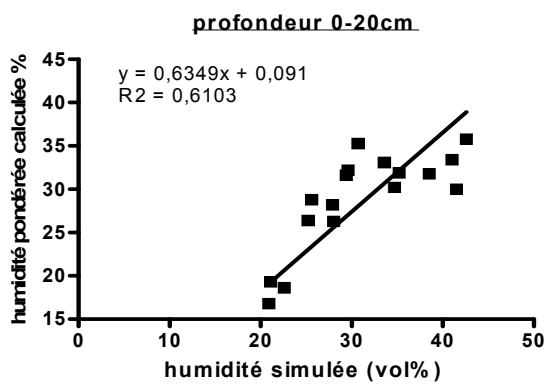


Figure 17. Corrélation entre l'humidité du sol calculée et simulée

6-3-1-2 Prédiction des stades phénologiques

Les stades phénologiques issues de la simulation à savoir : la levée, la floraison et la maturation physiologique et comparativement aux deux groupes de variétés précoces et tardives, présentent d'importantes différences.

- la levée : la prédiction des dates de la levée par *Budget* était réussie pour les deux types de variétés précoces et locales, soit au 14 janvier et au 13 janvier respectivement.
- La floraison : un grand décalage est observé entre les dates prédites de floraison et les dates observées, où la différence est de 29 jours d'avance pour les variétés locales et de 27 jours d'avance pour les variétés améliorées.
- La maturation : le décalage des dates de floraison engendre par conséquent, un même effet sur les dates de maturation, où les dates annoncées par *Budget* étaient le 11 et 13 juin alors qu'elles étaient réellement au 27 juin et au 01 juillet, pour les variétés précoces et tardives respectivement.

Tableau 5. Stades phénologiques prédits et observés

Stades phénologiques	variétés précoces		variétés tardives	
	prédit	observé	prédit	observé
Levée	14/1/07	14/1/07	13/1/07	13/1/07
floraison	24/4/07	21/5/07	28/4/07	27/5/07
maturation	11/6/07	27/6/07	13/6/07	1/7/07

6-3-1-3 Période de stress hydrique

La période de stress hydrique définie par l'intersection de la courbe du contenu hydrique du sol avec celui de la réserve facilement utilisable (Figure.18), définie par le logiciel relativement au stade de développement et au type de culture. Elle débute à partir du 20 Mai pour les variétés précoces et du 21 Mai pour les variétés tardives et se poursuit jusqu'à la fin de campagne.

En effet, les valeurs effectives du stress hydrique calculées sur la base des évapotranspirations potentielles et actuelles (Doorenbos and Kassam, 1979),

se présentent à partir de la troisième décennie du mois de Mai jusqu'au fin du cycle, caractérisée par les grandes demandes d'évapotranspiration, le manque de pluies et les températures extrêmes.

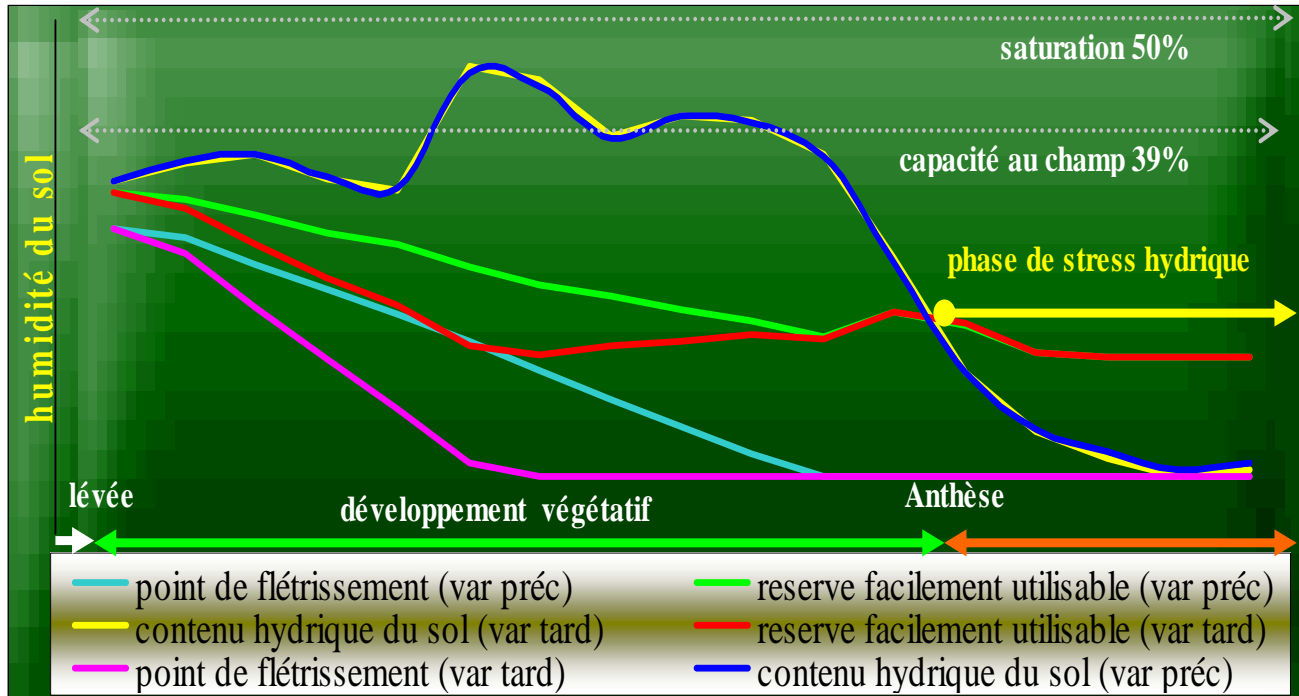


Figure 18. Evolution du contenu hydrique du sol des variétés précoces et tardives

La date de début de stress hydrique coïncide également avec les dates effectives de floraison des variétés précoces et se poursuit avec un stress hydrique et thermique de 40 jours environ ; ce qui aura des répercussions sur le taux de remplissage et agit sur le *stay-green* en raccourcissant sa période.

Relativement à cette phase de stress hydrique, *Budget* prévoit le rendement attendu de cette incommodité qui commence à régresser au cours de cette période en fonction de la rigueur du stress et le type de culture.

La figure 19 montre les deux courbes de rendements attendus des deux types de génotypes (locales et précoces) ; Où on observe, deux sortes de réponse au stress ; Pour une date donnée, la baisse de rendement est moins prononcée chez les variétés locales, et leur réponse au stress thermiques à partir du 19-06-07 est moins importante par rapport aux variétés améliorées, Où la courbe, à partir de cette date présente un palier,

contrairement à celle des variétés précoces qui poursuit sa décroissance presque linéaire. ce résultat parait logique et pourrait expliquer la tolérance des variétés locales aux différents stress, comparativement aux variétés améliorées.

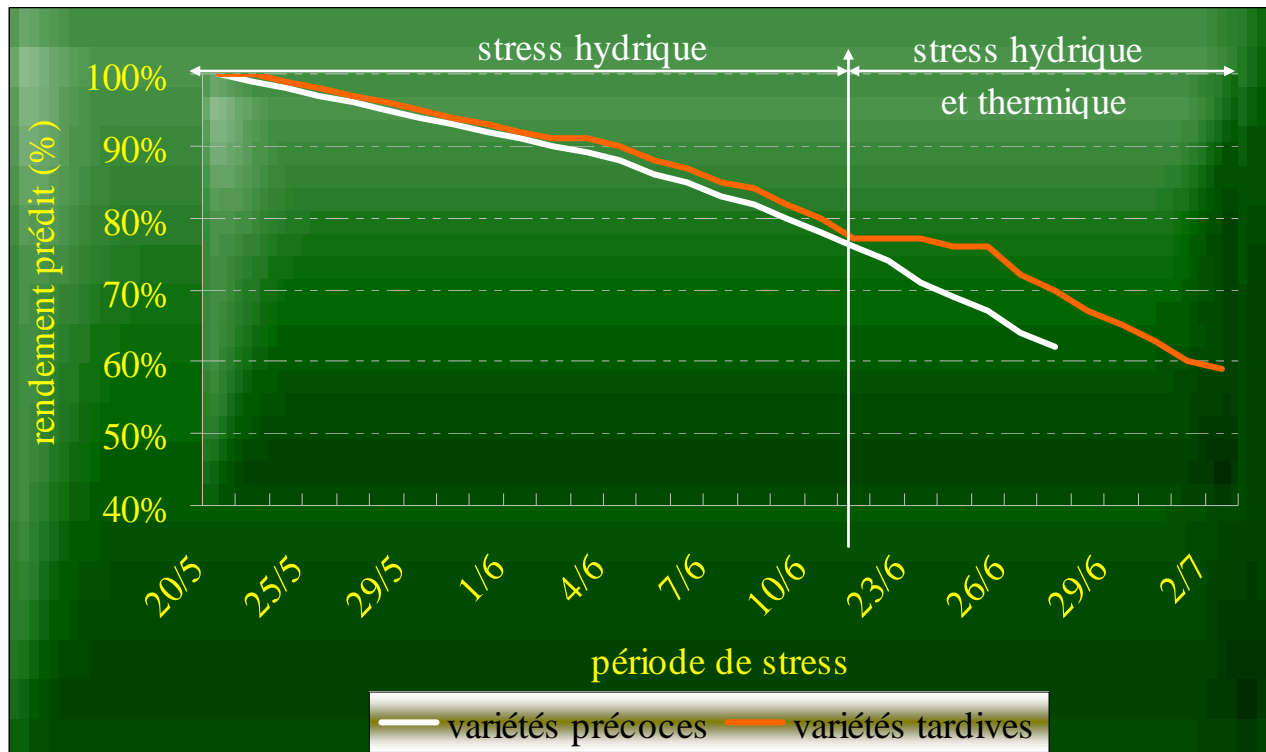


Figure 19. Prédiction du rendement des variétés précoces et tardives sous conditions de stress hydrique

Les valeurs du Kc et Ky (Coefficient cultural et Coefficient de la réponse au stress) calculés par *Budget* en fonction du cycle végétatif des deux types de génotypes sont présentés au tableau 5.

