

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE FERHAT ABBAS. SETIF**

## **Mémoire**

**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 : Semcheddine Nadjim**

## **Thème**

**Utilisation de la discrimination isotopique du carbone  
comme critère de sélection du blé dur en relation  
avec le bilan hydrique**

**Soutenu le :**

**Devant le Jury :**

<b>Président</b>	<b>: Dr BOUZERZOUR. H</b>	<b>Prof Université Ferhat Abbas Sétif</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>: Dr HAFSI. M</b>	<b>M.C Université Ferhat Abbas Sétif</b>
<b>Examineur</b>	<b>: Dr BOUDJENOUIA. A</b>	<b>M.C Université Ferhat Abbas Sétif</b>
<b>Examineur</b>	<b>: Dr MESLEM. M</b>	<b>M.C Université Ferhat Abbas Sétif</b>

## Résumé

Le déficit hydrique peut engendrer des pertes de rendement à n'importe quel stade de développement du blé. Chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*), en région méditerranéenne, la sécheresse est une des causes principales des pertes de rendement qui varient de 10 à 80% selon les années (Nachit & al., 1998). A l'échelle annuelle, les conséquences d'une sécheresse dépendent de sa période et de sa durée d'action (Amigues & al., 2006).

Ce travail a été réalisé durant la campagne 2006/2007, avec une collection de huit génotypes provenant d'une sélection Cimmyt/Icarda. Dans la première partie, nous avons étudié le bilan hydrique pour essayer de caractériser les phases du stress hydrique. Dans la seconde partie, nous avons étudié la cinétique de croissance des génotypes. Le rendement a été analysé à travers l'étude de ces composantes. La réaction des génotypes face au stress hydrique a été étudiée en relation avec le rendement, l'efficacité d'utilisation de l'eau et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

Le bilan hydrique montre que la culture a connu trois phases de stress. La première est observée durant les premiers jours qui ont suivi le semis, la seconde au stade levée début montaison. Enfin, la troisième phase coïncide avec le stade épiaison et se prolonge jusqu'à la récolte et semble avoir le plus d'impact sur le rendement.

Les résultats montrent que les génotypes les plus précoces, surtout à l'épiaison, utilisent efficacement l'eau et réalisent les meilleurs rendements. Enfin la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$  est positivement corrélée à la précocité, à l'indice de récolte, à l'efficacité d'utilisation de l'eau et par conséquent au rendement.

## المخلص

نقص الماء يحدث خسائر في المردود في أي مرحلة من مراحل نمو القمح. عند القمح الصلب (*Triticum durum Desf.*) في المناطق المتوسطة، يعتبر الجفاف من أهم مسببات الخسائر في المردود و التي تتراوح بين 10 و 80% حسب المواسم (Nachit & al., 1998). على المستوى الموسمي، عواقب الجفاف مرتبطة بالمدة و طول تأثيرها (Amigues & al., 2006).

أنجز هذا العمل خلال الموسم 2007/2006 باستعمال ثماني أصناف انتخبت من طرف Cimmyt/Icarda. في الجزء الأول قمنا بدراسة المحصلة المائية بغية تشخيص فترات الإجهاد المائي. في الجزء الثاني، درسنا حركية نمو الأنماط الوراثية. تم تحليل المردود عن طريق دراسة مركباته. كما تمت دراسة تفاعل الأنماط الوراثية مع الإجهاد المائي عن طريق العلاقة بين المردود، فعالية استغلال الماء و تمييز نظير الكربون  $^{13}\text{C}$ .

المحصلة المائية أظهرت ثلاث فترات من الإجهاد. الأولى لوحظت خلال الأيام الأولى التي تلت البذر، الثانية عند مرحلة الإنبات و الصعود، أما الفترة الثالثة فصادفت مرحلة التسنبل و استمرت حتى الحصاد و هي الفترة التي ربما لها أكبر تأثير على المردود.

النتائج تدل على أن الأصناف المبكرة، خاصة أثناء التسنبل، تستغل الماء بفعالية و تعطي مردود أكبر.

و في الأخير، تمييز نظير الكربون  $^{13}\text{C}$  مرتبط إيجابيا مع الإبكار، مؤشر المحصول، فعالية استغلال الماء و بالتالي المردود.

## **Remerciements**

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et remerciements à mon Encadreur, Docteur Hafsi Miloud, Maître de Conférences à la faculté des Sciences de l'Université Ferhat Abbas de Sétif qui a fait preuve d'une grande patience à mon égard et a été d'un grand apport pour la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à exprimer mes plus grands respects et mes vifs remerciements au Professeur Bouzerzour H, de la faculté des Sciences de l'Université Fehat Abbas de Sétif pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

Mes remerciements les plus profonds au Docteur Boudjenouia A, et au Docteur Meslem D, Maîtres de Conférences à faculté des Sciences de l'Université Fehat Abbas de Sétif qui ont bien voulu examiner ce travail.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à ma famille pour son soutien, ses encouragements et sa patience.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