Tableau 6. Valeurs de Ky et Kc calculés par « Budget » en fonction des stades phénologiques

Stades phénologiques	Ky	Kc
Stade initial	1	0,17 - 1,10
Développement végétatif	0.2	1,10 – 1,15
Stade mi saison	0.55	1,15
Stade fin de saison	0.2	1,15 - 0,35

Doorenbos and Kassam (1979), présentent la relation entre le stress et le rendement prédit par l'équation

$$\mathbf{Ky (1-(ETR/ETP)) = 1-(Ya/Ym) \dots(1)}$$

Où :

Ya/Ym : le rendement relatif

1-(Ya/Ym) : la baisse du rendement

Ky : la réponse du rendement au stress

(1-(ETR/ETP)): stress hydrique (valeurs entre [0-1]); 0 = pas de stress, proche de 1 = stress intense)

Ya : le rendement actuel

Ym : le rendement théorique

Ky : la réponse du rendement au stress

ETR : l'évapotranspiration réelle ou (Eta : actuelle)

ETP : l'évapotranspiration potentielle ou (Etc).

D'après l'équation (1) le calcul du stress relativement aux deux groupes de variétés (précoces et tardives), fait ressortir deux courbes d'évolution distinctes, en fonction des stades phénologiques. Le stress des variétés tardives est plus intense influencé par les températures élevées relativement aux mêmes stades phénologiques des variétés précoces (Figure 20).

Cette différence de stress est expliquée par l'esquive (environ d'une semaine) des variétés précoces des températures extrêmes et de la sécheresse qui ont sévi à partir de l'épiaison.

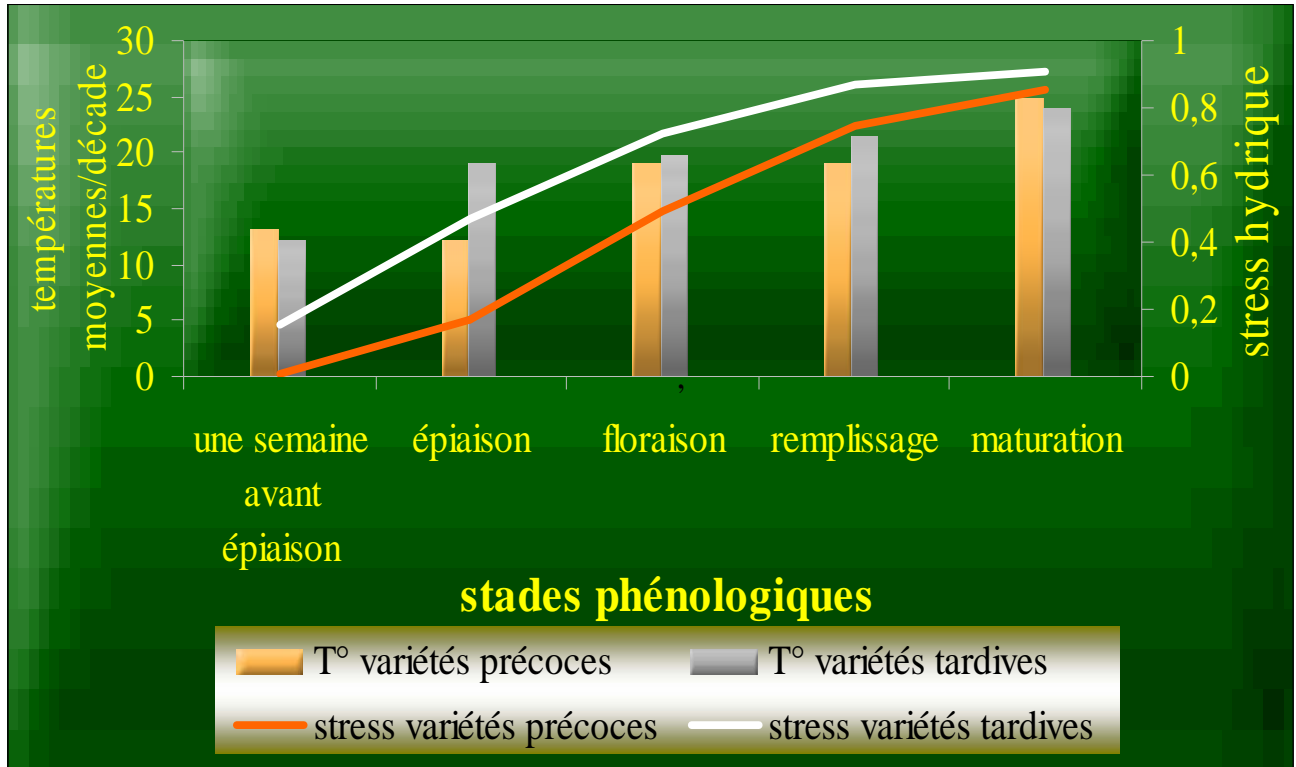


Figure 20. Evolution du stress phénologique en fonction des températures

CONCLUSION

La répartition aléatoire des précipitations est parmi les principales entraves des rendements en culture pluviale en zone semi aride. En effet, la campagne agricole 2006/07 a connu une mauvaise répartition des pluies qui a pénalisé le bon développement de la culture. Cette étude a permis de décrire le comportement de quelques variétés de Blé dur.

L'analyse du rendement à travers ses composantes a mis en évidence diverses associations, signalées dans des études antérieures. Les deux types de variétés testées (locales et améliorées) présentent deux comportements distincts vis-à-vis de leurs capacités à utiliser efficacement l'eau. En effet, les génotypes locaux produisent plus de biomasse au détriment du grain, ce qui leur permet d'avoir une EUE(biomasse) plus importante. Le choix de ce type de variétés par les agriculteurs vient probablement de la vocation de cette zone agropastorale. En revanche, les variétés introduites ont un potentiel de production plus important. L'analyse de l'efficacité d'utilisation de l'eau ne montre pas des différences substantielles d'évapotranspiration entre les variétés.

Les composantes du rendement qui ont montré des associations intéressantes avec l'efficacité d'utilisation de l'eau sont

- La précocité
- Le poids spécifique de la feuille drapeau
- La vitesse de remplissage
- Le tallage épi
- La biomasse totale
- Le PMG

L'utilisation du modèle de culture « *Budget* » a permis de déterminer des paramètres climatiques tels que l'évapotranspiration et la transpiration de la culture. Le modèle a également permis d'estimer l'impact du stress sur la diminution du rendement. Le calcul des différents coefficients et ratio utilisés par le modèle, confère une souplesse d'analyse, la simulation de la dynamique de l'état hydrique du sol relativement à différents stades phénologiques.

Au vu des résultats obtenus on peut dire que les simulations effectuées sur l'évolution de l'humidité du sol étaient acceptables.

Les prédictions des stades phénologiques quant à eux, présentent de grandes variations par rapport aux stades observés. L'estimation des coefficients de stress ont confirmé l'importance de l'action du stress terminal sur les géotypes tardifs.

Pour permettre une bonne exploitation du modèle au niveau local, il faut multiplier les applications de simulation à l'échelle du temps et de l'espace, afin de constituer une base de données comportant des informations sur les différents scénarii de la sécheresse.

Enfin, l'utilisation d'un modèle de culture, malgré ses imperfections, représente un premier pas et une contribution dans l'utilisation de la modélisation dans le secteur de l'agriculture dans notre zone.

LISTE DES ABREVIATIONS

A : Assimilation du CO ₂
α : Effet isotopique
ABA : <i>Abscisic acid</i>
AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique
AO : Ajustement osmotique
APSIM : <i>Agricultural Production system Simulator</i>
Ca : Concentration du CO ₂ atmosphérique.
CC : Capacité au champ
Ci : Concentration intercellulaire du CO ₂ .
CIMMYT : Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé
D : Différence de la pression de la vapeur entre la feuille et l'air.
$\delta^{13}\text{C}$: Composition isotopique du carbone
$\Delta^{13}\text{C}$: Discrimination isotopique du carbone
DVP : Différence de vapeur d'eau entre l'air et la feuille
Es : Evaporation
ETact : Evapotranspiration actuelle
ETP : Evapotranspiration potentielle
ETR : Evapotranspiration réelle
EUE : Efficacité d'utilisation de l'eau
EUEi : Efficacité d'utilisation de l'eau intrinsèque
FAO : <i>Food and Agriculture Organization</i>
FC : <i>field capacity</i>
g_c : Conductance stomatique de CO ₂
Gs : Conductance stomatique
g_w : Conductance stomatique de la vapeur d'eau
ha : Hectare
HI : <i>Harvest index</i>
HP : Hauteur de paille
IAVHI : Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II
IBSNAT : <i>International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer</i>
ICCARDA : <i>International Center for Agricultural Research in the Dry Areas</i>
INRA : Institut national de la recherche agronomique
IPCC : <i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
Kc : Coefficient cultural
Ky : Coefficient de réponse au stress

MF : Matière fraîche
MS : Matière sèche
OGM : Organisme Génétiquement Modifié
OMC : Organisation Mondiale de Commerce
OZ : Oued Zenati
P : Pluviométrie
P_a : Pression partielle du CO_2 atmosphérique
PDB : PeeDee belemnite
PF : Point de flétrissement
P_i : Pression partielle du CO_2 intercellulaire.
Prob : Probabilité
PSF : Poids spécifique de la feuille
q : Quintal
QTL : Quantitative Trait Loci
R : Rapport ou ratio isotopique
R_a : Ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'air (atmosphère).
RDT : Rendement
R_e : Ratio isotopique de l'échantillon. .
RFU : Réserve Facilement Utilisable
R_p : Ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de la plante.
R_s : Ratio isotopique du standard international.
RU : Réserve Utile
SAT : Point de saturation du sol
T : Transpiration
TE : Efficience de transpiration
w_a : Concentration du H_2O atmosphérique.
w_i : Concentration intercellulaire du H_2O .
Y : Rendement grain

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.** Températures mensuelles du cycle végétatif de trois périodes comparatives (1932/72), (1982/2005) et (campagne 2006/07).
- Figure 2.** Pluviométrie saisonnière de la campagne (2006/07) et la période 1982-2005
- Figure 3.** Diagramme ombrothermique campagne (2006/07)
- Figure 4.** Diagramme ombrothermique de la période 1982-2005
- Figure 5.** Fluctuation de l'humidité pondérée (observée) du sol au cours du cycle végétatif
- Figure 6.** Evolution de l'épiaison (%)
- Figure 7.** Evolution de la teneur de la chlorophylle totale de la feuille drapeau
- Figure 8.** Relation entre précocité et rendement grain
- Figure 9.** Relation entre le rendement grain et le $\Delta^{13}\text{C}$ (Toutes les variétés et les variétés précoces)
- Figure 10.** Relation entre le rendement grain et le poids spécifique (variétés précoces et l'ensemble des variétés)
- Figure 11.** Relation entre le rendement grain et la hauteur de la paille
- Figure 12.** Relation entre le rendement grain et la pente de remplissage (Toutes les variétés et les variétés précoces)
- Figure 13.** Vitesse de remplissage variétale en fonction des cumuls de température
- Figure 14.** Relation entre rendement grain et EUE(grain) et EUE(biomasse)
- Figure 15.** Relation entre $\Delta^{13}\text{C}$ et EUE grain
- Figure 16.** Evolution de l'humidité calculée et simulée du sol sur différentes profondeurs
- Figure 17.** Corrélation entre l'humidité du sol calculée et simulée
- Figure 18.** Evolution du contenu hydrique du sol des variétés précoces et tardives
- Figure 19.** Prédiction du rendement des variétés précoces et tardives sous conditions de stress hydrique
- Figure 20.** Evolution du stress phénologique en fonction des températures

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Chronologie de la levée, l'épiaison et de la floraison

Tableau 2. Comparaison de moyennes par Test de Newman et Keuls

Tableau 3. Les vitesses de remplissage, le rendement et le PMG des différentes variétés

Tableau 4. Efficacité d'utilisation de l'eau et ses composantes

Tableau 5. Stades phénologiques prédits et observés

Tableau 6. Valeurs de K_c calculés par « *Budget* » en fonction des stades phénologiques

Tableau 7. Valeurs de K_y calculés par « *Budget* » en fonction des stades phénologiques

Tableau A1. Origine des variétés étudiées.

Tableau A2. Moyennes des composantes de rendement.

Tableau A3. Valeurs indicatives de l'humidité du sol, la saturation, le point de flétrissement et la capacité au champ, relativement à différentes textures selon Saxton *et al.* (1986)

Tableau A4. Valeurs des coefficients de réponses au stress (K_y) de différentes cultures selon Doorenbos and Kassam, (1979)

Tableau A5. Analyses de variance entre le rendement grain et ses composantes

Tableau A6. Comparaison et Analyse statistique entre les composantes de rendement des variétés locales et précoces

Tableau A7. Matrice de corrélation

ANNEXES

Tableau A1. Origine des variétés étudiées.

Variétés	Origines
Altar	CIMMYT
Dukem	CIMMYT
Mexicali	CIMMYT/ICARDA
Polonicum	Locale
Oued zenati	Locale
Sooty	CIMMYT
Waha	CIMMYT/ICARDA
Kucuk	CIMMYT

Tableau A2. Moyennes des composantes de rendement.

variété	Rendement grain (q/ha)	Biomasse (kg/ha)	Nbre d'épis/m ²	PMG (g)	rendement épi (g)	$\Delta^{13}\text{C}$ (‰)	fertilité épi	Indice de récolte (HI)
Altar	72,04	17833	536	40,62	1,358	16.64	38	0,4048
Dukem	67,71	18489	601	28,98	1,167	17.78	45	0,3686
Kucuk	61,96	16622	518	33,86	1,199	17.77	44	0,3733
Mexicali	70,44	18276	619	38,7	1,141	17.59	34	0,3868
Sooty	64,43	17972	571	30,09	1,138	17.91	48	0,3591
Waha	68,22	17497	524	31,75	1,302	17.31	47	0,3917
OZ	45,12	19275	381	44,39	1,188	16.33	33	0,2346
Polo	54,38	19942	416	42,41	1,307	16.14	36	0,2729

Tableau A3. Valeurs indicatives de l'humidité du sol, la saturation, le point de flétrissement et la capacité au champ, relativement à différentes textures selon Saxton *et al.* (1986)

Textural class	θ_{sat} [m ³ m ⁻³]	θ_{FC} [m ³ m ⁻³]	θ_{WP} [m ³ m ⁻³]
Sandy soils: coarse-textured soils			
Sand	0.32 – 0.42	0.10 – 0.15	0.03 – 0.06
Loamy sand	0.32 – 0.47	0.12 – 0.18	0.04 – 0.10
Loamy soils: moderately coarse-textured soils			
Sandy loam	0.34 – 0.51	0.17 – 0.26	0.06 – 0.13
Loamy soils: medium textured soils			
Loam	0.42 – 0.51	0.22 – 0.31	0.09 – 0.16
Silt loam	0.42 – 0.55	0.23 – 0.34	0.08 – 0.15
Silt	0.42 – 0.55	0.30 – 0.32	0.09 – 0.11
Loamy soils: moderately fine-textured soils			
Sandy clay loam	0.40 – 0.49	0.20 – 0.30	0.13 – 0.19
Clay loam	0.47 – 0.51	0.28 – 0.38	0.16 – 0.22
Silty clay loam	0.49 – 0.53	0.32 – 0.40	0.16 – 0.23
Clayey soils: fine textured soils			
Sandy clay	0.47 – 0.53	0.28 – 0.40	0.20 – 0.30
Silty clay	0.49 – 0.55	0.38 – 0.50	0.22 – 0.36
Clay	0.51 – 0.58	0.39 – 0.55	0.30 – 0.45

Tableau A4. Valeurs des coefficients de réponses au stress (Ky) de différentes culture selon Doorenbos and Kassam,(1979)

Crop	Vegetative period			Flowering Period	Yield formation	Ripening	Total Growing period
	Early	Late	Total				
Alfalfa			0.7 – 1.1				0.7-1.1
Banana							1.2-1.35
Bean			0.20	1.10	0.75	0.20	1.15
Cabbage	0.20				0.45	0.60	0.95
Citrus							0.8-1.1
Cotton			0.20	0.50		0.25	0.85
Grape							0.85
Groundnut			0.20	0.80	0.60	0.20	0.70
Maize			0.40	1.50	0.50	0.20	1.25
Onion			0.45		0.80	0.30	1.10
Pea	0.20			0.90	0.70	0.20	1.15
Pepper							1.10
Potato	0.45	0.80			0.70	0.20	1.10
Safflower		0.30		0.55	0.60		0.80
Sorghum			0.20	0.55	0.45	0.20	0.90
Soybean			0.20	0.80	1.00		0.85
Sugarbeet	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-beet							0.6-1.0
-sugar							0.7-1.1
Sugarcane			0.75		0.50	0.10	1.20
Sunflower	0.25	0.50		1.00	0.80		0.95
Tobacco	0.20	1.00			0.50	0.50	0.90
Tomato			0.40	1.10	0.80	0.40	1.05
Water melon	0.45	0.70		0.80	0.80	0.30	1.10
Wheat	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-winter			0.20	0.60	0.50		1.00
-spring			0.20	0.65	0.55		1.15