## Liste des abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Explication</b>
Bio :	Biomasse aérienne.
Cc :	Capacité au champ.
D :	Drainage.
DEP1 :	Date de 50% d'épiaison.
DEP2 :	Date de 100% d'épiaison.
DMSO :	Dimethylsulfoxyde.
Es :	Evaporation de l'eau du sol.
ET :	Evapotranspiration.
ETc adj :	Evapotranspiration de culture ajustée.
ETc :	Evapotranspiration potentielle de culture.
ETM :	Evapotranspiration maximale.
ETo :	Evapotranspiration de référence.
ETP :	Evapotranspiration potentielle.
ETR :	Evapotranspiration réelle.
EUE :	Efficacité d'utilisation de l'eau.
H :	Horizon.
ha :	Hectare.
HI :	Indice de récolte.
HT :	Hauteur.
Kc :	Coefficient cultural.
Ks :	Coefficient de stress (méthode gravimétrique).
K's :	Coefficient de stress (méthode de simulation).
mm :	Millimètre.
NE/m <sup>2</sup> :	Nombre d'épis par mètre carré.
NG/E :	Nombre de grains par épi.
NG/m <sup>2</sup> :	Nombre de grains par mètre carré.
NP/m <sup>2</sup> :	Nombre de plant par mètre carré.
P :	Pluie.
PMG :	Poids de mille grains.
pF :	Point de flétrissement.
R :	Ruissellement.
RE :	Réserve en eau du sol.
RU :	Réserve en eau utile du sol.
T :	Transpiration.
TEP :	Tallage épiaison.
Rdt :	Rendement grains.
RFU :	Réserve facilement utilisable.
TC :	Teneur en chlorophylle.
W :	Efficacité de la transpiration
$\Delta^{13}\text{C}$ :	Discrimination isotopique du carbone
$\sigma$ :	Densité apparente du sol.

## Listes des tableaux

- Tableau 1.** Production mondiale du blé en tonnes.
- Tableau 2.** Production de blé dur dans le monde en millions de tonnes.
- Tableau 3.** Coefficient cultural du blé.
- Tableau 4.** Réserve en eau du sol selon la texture (Jamagne & al., 1977).
- Tableau 5.** Paramètres de sortie du modèle *BUDGET*.
- Tableau 6.** Caractères impliqués dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse.
- Tableau 7.** Granulométrie et paramètres hydriques du sol de l'expérimentation.
- Tableau 8.** Températures et précipitations des périodes 1981/2005 et 2006/2007.
- Tableau 9.** Variation de la réserve utile et de la RFU selon les horizons (en mm).
- Tableau 10.** Précipitation, ETR et variation de la réserve utile (en mm).
- Tableau 11.** Bilan hydrique selon les stades phénologiques.
- Tableau 12.** Bilan hydrique du stade; début montaison à l'épiaison.
- Tableau 13.** Résultats de la simulation du bilan hydrique.
- Tableau 14.** Le stress hydrique des deux premières phases.
- Tableau 15.** Paramètres du bilan hydrique de la troisième phase.
- Tableau 16.** Paramètres du bilan hydrique du stade épiaison.
- Tableau 17.** Paramètres du bilan hydrique du stade post épiaison.
- Tableau 19.** Levée, tallage herbacé et production de matière sèche.
- Tableau 20.** Duré d'épiaison.
- Tableau 21.** Nombre d'épis et tallage.
- Tableau 18.** Valeurs moyennes du rendement et de ses composantes.
- Tableau 21.** La teneur en chlorophylle (en  $\mu\text{mol/g}$ ).
- Tableau 22.** Matrice de corrélations des teneurs en chlorophylle.
- Tableau 23.** Classement des génotypes selon la teneur en chlorophylle.
- Tableau 24.** Discrimination isotopique du carbone.
- Tableau 25.** Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) et efficacité de la transpiration (W) en gramme/millimètre /m<sup>2</sup> d'eau.