Tableau A5. Analyses de variance entre le rendement grain et ses composantes**N°1- ANALYSIS OF VARIANCE: EFFECTS TESTS PMG**

Source	Sum-of-Squares	df	Mean-Square	F-Ratio	P-Value
variété	737.64	7	105.38	7.05	0.0010
Bloc	6.01	2	3.01	0.20	0.8200
Sources/ variation	743.65	9	82.63	5.53	0.0024
Erreur	209.12	14	14.94		
Total	952.77	23			

N°2- ANALYSIS OF VARIANCE: EFFECTS TESTS FERTILITE

Source	Sum-of-Squares	df	Mean-Square	F-Ratio	P-Value
variété	776.95	7	110.99	15.56	<.0001
Bloc	35.74	2	17.87	2.50	0.1175
Sources/ variation	812.69	9	90.30	12.65	<.0001
Erreur	99.90	14	7.14		
Total	912.59	23			

N°3- ANALYSIS OF VARIANCE: EFFECTS TESTS EPI/M²

Source	Sum-of-Squares	df	Mean-Square	F-Ratio	P-Value
Variété	150063.33	7	21437.62	4.52	0.0079
Bloc	21009.25	2	10504.62	2.22	0.1459
Sources/ variation	171072.58	9	19008.06	4.01	0.0102
Erreur	66385.42	14	4741.82		
Total	237458.00	23			

N°4- ANALYSIS OF VARIANCE: EFFECTS TESTS RDT/EPI

Source	Sum-of-Squares	df	Mean-Square	F-Ratio	P-Value
Variété	0.15	7	0.02	0.85	0.5636
Bloc	0.00	2	0.00	0.02	0.9841
Sources/ variation	0.15	9	0.02	0.67	0.7254
Erreur	0.35	14	0.03		
Total	0.50	23			

N°5- ANALYSIS OF VARIANCE: EFFECTS TESTS RDT

Source	Sum-of-Squares	df	Mean-Square	F-Ratio	P-Value
Variété	1751.2	7	250.18	9.91	0.0002
Bloc	219.76	2	109.88	4.35	0.033
Sources/ variation	1970.98	9	219	8.68	0.0002
Erreur	353.42	14	25.24		
Total	2324	23			

N°6- ANALYSIS OF VARIANCE: EFFECTS TESTS $\Delta^{13}\text{C}$

Source	Sum-of-Squares	df	Mean-Square	F-Ratio	P-Value
Variété	7.11	7	1.02	48.21	<.0001
Erreur	0.17	8	0.02		
Total	7.27	15			

Tableau A6 : comparaison et Analyse statistique entre les composantes de rendement des variétés locales et précoces

Test d'égalité des espérances: deux observations de variances différentes										
	Rendement (kg/ha)		HI		Fertilité (grain/epi)		PMG (g)		EPI/M²	
	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>
Moyenne	67,46	49,75	0,380	0,253	42,62	34,41	34,00	43,40	561,40	398,46
Variance	13,99	42,84	0,00028	0,00073	30,46	5,66	22,27	1,95	1797,597	619,98
PROB	0.00244***		0.0001***		0.0979*		0.038**		0.00248***	

Test d'égalité des espérances: deux observations de variances différentes										
	BIOMASSE (kg/ha)		HP (cm)		Delta grain (%)		EUE gr (kg/mm/ha)		EUE bio (kg/mm/ha)	
	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>
Moyenne	17781.48	19608.37	83.3	124.6	17.50	16.23	17.36	12.71	45.77	49.89
Variance	142.93	72	3.91	0.08	0.22	0.01	0.927	3.02	2.92	1.44
PROB	0.0126**		0.0001***		0.001***		0.002***		0.02*	

	Surface foliaire (cm²)		Surface spécifique (g/cm²)	
	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>	<i>variétés précoces</i>	<i>variétés tardives</i>
Moyenne	21.85	27.64	0.0054	0.0050
Variance	4.95	4.03	>0.0003	>0.0001
PROB	0.017*		0.48NS	

*** : seuil de signification : 1%

** : seuil de signification : 5%

* : seuil de signification : 10%

NS : non significatif

Références bibliographiques

- Adjab, M., 2002**, « Recherche des traits morphologiques, physiologiques et biochimiques d'adaptation au stress hydrique chez différents génotypes de blé dur *Triticum durum* desf » Thèse de Magister ,faculté des Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, 84p.
- Abayomi, Y., Wright, D., 1999**, Effects of water stress on growth and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. Trop.Agric. 76, 120–125
- Acevedo, E.H., Silva, P.C., Silva, H.R., Solar, B.R., 1999**, Wheat production in Mediterranean environments. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Eds.), Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination. The Haworth Press Inc., New York, pp. 295–331.
- Allen, L.H. , R-R Valle, J.W., Mishoe and J.W. Jones, 1994**, Soybean leaf gas exchange responses to carbon dioxide and water stress. Agron J., 86, 625-636.
- Anonyme, 2002**, Lincoln Taiz Eduardo Zeiger, 2002; Plant physiology; 3rd edition; Sinauer associates.
- Anonyme, 2005**, <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/0111sp.htm>
- Anonyme, 2007**, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Blé>
- Anonyme, 2007a**, <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y4011E/y4011e07.htm>
- Anonyme, 2007b**, <http://www.ogm.org/pages/ogm.php?cat=01>
- Anonyme, 2007c**, <http://www.coupdepouce.com/cuisin/300aliments3000recettes/ble-n229598p1.html>
- Araus, J.L., Amaro, T., Zuhair, Y., Nachit, M.M., 1997**, Effect of leaf structure and water status on carbon isotope discrimination in field-grown durum wheat, Plant Cell Environ.20 (1997) 1484-1494.
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Reynolds, M.P., Royo, M.A.J., 2002**, Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for? Ann. Bot. 89, 925–940.
- Araus, J.L., 1996**, Integrative physiological criteria associated with yield potential. In M.P. Reynolds, S. Rajaram & A. McNab, eds. Increasing Yield Potential in Wheat: Breaking the Barriers. Workshop Proc., Cd. Obregon, Mexico, 28-30 Mar. 1996, p. 150-166. Mexico, DF, CIMMYT.
- Arnon, L., 1992**, Agriculture in dry lands. Principles and practice. Iri Developments in agricultural and managed-forest ecology 26.Elsevier Science Publishers B.V.Amsterdam. 979p.

Aschman, H., 1973, "Distribution and peculiarity of Mediterranean ecosystems". Springer. Verglas .New York.USA

Asseng, S., Jamieson, P.D., Kimball, B., Pinter, P., Sayrem, K., Bowden, J.W., Howden, S.W., 2004, Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficient elevated atmospheric CO₂. Field Crop Res. 85, 85–102.

Augus, J.F, van Herwaarden, A.F, Fisher, R.A., Howe, G.N et Heewan, D.P., 1998, The source of mineral nitrogen for cereals in south-eastern Australia. Australian Journal Agricultural Research 49, 511-22.

Austin, R.B., Morgan, C.L., Ford, M.A. & Blackwell, R.D., 1980, Contributions to grain yield from pre-anthesis assimilation in tall and dwarf barley phenotypes in two contrasting seasons. Ann. Bot., 45: 309-319.

Badrani, S., 2006, Rapport annuel CIHEAM 2006.

Bartels, D., Sunkar, R., 2005, Drought and salt tolerance in plants. Critical Reviews in Plant Sciences 24:23-58.

Bechtel incorporated, 1975, Développement des ressources en eau et de l'agriculture, Région de Sétif, Etude préliminaire et conditions de réalisation, volume III.

Bennet, S.J., Saidi, N., Enneking, D., 1998, Modelling climatic similarities in Mediterranean areas: a potential tool for plant genetic resources and breeding programmes. Agric. Ecosyst. Environ. 70, 129–143.

Bhattarai, S.R., 2005, The physiology of water use efficiency of crops subjected to subsurface drip irrigation, oxygenation and salinity in a heavy clay soil, thèse de Doctorat, School of Biological and Environmental Sciences Faculty of Arts, Health and Sciences Central Queensland University Rockhampton, QLD 4702, Australia.

Bierhuizen, J.F. and Slatyer, R.O., 1965, Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of Cotton leaves. Agric. Meteorol., 2, 259-27.

Blum, A., Ebercon, A., 1981, Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. Crop Sci., 21: 43-47.

Blum, A., 1988, Plant breeding for stress environment. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.

Blum, A. and Pnuel, Y. 1990, Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in a mediterranean environment. *Aus. J. Agri. Res.*, 41 : 799-810.

Blum.A., 1993, Selection for sustained production in water deficit environments, in: D. Buxton III (Ed.), *International Crop Science I*, CSSA, Madison, WI, 1993, pp. 343–347.

Blum, A., 1998, Improving wheat grainfilling under stress by stem reserve mobilization. *Euphytica*, 100: 77-83.

Bonachela, S., 1996, Root growth of triticale and barley grown for grain or for forageplus- grain in a Mediterranean climate. *Plant and Soil* 183: 239-251.

Bonhomme, R., 1997, Modélisation du fonctionnement d'une culture: caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets., In INRA, ed. *L'eau dans l'espace rural*. Riou, C., Bonhomme, R., Chassin, P., Neveu, A., Papy, F., Paris.

Boostma,A., Boisvert,J.B.,Dejong,R.,Baier,W., 1996, La sécheresse et l'agriculture canadienne,une revue des moyens d'actions,revue.sécheresse,7,pp.277-285.

Boote, K.J., J.W. Jones and N.B. Pickering, 1996, Potential uses and limitation of crop models. *Agronomy Journal* 88 : 704-716.

Bourrié, G et Pedro, G, 1979, La notion de pF, sa signification physicochimique et ses implications pédogénétiques. I- Signification physicochimique. *Relations entre le pF et l'activité de l'eau. Science du Sol* 4, 313-322.

Boyer, J.S, 1996, Advances in drought tolerance in plants, *Adv. Agron.* 56 (1996) 187–218.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M., Ruguet, F., Nicoullaud, B., Gate, P.J.L., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Dele´colle, R., 1998, STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.

Brisson, N., Ruguet, F., Gate, P.J.L., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A.,Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002, STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillière, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, P., Sinoquet, H., 2003, An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.

Bruckner, P.L., Froberg, R.C., 1987. Rate and duration of grain fill in spring wheat. *Crop Sci.* 27, 451–455.

Canadas, D., 2006, Evaluation du procédé Oxygreen® pour son potentiel de décontamination en ochratoxine A du blé. Les effets toxiques liés à une exposition sub-chronique à l'ochratoxine A, sont-ils atténués? Thèse de Doctorat à l'école polytechnique de Toulouse.

Darera, N.F., Marshall, D.R., Balaam, L.N., 1969, Genetic variability in root development in relation to drought tolerance in spring wheat expt, *Agric* 5, pp327-337.

de Wit, C.T., 1958, Transpiration and plant yield, *versl. Landbouwk, Onderz* 646, 59-84.

Debaeke, P., Puech, J. and Casals, M.L., 1996, Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. I. Etude en lysimètres. *Agronomie*, 16 : 3-23.

del Blanco, I.A., Rajaram, S., Kronstad, W.E., 2001, Agronomic potential of synthetic hexaploid wheat-derived populations. *Crop Sci.* 41, 670–676.

Donalds, C.M., Hambling, J., 1976, The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*, 28, 361-411.

Donovan, L.A. and Ehleringer, J.R., 1994, Carbon isotope discrimination, water-use efficiency, growth, Gd modality in a natural shrub population. *Oecologia* 100:347-354.

Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979, Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*. Rome, Italy.

Downing, T.E., Harrison, P.A., Butterfield, R.E., Lonsdale, K.G. (Eds.), 2000, Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe: An Integrated Assessment. Research report no. 21, Environmental Change Institute, University of Oxford, UK, p. 445.

Duan, A.W. and Zhang, J.Y., 2000, Water use efficiency of grain crops in irrigated farmland in China. *Transactions of CSAE* 16(4), 41-44.

Dubey, R.S., 1994, Protein synthesis by plants under stressful conditions, in: M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant and Crop Stress*, Marcel Dekker, New York, , pp. 277-299.

Dubouzet, J.G., Sakuma, Y., Ito, Y., Kasuga, M., Dubouzet, E.G., Miura, S., Seki, M., Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., 2003, « OsDREB genes in rice, *Oryza sativa*

L., encode transcription activators that function in drought-, high-salt and cold-responsive gene expression. » *Plant J.* 33(4): p. 751-63.

Dwyer, L. M., A. M. Anderson, B. L. Ma, D. W. Stewart, M. Tollenaar and E. Gregorich, 1994, "Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration." *Canadian Journal of Plant Science* 75(1): 179-182.

Ebdon, J.S., A. M. Petrovic and T. E. Dawson, 1998, Relationship between carbon isotope discrimination and evapotranspiration in Kentucky bluegrass. *Crop Sci.* 38: 157-162.

Ehdaie, B., 1995, Variation in water-use efficiency and its components in wheat: II. pot and field experiments, *Crop Sci.* 35 (1995) 1617–1626.

Ehleringer, J.R, and C.B. Osmand, 1989, Stable isotopes. in R W. Pearcy, J.R Ehleringer, H-k Mooney and P. W. Rundel (eds), *Plant Physiological Ecology, Field methods and instrumentation.* Chapman and Hall, London.

Ehleringer, J.R., 1980, Leaf morphology and reflectance in relation to water and temperature stress. In Turner NC, Kramer PJ (eds) *Adaptations of plants to water and high temperature stress.* Wiley, New York, pp 295-308.

Ehleringer, J.R., 1988, Correlation between carbon isotope ratio, water-use efficiency and yield. p 165-191. In J. W. White et al. (ed) *Research on drought tolerance in common bean.* CIAT, Colombia.

Ehleringer, J.R., S. Klassen, C. Clouton, D. Shel-rill, M. Fuller-Holbrook, Q. Fu and T.A. Cooper, 1991, Carbon isotope discrimination and transpiration efficiency in common bean. *Crop sci.*, 31, 1611-1615.

Elhani, S., V. Martos, Y. Rharrabti, C. Royo, L.F. Garcia del Moral, 2007, Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain yield and its components grown in Mediterranean environments, *Field Crops Research* 103 (2007) 25–35.

FAO, 2005, APERÇU MONDIAL ET RÉGIONAL : Faits et chiffres, deuxième partie.

Farquhar, G.D. and R.A. Richards, 1984, Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aust. J. Plant Physiol.* 11:539–552.

Farquhar, G.D. and T.D. Sharkey, 1982, Stomatal conductance and photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 33, 317-345.

Farquhar, G.D., and R.A. Richards, 1984, Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aust. J. Plant Physiol.* 11: 539–552.

Farquhar, G.D., MC. Bell, S. von Caemmerer and Z. Roksandic. 1982a, Effects of salinity and humidity on ^{13}C value of halophytes-evidence for diffusional isotope fractionation determined by the ratio of intercellular/atmospheric partial pressure of CO_2 under different environmental conditions. *Oecologia*, 52, 121 - 124.

Farquhar, G.D., O'Leary, M.H., and Berry, J.A. 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration of leaves, *Australian Journal of Plant Physiology* 9: 121- 137.

Farquhar, G.D., J.R. Ehleringer and K.T. Hubick, 1989, Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Biol.*, 40, 503-537.

Farquhar, G.D., J.R. Ehleringer, M.H. O'Leary and J.A. Beny, 1982b, On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aust- J. Plant Physiol.* 9, 121-137.

Feldman, M., Lupton, F.G.H., Miller, T.E., 1995, Wheats. In J. Smartt, N.W. Simmonds : Evolution of crop plants. Longman Group Ltd., London, 184-192.

Fischer, R.A and N.C. Turner, 1978, Plant productivity in the arid and semi arid zones. *Am. Rev. Plant Physiol.*, 29, 277-317.

Fischer, R.A., HilleRisLambers, D., 1978, Effect of environment and cultivar on source limitation to grain weight in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 29, 433-458.

Fischer, R.A., Maurer, R., 1978, Drought resistance in spring wheat cultivars. 1. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.* 29, 897-912.

Fischer, R.A., Rees, D., Sayre, K.D., Lu, Z.M., Condon, A.G. and Larqué-Saavedra, A., 1998, Wheat yield progress is associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Sci.*, 38: 1467-1475.

French, R.J and Schultz, J.E., 1984, Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Australian Journal of Agricultural Research* 35, 743-764.

French, R.J. and Farquhar, G.D., 1982, An explanation of the variations in tree rings. *Nature* 290:232-235.

Garg, A.K., Kim, J.K., Owens, T.G., Ranwala, A.P., Choi, Y.D., Kochian, L.V., Wu, R.J., 2002, « Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses. », *PNAS* 99(25): p. 15898-903.

Gebeyehou, G., Knott, D.R., Baker, R.J., 1982, Relationships among duration of vegetative and grain filling phases, yield components, and grain yield in durum wheat cultivars. *Crop Sci.* 22, 287-290.

Gonzales, M., 2006, Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminées fourragères, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers.

Guy, R.D. and Reid, D.M., 1985, Factors affecting $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of inland halophytes. I. Controlled studies on growth and isotopic composition of *Puccinellia nuttalliana*. Canadian Journal of Botany 64:2693-2699.

Guy, R.D. and Wample, R.L., 1983, Stable carbon isotope ratios of flooded and nonflooded sunflowers (*Helianthus annuus*). Canadian Journal of Botany 62: 1770-1774.

Guy, R.D., Fogel, M.L. and Berry, I.A., 1993, Photosynthetic fractionation of the stable isotopes of oxygen and carbon. Plant Physiology 101:37-47.

Hafsi, M., P. Monneveux, O. Merah and A. Djekoune, 2001, Carbon isotope discrimination and yield in durum wheat grown in the high plains of Sétif (Algeria). Secheresse, 12:37-43,(in English summary),

Hafsi, M., W.F.Pfeiffer and P. Monneveux, 2003, Flag leaf senescence, carbon isotope discrimination in durum wheat under semi arid conditions. Cereal Res.Commun.31:161-168.