## Liste des figures

**Figure 1.** Evapotranspiration de référence (ET<sub>o</sub>).

**Figure 2.** Evapotranspiration de culture (ET<sub>c</sub>).

**Figure 3.** Evapotranspiration de culture ajustée (ET<sub>c</sub> adj).

**Figure 4.** Echelle d'étude de l'efficacité d'utilisation de l'eau.

**Figure 5.** Températures mensuelles des périodes 1981/2005 et 2006/2007.

**Figure 6.** Précipitations mensuelles de la campagne 2006/2007.

**Figure 7.** Variation de la réserve hydrique du sol selon les horizons.

**Figure 8.** Evapotranspiration réelle et variation de la réserve hydrique sur le profil 0 – 80 cm.

**Figure 9.** Stress hydrique durant la deuxième phase.

**Figure 10.** Stress hydrique durant la troisième phase.

**Figure 11.** Stress hydrique durant le stade épiaison.

**Figure 12.** Cinétique de l'épiaison.

**Figure 13.** Relation entre la biomasse et la hauteur.

**Figure 14.** Relation entre le rendement et la hauteur.

**Figure 15.** Relation entre la hauteur et l'indice de récolte.

**Figure 16.** Relation entre l'indice de récolte et la biomasse.

**Figure 17.** Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le rendement.

**Figure 18.** Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le nombre de grains/Epis.

**Figure 19.** Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le nombre de Plant/m<sup>2</sup>.

**Figure 20.** Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le PMG.

**Figure 21.** Relation entre le rendement et le stress hydrique du stade épiaison.

**Figure 22.** Relation entre le rendement et le stress hydrique du stade post épiaison.

**Figure 23.** Relation entre le rendement et le stress au stade 50% de l'épiaison.

**Figure 24.** Relation entre le rendement et le stress hydrique au stade 100% de épiaison.

**Figure 25.** Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et nombre de jour à 50% de l'épiaison.

**Figure 26.** Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et nombre de jour à 100% de l'épiaison.

**Figure 27.** Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et la hauteur.

**Figure 28.** Relation entre le rendement et le stress hydrique du stade épiaison.

**Figure 29.** Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

**Figure 30.** Relation entre rendement en grains et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

**Figure 31.** Relation entre l'indice de récolte et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

**Figure 32.** Relation entre la biomasse et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

## Liste des annexes

**Annexe 1.** Description du matériel végétal.

**Annexe 2a.** Paramètres climatiques décennaires de la campagne 2006/2007

**Annexe 2b.** Paramètres climatiques journaliers de la campagne 2006/2007.

**Annexe 3.** Evolution du taux d'épiaison.

**Annexe 4.** Matrice de corrélation des paramètres étudiés.

**Annexe 5.** Analyse de variance des variables mesurées.



# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I. Blé et bilan hydrique</b>	
<b>1- Le blé</b> .....	3
1-1 Cycle de croissance et de développement du blé.....	3
1-2 Importance économique.....	4
1-2-1 Dans le monde.....	4
1-2-2 En Algérie.....	5
<b>2- Le climat</b> .....	6
2-1 En Algérie.....	6
2-2 Impact des changements climatiques sur la production agricole.....	7
<b>3- Bilan hydrique</b> .....	8
3-1 Evapotranspiration réelle (ETR).....	10
3-2 Evapotranspiration potentielle (ETP).....	10
3-3 Evapotranspiration de référence (ETo).....	10
3-4 Evapotranspiration potentielle de la culture (ETc).....	10
3-5 Coefficient de culture (Kc).....	11
3-6 Evapotranspiration de la culture ajustée (ETc adj).....	11
3-7 Sol et bilan hydrique.....	12
3-7-1 Réserve utile (Ru).....	12
3-7-2 Capacité au champ et Point de flétrissement .....	13
3-7-3 Réserve facilement utilisable (RFU).....	14
<b>4- Simulation du bilan hydrique par le modèle <i>BUDGET</i></b> .....	15
4-1 Entrées du modèle.....	15
4-1-1 Précipitations.....	15
4-1-2 Evapotranspiration de référence ETo.....	15
4-1-3 sol.....	15
4-1-4 Matériel végétal.....	15
4-2 Programmation.....	16
4-2 Sorties du modèle et simulation.....	16
<b>Chapitre II. Mécanismes d'adaptation à la sécheresse</b>	
<b>1- La sécheresse et ses conséquences</b> .....	17
1-2 Effets du déficit hydrique sur le végétal.....	17
1-3 Effet du déficit hydrique sur le blé.....	18

<b>2- Mécanismes d'adaptation à la sécheresse</b> .....	19
2-1 Adaptations phénologiques.....	19
2-2 Adaptations morphologiques.....	20
2-2-1 Système raciner.....	20
2-2-2 Surface foliaire.....	21
2-2-3 Glaucescence, pilosité, cire et barbes.....	21
2-3 Adaptations physiologiques.....	22
2-3-1 Régulation stomatique.....	22
2-3-2 Potentiel hydrique et ajustement osmotique.....	23

## **Chapitre III. Efficacité d'utilisation de l'eau et discrimination isotopique du carbone**

<b>1- Efficacité d'utilisation de l'eau</b> .....	25
1-1 Efficacité d'utilisation de l'eau comme critère de sélection.....	25
1-2 Sélection pour l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la feuille.....	26
1-2-1 Diminution du gradient de la concentration en vapeur d'eau.....	27
1-2-2 Changement du rapport $C_i/C_a$ .....	27
<b>2- Discrimination isotopique du carbone</b> .....	28
2-1 Relation entre $\Delta^{13}C$ et le ratio $C_i/C_a$ .....	28
2-2 Relation entre $\Delta^{13}C$ et l'efficacité d'utilisation de l'eau.....	29
2-3 Relation entre rendement en grains et $\Delta^{13}C$ chez les céréales.....	30
<b>3- Interaction entre croissance et utilisation de l'eau</b> .....	31

## **Chapitre IV. Matériels et méthodes**

<b>1- Protocole expérimental</b> .....	34
<b>2- Notations</b> .....	34
2-1 Rendement et composantes du rendement.....	34
2-2 Teneur en chlorophylle.....	35
2-3 Discrimination isotopique du carbone ( $\Delta^{13}C$ ).....	35
2-4 Etat hydrique du sol.....	35
<b>3- Etude statistique</b> .....	35