Hall, A.E., E.D. Schulze and O.L. Lange, 1976, Current perspectives of steady state stomatal responses to environment. Problems and modern approaches. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. 536 pp.

Hall, A.E., R.G. Mutters, K.T. Hubick and G.D. Farquhar, 1990, Genotypic differences in carbon isotope discrimination by cowpea under wet and dry field conditions. Crop Sci., 30, 300-305.

Hanks, R.J., Gardner, H.R and Florian, R.L., 1969, Plant growth-evapotranspiration relations for several crops in central Great Plains. Agronomy Journal: 66,660-665.

Hartkamp, A.D., Hoogenboom, G., White, J.W., 2002, Adaptation of the CROPGRO growth model to Velvet Bean (*Mucuna pruriens*). I. Model development. Field Crops Res. 78, 9–25.

Hatfield, J. L., 1990, Agroclimatology of semiarid lands. P. 9-26

Hatfield, J.L., Sauer, T.J., Prueger, J.H., 2001, Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. Agronomy J. 93 (March/April (2)), 271–280.

Hay, R.K.M., Walker, A.J., 1989, An Introduction to the Physiology of Crop Yield. Longman Scientific and Technical, Harlow. Hsu, J.C., 1996. Multiple Comparisons: Theory and Methods. Chapman & Hall, London, p. 277.

Heinemann, A. B., G. Hoogenboom and B. Chojnicki, 2002, The impact of potential errors in rainfall observation on the simulation of crop growth, development and yield. *Ecological Modelling* 15:1–21.

Housley, T.L., Kirleis, A.W., Ohm, H.W., Patterson, F.L., 1982, Dry matter accumulation in soft red winter wheat seeds. *Crop Sci.* 22, 290–294.

Hunt, L.A., van der Poorten, G., Pararajasingham, S., 1991, Post anthesis temperature effects on duration and rate of grain-filling in some winter and spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 71: 609-617.

Hussain, M., Kubiske, M.E., Connor, K.F., 2001, Germination of CO₂ enriched *Pinus tneida* L. seeds and subsequent seedling growth responses to CO₂ enrichment. *Funct. Ecol.* 15, 344–350.

Innes, P. and Blackwell, R.D., 1983, Some effects of leaf posture on the yield and water economy of winter wheat. *J. Agric. Sci. (Cambridge)*, 101: 367-376.

Innes, P., Blackwell, R.D. and Quarrie, S.A., 1984, Some effects of genetic variation in drought-induced abscisic acid accumulation on the yield and water-use of spring wheat. *J. Agric. Sci. (Cambridge)*, 102: 341.

IAVHII (Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II), 1998, Bulletin de liaison du Programme National de transfert de technologie en agriculture.

IPCC (*the Intergovernmental Panel on Climate Change*), 2001, IPCC Special Report : The regional impacts of climate change. Website: <http://www.grida.no/climate/ipcc/regional/index.htm>

Ismail, A.M and A.E. Hall, 1992, Correlation between water-use efficiency and carbon isotope discrimination in diverse cowpea genotypes and isogenic lines. *Crop Sci.*, 32, 7-12.

Ismail, A.M., . Hall, A.E., 1993, Inheritance of carbon isotope discrimination and water-use efficiency in cowpea, *Crop Sci.* 33 (1993) 498 /and water-use efficiency in cowpea, *Crop Sci.* 33 (1993) 498 /503.

Jackson, P., Robertson, M., Cooper, M. and Hammer, G., 1996, The role of physiological understanding in plant breeding, from a breeding perspective. *Field Crops Res.*, 49: 11-37.

Jackson, R.B., Sala, O.E., Field, C.B. and Mooney, H.A., 1994, CO₂ alters water use, carbon gain, and yield for the dominant species in a natural grassland. *Oecologia* 98: 257-262.

Jenner, C.F. and Rathjen, A.J., 1975, Factors regulating the accumulation of starch in ripening wheat grain. *Austr. J. Plant Physiol.*, 2: 311-322.

Jones, H.G. and Corlett, J.E., 1992, Review current tropics in drought physiol. J. Agric. Sci. Cambridge. 1 19.291-296.

Jones, H.G., 1992, Plants and microclimate 2nd edition. Cambridge University Press. New York.

Jonny, G., Bob, D and Bryan, F., 2005, In search of sustainability. SCIRO publishing 2005

Jonoudi, A.K., I.E. Widders and J.A Flore, 1993, Water deficits and environmental factors effect photosynthesis in leaves of cucumber (*Cumunis sativus*). J. Am. Soc Hortic. Sci., 1 18, 366-3 70.

Kanemasu, E.T. and C.B. Tanner, 1969, Stornatal dinusion resistance of snap beans. 1. influence of leaf-water potential. Plant Physiol., 44, 1547- 15 52.

Kasukabe, Y., He, L., Nada, K., Misawa, S., Ihara, I., Tachibana, S., 2004, Over expression of spermidine synthase enhances tolerance to multiple environmental stresses and upregulates the expression of various stress-regulated genes in transgenic *Arabidopsis thaliana*. , Plant Cell Physiol. 45(6): p.712-22.

Keeling, P.L., Banisadr, R., Barone, L., Wasserman, B.P., and Singletary, A., 1994, Effect of temperature on enzymes in the pathway of starch biosynthesis in developing maize and wheat grain. Austr. J. Plant Physiol., 21: 807-827.

Kimball, B. A., 1983, Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. Agron. J., 75, 779-788.

Kirschbaum, M.U.F., Medlyn, B.E., King, D.A., 1998, Modeling forest-growth response to increasing CO₂ concentration in related to various factors affecting nutrient supply. Global Change Biol. 4, 23–41.

Kramer, P.J., 1969, Plant and Soil Water Relationships, Tata McGraw-Hill, Bombay, India, , 360 p.

Krishnamurthy, L.V., Vadez, M., Jyotsna Devi, R., Serraj, S.N., Nigam, Sheshshayee, M.S., Chandra, R. Aruna., 2007, Variation in transpiration efficiency and its related traits in a groundnut (*Arachis hypogaea* L.) mapping population, Field Crops Res.

Léifi Nodichao, 1997, biodiversité racinaire et résistance a la sécheresse. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation université Laval Québec.

Li, L., Yu, Q., 2007, Quantifying the effects of advection on canopy energy budgets and water use efficiency in an irrigated wheat field in the North China Plain, Agric. Water Manage. doi:10.1016/j.agwat. 2006.12.003

Lindroth, A. and E. Cienciala, 1996, Water-use efficiency of short-rotation *Salix viminalis* at leaf tree and stand scales. *Tree Physiol.*, 16, 257-262.

Loss, S.P., Siddique, K.H.M., 1994, Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environments. *Adv Agron* 52, 229–276

Machado, S., E. D. Bynum, T. L. Archer, R. J. Lascano, L. T. Wilson, J. Bordovosky, E. Segarra, K. Bronson, D. M. Nesmith, and W. Xu. 2002, Spatial and temporal variability of corn growth and grain yield: Implications for site-specific farming. *Crop Science* 42:1564—1576.

Maertens, C., Blanchet, R., Puech, J., 1974, Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. *Annales agronomiques* 25(4): 575-586.

Mavromatis, T., K.J. Boote, J.W. Jones, A. Irmak, D. Shinde and G. Hoogenboom, 2001, Developing Genetic Coefficients for Crop Simulation Models with Data from Crop Performance Trials. *Crop Science* 41 : 40 - 51.

McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M., 1995, APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural research. *Agric. Syst.* 50, 255–271

Meinzer, F.C., G. Goldstein and D.A. Grantz, 1990, Carbon isotope discrimination in coffee genotypes grown under limited water supply. *Plant Physiol*, 92, 130- 135.

Merah, O., Deleens, E., Monneveux, P., 2001, Relationships between carbon isotope discrimination, dry matter production, and harvest index in durum wheat. *J. Plant Physiol.* 158, 723–729.

Meyer, W.S., Green, G.C., 1981, Plant indicators of wheat and soybean crop water stress. *Irrigation Science* 2: 167-176.

Miller, P.C. and H.A. Mooney, 1974, The origin and structure of American ecosystems. The producers: interaction between environment, form and function. *Proc- 1 st Int. Congr. Ecol.*, The Hague, pp. 201-9.

Mokhtari, F., Qariani, L., El Jaafari, S. and Paul, R., 1997, L'efficacité d'utilisation de l'eau: Un caractère de tolérance au déficit hydrique chez le blé dur. *Arch. Inter. Physiol. Biochem. Biophys.*, 105(4): 12.

Monteith, J.L., 1996, The Quest for Balance in Crop Modeling. *Agronomy Journal* 88 : 695 - 697.

Moragues, M., García del Moral, L.F., Moralejo, M., Royo, C., 2006, Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the

Mediterranean basin: II. Biomass production and allocation. *Field Crop. Res.* 95, 182–193.

Morgan, J.A. and D.R LeCain, 1991, Leaf Gas Exchange and related leaf traits among 15 winter wheat genotypes. *Crop Sciences.*, 3 1,443 -448.