## **Chapitre V. Résultats et discussion**

<b>1- Résultats</b> .....	37
<b>1-1 Bilan hydrique par la méthode gravimétrique</b> .....	37
1-1-1 Températures.....	37
1-1-2 Précipitations.....	37
1-1-3 Etat hydrique du sol selon les horizons.....	39
1-1-4 Bilan hydrique selon des stades phénologiques.....	39

1-1-4-1 Semis – Levée.....	42
1-1-4-2 Levée - Début montaison.....	42
1-1-4-3 Début montaison - Epiaison.....	44
1-1-4-4 Epiaison - Maturité.....	45
Conclusion.....	45
<b>1-2 Simulation du bilan hydrique par le modèle <i>BUDGET</i>.....</b>	<b>46</b>
1-2-1 Paramètres du bilan hydrique.....	46
1-2-2 Phases de stress hydrique selon la phénologie.....	46
1-2-2-1 Première phase.....	46
1-2-2-2 Deuxième phase.....	47
1-2-2-3 Troisième phase.....	47
A - Stade épiaison.....	49
B - Stade post épiaison.....	50
<b>1-3 Elaboration du rendement.....</b>	<b>51</b>
1-3-1 Levée et tallage herbacé.....	51
1-3-2 Epiaison.....	51
1-3-3 Tallage épi.....	53
1-3-4 Nombre de grains par m <sup>2</sup> et fertilité épi.....	53
1-3-5 Poids de mille grains.....	53
1-3-6 Biomasse aérienne et hauteur des chaumes.....	53
1-3-7 Rendement grain.....	54
1-3-8 Indice de récolte.....	54
<b>1-4 Evaluation de quelques paramètres physiologiques.....</b>	<b>55</b>
1-4-1 Teneur en chlorophylle.....	55
1-4-2 Discrimination isotopique du carbone.....	56
1-4-3 Efficacité d'utilisation de l'eau et de la transpiration.....	57
1-4-3-1 Production de Biomasse.....	57
1-4-3-2 Rendement grain et EUE.....	57
<b>2- Discussion des résultats.....</b>	<b>58</b>
<b>2-1 Relations entre le rendement et ses composantes.....</b>	<b>58</b>
2-1-1 Biomasse, hauteur et indice de récolte.....	58
2-1-2 Nombre et poids du grain.....	60
<b>2-2 Efficacité d'utilisation de l'eau et de la transpiration en relation avec la discrimination isotopique du carbone.....</b>	<b>64</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>69</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>70</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>84</b>

## Introduction

Les efforts fournis pour répondre aux besoins alimentaires de la population mondiale toujours croissants ont conduit à la détérioration des conditions agricoles dans plusieurs endroits au monde. La désertification, l'érosion et la salinisation des sols sont les conséquences et aussi les causes de ces développements.

Actuellement, environ 20% des terres agricoles autour du monde sont irriguées, et ces terres fournissent environ 40% de l'approvisionnement alimentaire au monde. La sécheresse et les pénuries d'eau menacent la capacité de se nourrir pour de nombreux pays en développement, particulièrement ceux en Afrique.

Durant les trente dernières années, le potentiel du rendement a augmenté approximativement de 0,9% par an. Pour les prochaines vingt années, on estime qu'il faudrait une croissance de 1,6% par an pour satisfaire la demande toujours croissante (Reynolds & *al.*, 2000)

A l'échelle mondiale, près d'un tiers des terres arables souffre d'un déficit en eau qui limite notamment les rendements des productions végétales. Dans la plupart des régions du monde les rendements céréaliers sont périodiquement exposés au stress hydriques (Lacaz, 2006).

Le développement de plantes tolérantes à la sécheresse s'est heurté jusqu'à présent à la grande complexité des mécanismes physiologiques mis en jeu pour faire face à la sécheresse ainsi qu'à la variabilité des environnements (type de sol, scénario climatiques...). Développer des plantes tolérantes à la sécheresse est un objectif qui pourrait contribuer à résoudre en partie les problèmes d'autosuffisance alimentaire. Cette tâche nécessite la caractérisation des ressources génétiques vis-à-vis de la tolérance à la sécheresse (Lacaz, 2006).

Pour améliorer la stabilité ou augmenter la production des céréales, deux alternatives se présentent et doivent d'ailleurs être menées de pair :

i) Poursuivre les investigations sur l'identification et la définition des caractéristiques morphophysiologiques d'adaptation, de tolérance ou d'esquive au stress hydrique. Ces approches permettront la compréhension des mécanismes développés par les céréales. Ils sont largement développés par Quizenberry (1982), Acevedo & Ceccarelli (1987) et Eric & *al.* (1995).

ii) Développer une approche raisonnée à une échelle phénologique qui répond aux besoins de la plante (Brisson & Delecoller, 1992). Ceci permettra de mieux caractériser la variable hydrique (précipitation), de repérer les périodes de stress, et de fournir un complément d'eau par irrigation (Stern & *al.*, 1982). Ceci peut être réalisé à travers l'identification des séquences de sécheresse, leurs occurrences, leurs intensités et leurs durées.