Morgan, J.M., Condon, A.G., 1986, Water use, grain yield and osmoregulation in wheat. *Austr. J. Plant Physiol.*, 13: 523-532.

Murray,D.R., 2003, SEEDS CONCERN The genetic manipulation of plants, CABI publishing, 115 p.

Nicholls,N., Gruza,G.V., Jouzel, J., Karl,T.R., Ogallo,L.A and Parker,D. E., 1996, Observed climate variability and change in :Houghton,J ,T.Meira Filho,L,G.Callander,B,A.Harris,N.Kattenberg,A and Maskell,K(eds) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp,133-192.

Nobel, P. S., 1980, Leaf anatomy and water use efficiency. pp 43-53. IN: N.C. Turner and P.G.Kramer (eds.).*Adaptation of plants to water and high temperature stress*. John Wdey and Sons,New York.

Nobel, P.S., 1991, *Physicochemical and environmental plant physiology*, pp. 109-1 83. Academic Press, hc., New York, NY.

O'Leary, M.H., 1988, Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience* 38(5):328-336.

Osorio, J. and J.S. Pereira, 1994, Genotypic differences in water-use efficiency and ¹³C discrimination in *Eucalpius globulus*. *Tree Physiol.*, 14, 87 1-8 8 1 .

Ozturk, A., Aydin, F., 2004, Effects of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *J. Agron. Crop Sci.* 190, 93–99.

Paez, A., Hellmers, H. and Strain, B.R., 1984, Carbon dioxide enrichment and water stress interaction on growth of two tomato cultivars. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 102: 687-693.

Parr, I. F., Stewart, B. A., Homick, S. B. et Singh, R. P., 1990, Improving the sustainability of dry land farming systems: A global perspective. P. 1-8 In Singh R. P., Parr J. F., et Stewart B. A. (eds). *Dry land Agriculture Strategies for sustainability*, Adv. Soi1 Sci. 13 : Springer-Verlag, New York.

Passioura, J., 1977, Grain yield, harvest index and water use of wheat. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 43, 117–120.

Passioura, J., 1980, The meaning of matrix potential. *Journal of Experimental Botany* 31(123): 1161-1169.

Passioura, J., 1996, Simulation Models : Science, Snake Oil, Education or Engineering? *Agronomy Journal* 88 : 690 - 694.

Payne, A.W., M.C. Drew, L.R. Hosser, R.I. Lascano, A.B. Onken and C.W. Wendt, 1992, Crop ecology, production and management; Soil phosphorus availability and pearl millet water-use 140 efficiency. *CropSci.*, 32, 1010-1015.

Pellegrineschi, A., Reynolds, M., Pacheco, M., Brito, R.M., Almeraya, R., Yamaguchi-Shinozaki, K., Hoisington, D., 2004, Stress induced expression in wheat of the *Arabidopsis thaliana* DREB1A gene delays water stress symptoms under greenhouse conditions. *Genome* 47(3): p. 493-500.

Pettigrew, W.T., J.J. Heitholt and K.C. Vaughn, 1993, Gas exchange differences and comparative anatomy among cotton leaf type isolines. *Crop Sci.*, 33, 1295- 1299.

Philip, J.R., 1966, Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology* 17: 245-268.

Polley, H.W., Johnson, H.B., Marino, B.D., 1993, Increase in C3 plant water-use efficiency and biomass over glacial to present CO₂ concentrations. *Nature* 361, 61–64.

Pretty, J.N., Morison, J.I.L., Hine, R.E., 2003, Reducing food poverty by increasing agricultural sustainability in developing countries. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95, 217–234.

Qin, D.H., 2003, Facts, impacts, adaptation, and mitigation strategy of climate change. *Chin. Sci. Fund.* 1, 1–3 (in Chinese with English abstract).

Radoglou, K.M., P. Aphalo and P.G. Jarvis, 1992, Response of photosynthesis, stomatal conductance and water-use efficiency to elevated CO₂ and nutrient supply in acclimated seedlings of *Phaseolus vulgaris* L. *Annals of Botany*, 70, 257-264.

Rajaram, S., Van Ginkel, M., 1996, Yield potential debate: germplasm vs. methodology, or both. In M.P. Reynolds, S. Rajaram & A. McNab, eds. *Increasing Yield Potential in Wheat: Breaking the Barriers. Workshop Proc.*, Cd. Obregon, Mexico, 28-30 Mar. 1996. Mexico, DF, CIMMYT.

Randall, P.J., Moss, H.J., 1990, Some effects of temperature regime during grain filling on wheat quality. *Australian Journal of Agricultural Research* 41: 603-617.

Ratliff, L.F., Ritchie, J.T., Cassel, D.K., 1983, A survey of field-measurement of soil water availability and related laboratory-measured properties. *Soil Science Society of American Journal* 47: 750-775.

Rawson, K.U., J.E. Begg and R.G. Woodward, 1977, The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water-use efficiency of leaves of several plant species. *Planta*, 134, 5

Read, J.J., D.A. Johnson, K.H. Asay and., L. L. Tieszen 1991, Carbon isotope discrimination, gas exchange, and water-use efficiency in crested wheat grass clones. *Crop Sci.* 31, 1203-1208.

Rebetzke, G.J., A.G. Condon, R.A. Richards, and G.J. Farquhar 2002, Selection for reduced carbon-isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. *Crop Sci.* 42: 739-745.

Rebetzke, G.J., A.G. Condon, R.A. Richards and G.D. Farquhar, 2002, Selection for reduced carbon-isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. *Crop Sci.* 42: 739-745.

Reid, T.R., 1998, Feeding the planet. *National Geographic* 194(4): 56–75.

Reuveni, J.,, Gale, J., 1985, The effect of high levels of carbon dioxide on dark respiration and growth of plants. *Plant Cell Environ.* 8, 623–628.

Reynolds, M.P., Acevedo, E., Sayre, K.D. and Fischer, R.A., 1994, Yield potential in modern wheat varieties: its association with a less competitive ideotype. *Field Crops Res.*, 37: 149-160.

Reynolds, M.P., Singh, R.P., Ibrahim, A., Ageeb, O.A.A., Larqué-Saavedra, A. and Quick, J.S., 1998, Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica*, 100: 84-95.

Ribaut, J.M., Hoisington, D., Banziger, M., Setter, T.L., Edmeades, G.O., 2004, Genetic dissection of drought tolerance in maize: A case study. In: Nguyen HT, Blum A (eds) *Physiology and biotechnology integration for plant breeding*. Marcel Dekker Inc, New York, pp 571-609

Richards, R.A., 1991, Crop improvement for temperate Australia: future opportunities. *Field Crops Res.*, 26: 141-169.

Richards, R.A., 1996, Defining selection criteria to improve yield under drought. *Plant Grow. Reg.*, 20: 157-166.

Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Condon, A.G. and Mickelson, B.J., 1996, Targeting traits to increase the grain yield of wheat. In R.A. Richards, C.W. Wrigley, H.M. Rawson, G.J. Rebetzke, J.L. Davidson & R.I.S. Brettell, eds. *Proc. 8th Assembly, Wheat Breeding Society of Australia*, p. 054-057. Sydney, Australia, Wheat Breeding Society of Australia.

Rijsberman, F.R., 2004, Water scarcity: fact or fiction? In: Fischer, T., Turner, N., Angus, J., McIntyre, L., Robertson, M., Borrell, M., Lloyd, D. (Eds.), *New Directions for a Diverse Planet: Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26 September–1 October 2004*. <www.cropscience.org.au>.

Ritchie, J.T., 1981, Soil water availability. *Plant and Soil* 58: 327-338.

Ritchie, J.T., 1990, Specifications of the ideal model for predicting crop yields. In: Russell, C. Muchow, Jennifer, A. Bellamy (Eds.), *Climatic risk in crop production*, Brisbane, Australia, pp. 97–123.

Rogers, G.S., Milham, P.J., Thibaud, M.C., 1996, Interactions between rising CO₂ concentration and nitrogen supply in cotton. I. Growth and leaf nitrogen concentration. *Aust. J. Plant Physiol.* 23, 119–125.

Rogers, H.H., G.E. Bingham, J.D. Cure, I.M. Smith and K.A. Surano, 1983, Response of selected plant species to elevated carbon dioxide in the field. *J. Environ. Qual.*, 12, 569-574.

Rosenzweig, C., Parry, M.L., 1994, Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367, 133–138.

Rosielle, A., 1999, Corporate view. *Proceedings 11th Australian Plant Breeding Conference, CRC for Molecular Plant Breeding, Adelaide, Volume 1: 6.*

Royo, C., 2003, Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions *Europ. J. Agronomy* 20 419–430

Royo, C., Michelena, A., Carrillo, J.M., Garcí'a, P., Juan-Aracil, J., Soler, C., 1998, Spanish durum wheat breeding program. In: Nachit, M.M., Baum, M., Porceddu, E., Monneveux, P., Picard, E. (Eds.), *SEWANA (South Europe, West Asia and North Africa) Durum Research Network. Proceedings of the SEWANA Durum Network Workshop, Syria*, pp. 80–87.

Salisbury, F.B. and Ross, C.W., 1992, *Plant Physiology* 4th Edition. Wadsworth Publishing Company. Belmont, California.

Saulescu, N.N. and W.E. Kronstad, 1995, Growth Simulation Output for Detection of Differential Response to Environmental Factors. *Crop Science* 35 : 773-778.

Schepers, J. S., D. D. Francis, M. Vigil et F. E. Below, 1992, "Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings." *Communications in soil science and plant analysis* 23(17-20): 2173-2187.

Schofield, R.K., 1985, The pf of the water in soil. *Trans. 3rd Int. Cong. Soil Sci.*, 2, p. 37-48.

Schulze, E.D. and Hall, A.E., 1982, Stomatal responses, water loss and CO₂ assimilation rates of plants in contrasting environments. In: *Encyclopedia of Plant Physiology, Physiological Plant Ecology II New Series Vol 12B: 18 1-230*, eds. Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Zieler, H. Springer-Verlag, Berlin.

Schulze, E.D., O.L. Lange, L. Cappen, U. Buschbom and M. Evenari, 1973, Stomatal responses to changes in temperature at increasing water stress. *Planta*, 110, 29-42.

Shan, L., 2003, Issues of science and technology on water saving agricultural development in China. *Agricultural Research in Arid Areas* 21(1), 1-9

Shanahan, J.F., Edwards, I.B., Quick, J.S. and Fenwick, R.J., 1990, Membrane thermostability and heat tolerance of spring wheat. *Crop Sci.*, 30: 247-251.

Sharifi, A.R. and P.W. Rundel, 1993, The effect of vapor pressure deficit on carbon isotope discrimination in the desert shrub *larrea tridentata* (Creosote bush). *J. exp. Bot.*, 44,481487.

Sharkey, T.D., 1985, Photosynthesis in intact leaves of C3 plants: physics, physiology and rate limitations. *The Botanical Review* 5153-105,

Shorter, R., R.J. Lawn and G.L. Hammer, 1991, Improving genotypic adaptation in crops - A role for breeders, physiologist and modellers. *Experimental Agriculture* 27 : 155-175.

Simane, B., Peacock, J.M., Struik, P.C., 1993, Differences in developmental plasticity and growth rate among drought resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var durum). *Plant soil* 157, 155–166.

Singh, B., Y. Singh, J. K. Ladha, K. F. Bronson, V. Balasubramanian, J. Singh, and C. S. Khind. 2002, Chlorophyll meter- and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in northeastern India. *Agronomy Journal* 94:821–829.

Slafer, G.A., Rawson, H.M., 1994, Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Australian Journal of Plant Physiology* 21: 393-426.

Smeal, D. and H. Zhang, 1994, "Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25(9-10): 1495-1503.

Smith, M., 2000, The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. *Agr. Forest Meteorol.* 103, 99–108.

Smith, W.K., 1978, Temperatures in desert plants :another perspective on the ability of leaf size. *Science* 201:614-616

Sofield, I., Evans, L.T., Cook, M.G., Wardlaw, I.F., 1977, Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 4: 785-797.

Spiertz, J.H.J., 1978, Grain production and assimilate utilization of wheat in relation to cultivar characteristics, climatic factors and nitrogen supply. *Versl. Land-bou-wkund, Onderz.* 881: 1-35.

Spitters, C.J., Van Keulen, H., Van Kraalingen, D.W.G., 1989, A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: Rabbinge, R., Ward, S.A., van Laar, H.H. (Eds.), *Simulation and Systems Management in Crop Protection, Simulation Monographs 32*, Pudoc, Wageningen.

Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003, CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18 (3–4), 289–307. Second special issue “Proceedings of the 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems, Florence, Italy”.

Stöckle, C.O., Nelson, R.L., 1999, *CropSyst User’s Manual*. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, USA.

Stone, P.J., Savin, R., Wardlaw, I.F., Nicolas, M.E., 1995, The influence of recovery temperature on the effects of a brief heat shock on wheat I. Grain growth. *Australian Journal of Plant Physiology* 22: 945-954.

Stoy, V., 1965, Photosynthesis, respiration, and carbohydrate accumulation in spring wheat in relation to yield. *Physiol. Plantar. Suppl. IV*, p. 1-125.

Tanner, C.B. et Sinclair, T.R., 1983, Efficient water use in crop production: Research or Re-search? In “Limitation to efficient water use in crop production” (H.M.Taylor, W.R. Jordan et T.R. Sinclair, eds)

Tashiro, T., Wardlaw, I.F., 1990, The response to high temperature shock and humidity changes prior to and during the early stages of grain development in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 17: 551-561.

Teulat B., O. Merah and D. This, 2001, Carbon isotope discrimination and productivity in field grown barley genotypes. *J. Agron. Crop Sci.* 187: 33-39.

Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Barend, F., Erasmus, N., Ferriera desequiera, M., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., Vanjaarsveld, A.S., Midgley, G.F., Milles, L., Ortega Huerta, M.A., Peterson, A.T., Phillips, O.L. and Williams, S.E., 2004, Extinction risk from climate change. *Nature* 427 :145-8.

Thomas, R.B., Harvey, C.N., 1993, Leaf anatomy of four species growth under continuous CO₂ enrichment. *Bot. Gazette* 144, 303–309.

Tokatlidis, I.S., J.T. Tsialtas, I.N. Xynias, E. Tamoutsidis, M. Irakli, 2004, Variation within a bread wheat cultivar for grain yield, protein content, carbon isotope discrimination and ash content, *Field Crops Res.* 86 (2004) 33–42.

Tyree, M.T., Cochard, H., 2003, Vessel contents of leaves after excision: a test of the Scholander assumption. *Journal of Experimental Botany* 54(390): 2133-2139.

Uehara, G., Tsuji, G.Y., 1993, The IBSNAT project. In: Penning de Vries, F.W.T., Teng, P., Metselaar, K. (Eds.), *Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 505–513.

Valle, R., J. W. Mishoe, J. W. Jones and L.H. Alen, 1985, Transpiration rate and water-use efficiency of soybean leaves adapted to different CO₂ environment. *Crop Sci.*, 25, 477-482.

Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Goudriaan, J., 2003, On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18 (3–4), 201–234. Second Special Issue “Proceedings of the 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems, Florence, Italy”.

Wang, F., Fraise, C.W., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., (2003), Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri claypan soils. *Agric. Syst.* 76, 985–1005.

Wang, H.X., Liu, C.M and Zhang, L., 2002, Water-saving Agriculture in China: An Overview. *Advances in Agronomy* 75, 135-171.
Wang, Z., Li, S., Vera, C.L., Malhi, S.S., (2005), Effects of water deficit and supplemental irrigation on winter wheat growth, grain yield and quality, nutrient uptake, and residual mineral nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36, 1405–1419.

Wardlaw, I.F., Dawson, I.A., Munibi, P., Fewster, R., 1989, The tolerance of wheat to high temperatures during reproductive growth. II. Survey procedures and general response patterns. *Australian Journal of Agricultural Research* 40: 1-13.

Wardlaw, I.F., Moncur, L., 1995, The response of wheat to high temperature following anthesis. I. The rate and duration of kernel filling. *Australian Journal of Plant Physiology* 22: 391-397.

Wei, C., Tyree, M.T., Steudle, E., 1999, Direct measurement of xylem pressure in leaves of intact maize plants. A test of the cohesion-tension theory taking hydraulic architecture into consideration. *Plant Physiology* 121: 1191-1205.

Westcott, M. P. et J. M. Wraith, 1995, “Correlation of leaf chlorophyll readings and stem nitrate concentrations in peppermint.” *Communications in soil science and plant analysis* 26(9-10): 1481-149.

Wheeler, T.R., Hong, T.D., Ellis, R.H., Batts, G.R., Morison, J.I.L., Hadley, P., 1996,. The duration and rate of grain growth, and harvest index, of wheat (*Triticum aestivum*) in response to temperature and CO₂. *Journal of Experimental Botany* 47: 623-630.

Whisler, F.D., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon, J.M. McKinion and V.R. Reddy, 1986, Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy* 40 : 141 - 208.

Wolf, J., 1993, Effects of climate change on wheat production potential in the European community. *Eur. J. Agron.* 2, 281–292.

Woodward, G.M., 1989, The warming of the industrialized middle latitudes 1985–2050: causes and consequences. *Climatic Change* 15, 31–50.

Wright, G.C., Nageswara Rao, R.C., Farquhar, G.D., 1994, Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in peanut under water deficit conditions. *Crop Sci.* 34, 92–97.

Xin, N.Q. and Wang, L.X., 1998, Agriculture in arid regions of Northern China. Jiangsu Science and Technology Press, Nangjing.

Yang, H.S., Dobermann, A., Lindquist, J.L., Walters, D.T., Arkebauer, T.J., Cassman, K.G., 2004, Hybrid-maize-a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Res.* 88, 131–154.

Ye, X., Al-Babili, S., Klöti, A., Zhang, J., Lucca, P., Beyer, P. et Potrykus, I., 2000, Engineering The provitamin A (beta-carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm. *Science* 287(5451):303:305.

Ziaei, A.N., Sepaskhah, A.R., 2003, Model for simulation of winter wheat yield under dryland and irrigated conditions. *Agr. Water Manage.* 58, 1–17.