L'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE), définie comme la production de biomasse par unité d'eau consommée est un caractère important de tolérance à la sécheresse. La sélection pour l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau est confrontée à la lourdeur et au coût des mesures directes sur des effectifs élevés et en conditions de plein champ.

L'émergence de la méthode isotopique a complètement modifié ces données. Le formalisme mathématique des transferts de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau ainsi que celui du fractionnement isotopique du carbone lors de la photosynthèse permet d'attribuer à une plante (ou à un organe donné d'une plante) une valeur de composition isotopique qui révèle son efficacité d'utilisation de l'eau (Merah, & al., 1999).

Des progrès importants ont par ailleurs été réalisés au cours des dernières années dans l'automatisation des analyses. Les avantages présentés par ce critère dans les programmes de sélection sont liés à **i)** sa valeur intégrative, **ii)** l'existence d'une variabilité génétique, **iii)** de faibles interactions génotypes x milieu, **iv)** une forte héritabilité, **v)** la facilité de la préparation des échantillons et **vi)** l'automatisation des analyses isotopiques qui conduisent à sa mesure (Merah, & al., 1999).

Ce travail a pour objectif l'évaluation de la discrimination isotopique du carbone ( $\Delta^{13}\text{C}$ ), en tant que critère de sélection pour la tolérance à la sécheresse en relation avec le bilan hydrique. Une expérimentation sur une collection comportant des variétés locales et d'autres provenant d'une sélection CIMMYT/ICARDA a été menée dans la région de Béni Fouda (Sétif). Les séquences de développement de la culture ont été notées, la mesure de la teneur en chlorophylle *in vivo* ainsi que l'évaluation du rendement et ses composantes. Des échantillons de grains ont fait l'objet d'une analyse de la discrimination isotopique du carbone.

D'autre part, un suivi du bilan hydrique a été réalisé durant le cycle cultural, afin d'identifier les séquences de stress, leurs intensités, leurs durées, et les risques probables de coïncidence de ces occurrences avec les phases sensibles du cycle de croissance des génotypes étudiés. Pour cela, deux méthodes ont été utilisées, la première, gravimétrique basée sur le suivi de la teneur en eau du sol et la seconde utilisant une simulation du logiciel *BUDGET* (Raes, 2004).

## 1- Le blé

L'histoire de l'homme est intimement liée à celle des céréales qu'il a très tôt appris à domestiquer, cultiver et sélectionner (Bonjean & Picard, 1991). Ces dernières sont considérées comme la base des grandes civilisations, car elles ont constitué l'une des premières activités agricoles, fournissant un moyen d'alimentation régulier, autour duquel l'activité humaine pouvait s'organiser.

C'est ainsi que les civilisations européennes et moyen-orientales se sont construites autour du blé, celles de l'Extrême-Orient autour du riz, celles des peuples amérindiens autour du maïs et celles d'Afrique noire autour du mil (Anonyme 2007).

Le blé dur semble être développé dans le bassin méditerranéen depuis le néolithique (Zohary & Hopf, 1994). Son aire de culture actuelle couvre les parties chaudes et sèches du moyen orient, de l'Afrique du Nord, de l'ex URSS, de l'Europe méditerranéenne et les grandes plaines de l'Amérique du Nord (Elias, 1995)

### 1-1 Cycle de croissance et de développement du blé

Les blés sont des monocotylédones, critère qui détermine notamment le type de germination ainsi que l'architecture et le type de croissance de la plante. Les blés se développent dans la première partie de leur cycle sous une forme herbacée. Ce terme signifie que les céréales se présentent sous la forme d'un ensemble de feuilles qui se développent toutes à partir de la même base, le plateau de tallage. Par la suite la tige principale commence à se développer ainsi que les tiges secondaires. De nouvelles feuilles apparaissent alors le long de la tige principale avec des points d'insertion différents que l'on appelle des noeuds.

Enfin l'épi se développe, grossit et la floraison a lieu lorsque l'épi est pleinement développé. A la suite de la floraison l'appareil foliaire se dégrade et devient sénescence alors que les grains grossissent. Dans la dernière partie du cycle les grains perdent une grande partie de leur eau et acquièrent leur dureté définitive.

Le cycle des blés peut donc se décomposer en deux phases majeures ; une phase d'élaboration de l'appareil végétatif allant de la germination jusqu'à la floraison, et une phase de développement du grain débutant à la floraison et se terminant à la maturité physiologique (Gate, 1995). La première phase correspond à l'accumulation de biomasse et d'azote via l'absorption d'eau, d'azote du sol et l'activité photosynthétique. Cette phase correspond également au développement de l'épi et des épillets. Durant cette phase se détermine le nombre potentiel de grains par épis à travers le nombre d'épillets.

Au cours de la deuxième phase, les grains se développent (embryogenèse et remplissage du grain) et l'appareil foliaire se dégrade. L'azote et le carbone des feuilles qui se dégradent (on dit qu'elles deviennent sénescences) sont remobilisés vers le grain. Environ 60% de l'azote et de carbone présent dans le grain à maturité provient de cette remobilisation (Barbottin & al. 2005). Le complément provenant de l'assimilation tardive de l'azote du sol. Cette phase post floraison voit donc l'élaboration progressive des grains à travers leur prise de volume.

## 1-2- Importance économique

### 1-2-1 Dans le monde

Le blé vient en tête de classement des cultures stratégiques car il constitue une source alimentaire pour plus de 35% de la population humaine (Evans, 1993).

La production mondiale a atteint 624 millions de tonnes pour une superficie de 217 millions d'hectares soit un rendement de 2,8 t/ha. La Chine, l'Inde et les Etats Unis d'Amérique sont les plus grands producteurs, représentant à eux seuls, plus de 40% de la production mondiale de blé pour l'année 2003 (tableau 1).

Le blé dur (*Triticum durum* Desf. ,  $2n = 4x = 28$ , génome AABB) occupe 8 à 10% des surfaces emblavées en blés et fournit 10 à 15% de la production mondiale des blés (Loss & Siddique, 1994).

**Tableau 1. Production mondiale du blé en tonnes (FAOSTAT, 2004).**

Pays	2003		2004	
	En tonne	En %	En tonne	En %
<b>Chine</b>	86 100 250	16%	91 330 265	15%
<b>Inde</b>	65 129 300	12%	72 060 000	12%
<b>USA</b>	63 589 820	12%	58 881 368	10%
<b>La Russie</b>	34 062 260	6%	86 658 539	14%
<b>France</b>	30 582 000	6%	39 641 000	6%
<b>Australie</b>	24 900 000	5%	22 500 000	4%
<b>Canada</b>	23 552 000	4%	24 462 300	4%
<b>Allemagne</b>	19 296 100	4%	25 346 000	4%
<b>Pakistan</b>	19 210 200	3%	19 767 000	3%
<b>Turquie</b>	19 000 000	3%	21 000 000	3%
<b>Argentine</b>	14 530 000	3%	14 800 000	2%
<b>Royaume-Uni</b>	14 288 000	3%	15 706 000	3%
<b>Iran</b>	12 900 000	2%	14 000 000	2%
<b>Kazakhstan</b>	11 518 500	2%	n.c.	n.c.
<b>Pologne</b>	7 858 160	1%	9 450 486	2%
<b>Espagne</b>	6 290 100	1%	7 175 000	1%
<b>Italie</b>	6 243 390	1%	8 000 000	1%
<b>Égypte</b>	6 150 000	1%	7 177 855	1%
<b>Brésil</b>	5 899 800	1%	6 035 500	1%
<b>Ouzbékistan</b>	5 331 000	1%	n.c.	n.c.
<b>Autres pays</b>	73 002 847	13%	75 284 093	12%

n.c : chiffre non communiqué.

## 1-2-2 En Algérie

L'Algérie est située au Nord-Ouest de l'Afrique en bordure de la Méditerranée. Elle couvre une superficie de 2 381 740 de km<sup>2</sup>. Le Sahara occupe plus de 85% de la superficie total (Touazi & *al.*, 2004). En 2002, sur les 40 millions d'hectares cultivables, les terres cultivées ne représentaient que 8.27 millions d'ha essentiellement concentrés dans la région du nord. Près de 0.5 million d'ha de terres en zone steppique sont en voie de désertification totale et plus de 7 millions d'ha sont menacés (FAO, 2005).

La céréaliculture occupe trois millions d'hectares, environ 35% de la surface agricole utile (Bessad, 2006). Une grande partie de ces terres sont situées dans les régions semi-arides (Benlaribi, 1990), qui sont habituellement conduites en culture pluviale (Mouhouche & Boulassel 1997).

Le blé dur y occupe une superficie importante : un million d'hectares environ (Benlaribi, 1990) et la production moyenne en (10<sup>3</sup> tonne) a été respectivement pour les périodes 73/76, 77/86 et 87/96 de 835, 738 et 977. En parallèle, les rendements (t/ha) pour les mêmes périodes ont été de 1.15, 1.07 et 1.29 respectivement (Hafsi, 2001).

En 1998 la production nationale de blé dur a enregistré un record avec 1,5 millions de tonne, pour régresser l'année suivante à 1,1 millions de tonnes faisant apparaître une tendance à la baisse de la production nationale (tableau 2). Ce qui montre que la production se caractérise par une grande variation et les rendements à l'hectare demeurent faibles. La principale cause de cette fluctuation est la sécheresse (déficits hydriques et coups de chaleur) (Bouzerzour & Oudina, 1989)

**Tableau 2. Production de blé dur dans le monde en millions de tonnes (CIC, 2000).**

Pays	Année	
	1 998	1999
Union Européenne	8,4	7,4
Canada	6,1	4
Turquie	4	3,5
Etats-Unis	3,8	3,1
Syrie	2,6	1,5
Algérie	1,5	1,1
Maroc	1,5	0,8
Tunisie	1,1	1,2
Kazakhstan	1	1,5
Autres	3	2,5
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>26,6</b>



## **2- Le climat**

La détermination du climat est effectuée à l'aide de moyennes établies à partir de mesures statistiques et annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales : température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent. Sont également pris en compte leur récurrence ainsi que les phénomènes exceptionnels.

L'écorégion méditerranéenne comprend toutes les régions où règne un climat méditerranéen. Elle se définit en termes de similarités climatiques et bioclimatiques. Outre les pays situés autour de la Méditerranée, la Californie, le Chili central, le sud-ouest et une partie du Sud de l'Australie et la région du Cap d'Afrique du Sud font aussi partie de l'écozone méditerranéenne car ils ont des zones bioclimatiques comparables (Naveh & Lieberman, 1984).

L'écosystème de type méditerranéen se caractérise par des étés chauds et des hivers doux, un apport modéré d'air marin toute l'année, des précipitations moyennes concentrées dans les mois d'hiver avec des étés très secs, de longues périodes ensoleillées avec quelques nuages, notamment en été (Leisz, 1982).

La partie orientale de la péninsule Ibérique, les côtes septentrionales de l'Afrique (Algérie, Égypte, Libye, Maroc et Tunisie), l'île de Crète, Chypre et les îles Baléares constituent la zone aride de la région méditerranéenne. Dans ces zones les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 400mm (Gottman, 1979; Wheller & Kostbade, 1990). Cependant, suivant l'altitude, la direction des montagnes et la situation orographique, le climat méditerranéen connaît un grand nombre de variations.

### **2-1 En Algérie**

Trois ensembles fortement contrastés climatiquement caractérisent le territoire algérien:

- Le Sahara, ensemble désertique aride (pluviométrie moyenne inférieure à 100 mm/an).
- Le littoral et les massifs montagneux : le climat est de type méditerranéen, avec des pluies très violentes en hiver provoquant une forte érosion. En été, les précipitations sont extrêmement rares et les chaleurs très fortes. Les pluies pouvant atteindre 1600 mm/an sur les reliefs sont irrégulières d'une année sur l'autre et inégalement réparties.
- Les hauts plateaux occupent environ 9% de la superficie totale, dont 5 millions d'ha de terres agricoles, sont caractérisés par un climat semi aride (pluviométrie comprise entre 100 et 400 mm/an) (FAO, 2005).

Les hauts plateaux qui concernent plus de 80% de la céréaliculture algérienne, sont sous la triple influence de l'Atlas tellien qui limite les précipitations hivernales, de l'Atlas saharien et du Sahara, et de l'altitude qui entraîne des gelées tardives (Blady, 1993).

Cependant, le climat des hauts plateaux présente des spécificités par rapport au climat des autres zones semi-arides du bassin méditerranéen. A titre d'exemple, la pluviométrie annuelle à Alep (Syrie) et à Sétif est assez voisine, mais la répartition est très différente. A Alep, 60% des pluies annuelles tombent en hiver contre 30% seulement à Sétif (même pluviométrie annuelle). Autre constat, les gelées nocturnes se prolongent plus tard dans l'année au niveau des hauts plateaux comparé au moyen orient. A Sétif à titre d'exemple, les gelées se prolongent une année sur deux jusqu'au mois de Mai (Hafsi, 2001).

En effet la mauvaise répartition des précipitations dans l'espace et dans le temps représente le principal facteur limitant l'amélioration du rendement grain des céréales conduites en culture pluviale. Mis à part la zone de l'extrême Nord-Est de l'Algérie, toutes les cultures céréalières subissent un déficit hydrique d'intensité, de durée et de fréquence variables en fonction de la quantité et de la répartition des précipitations annuelles propres à chaque zone de culture. En année sèche, des surfaces considérables sont déclarées non productives. Le reste des surfaces emblavées connaissent des rendements faibles qui sont souvent à la limite du seuil de rentabilité (Mouhouche & Boulassel, 1997).

## **2-2 Impact des changements climatiques sur la production agricole**

Le Bassin méditerranéen est l'un des centres mondiaux de la diversité des plantes (vavilov, 1951). Avec l'Algérie, l'agriculture du Maghreb comporte des paysages extrêmement diversifiés mais qui ont pour caractéristiques communes d'être, à des degrés divers, limités par les ressources hydriques, et aussi sujets à de grandes fluctuations en fonction de la variabilité climatique (Rousset & Arraus, 2006).

Le changement climatique est devenu une réalité mondiale admise par l'ensemble de la communauté scientifique et largement mis en avant par les médias (Galliot 2007). Les prospectives fondées sur le changement climatique font ainsi peser des risques importants sur les systèmes agricoles (Rousset & Arraus, 2006).

Dans beaucoup d'études, l'impact du changement du climat sur la croissance et le rendement des cultures est analysé par simulation dans des modèles (Kenny & al., 1993; Acock & Acock, 1993; Grashoff & al.1995).

Hulme & al., (2000), dans leur étude centrée sur la région du Maghreb, estiment un réchauffement de l'ordre de 1°C entre 2000 et 2020 et une perturbation des régimes pluviométriques avec une tendance à la baisse, de l'ordre de 5 à 10 %. A plus long terme, la température pourrait augmenter de 3°C d'ici 2050 et dépasser les 5°C en 2100, alors que les précipitations diminueraient de 10 à 30 % d'ici 2050 et de 20 à de 50 % en 2100. Des changements dans les moyennes, mêmes faibles, impliquent une augmentation de la fréquence des extrêmes climatiques (Katz & Brown, 1992). Les risques principaux concernent alors; une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses et de la concentration des épisodes pluvieux sur des périodes très courtes. Les conditions climatiques défavorables de ces dernières décennies pourraient progressivement devenir la norme au Maghreb, faisant peser des risques considérables sur l'agriculture (Rousset & Arraus, 2006).

En plus des changements dans les précipitations et la disponibilité totale en eau pour l'irrigation qui affecte directement la production agricole, les modifications dans le mode d'utilisation de l'eau par les plantes cultivées au cours de la saison peuvent affecter le rendement. Spécialement préoccupant est le changement du fonctionnement physiologique de la végétation suite à la modification de la composition atmosphérique. La plupart des plantes réagissent aux variations de la concentration en CO<sub>2</sub> par une modification de la réponse stomatique qui affecte non seulement la croissance mais aussi la transpiration. La nature complexe de la réponse physiologique en interaction avec les processus micro météorologiques au niveau de la feuille et du couvert végétal exige plus d'attention (Van de Geijn & Goudriaan, 1997).

Le changement climatique implique alors d'envisager la forme et l'ampleur des impacts potentiels sur l'agriculture et d'analyser les stratégies d'adaptation des systèmes agricoles envisageables pour les prochaines décennies (Rousset & Arrus 2006).

### **3- Bilan hydrique**

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Il tient aussi compte de la constitution de réserves et des prélèvements ultérieurs sur ces réserves. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à l'évapotranspiration.

Les deux grandeurs sont évaluées en quantité d'eau par unité de surface, mais elles sont généralement traduites en hauteurs d'eau, l'unité la plus utilisée étant le millimètre. Ces deux grandeurs étant ainsi physiquement homogènes, on peut les comparer en calculant soit leur différence (Précipitations moins évaporation), soit leur rapport (précipitations sur évapotranspiration.).

Le bilan est évidemment positif lorsque la différence est positive ou que le rapport est supérieur à un. L'écoulement à partir d'une unité de surface sera compté dans les pertes. L'infiltration est considérée comme une mise en réserve sous forme de nappes souterraines ou d'eau capillaire dans le sol. Les précipitations solides constituent des réserves immédiatement constituées. Elles ont une durée variable, inter saisonnière dans le cas des tapis neigeux, inter saisonnière et interannuelle dans le cas des glaciers, voire inter séculaire dans le cas de calottes polaires ou des grandes masses de très hautes montagnes (Anonyme, 2004).

L'expression générale utilisée pour le calcul du bilan hydrique (Fraquin, 1973):

$$ETR = P - R - D - \Delta Ru \quad (1)$$

ETR : évapotranspiration réelle, P : précipitation, R : ruissellement, D : drainage profond,  $\Delta Ru$  : variation de la réserve utile du sol de chaque période de temps considérée.

En général, l'expression du bilan est susceptible de subir des simplifications. Compte tenu de la topographie et de l'infiltrabilité des parcelles étudiées, le drainage comme le ruissellement, ou les deux ensemble peuvent être négligés (De cockborne & al, 1995), (Rezgui & al., 2005) , (Merabet & Boutiba, 2005).

Une estimation du bilan hydrique peut être obtenue à partir de la comparaison des valeurs d'évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP) (Mounier, 1994) servant de base aux études agro climatologiques (Statyer, 1968). Du point de vue climatique, le bilan hydrique potentiel ( $BHP = P - ETP$ ) est la variable indicatrice la plus pertinente du déficit hydrique (Choisnel, 1992). Il est obtenu par la différence entre la pluie et l'ETP.

Mais pour mieux caractériser les conditions d'alimentation en eau du végétal, il faut tenir compte de l'influence de la nature du sol et de sa position topographique, le raisonnement doit aller au-delà du bilan hydrique potentiel, il doit se faire en terme de bilan hydrique pédologique par le suivi du profil hydrique (Rognon, 1994). Le recours au bilan hydrique pédologique permet l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui, par définition, dépend du niveau d'évapotranspiration potentielle (ETP), de l'humidité du sol, et de la régulation stomatique (Tuzet & Perrier, 1998).

A l'échelle de la parcelle, la méthode la plus rigoureuse pour établir un bilan hydrique sous culture, est l'utilisation d'un humidimètre à neutrons couplé à des tensiomètres (Vachaud & al., 1985). Une sonde est introduite dans le sol à travers des tubes enfoncés verticalement et maintenus en place pendant toute la culture. Cet appareil permet d'évaluer le taux d'humidité du sol et sa variation dans le temps, au même endroit. Cette variation de l'humidité a, globalement et en absence de ruissellement, trois sources: les apports d'eau, la consommation en eau de la culture (extraction racinaire) et les flux hydriques (drainage, remontées capillaires sous la zone racinaire).

Pour évaluer les différents termes du bilan, il faut estimer les flux sous la zone racinaire. Ceci se fait généralement grâce à des tensiomètres placés en profondeur. Il s'agit là de techniques relativement complexes et délicates à mettre en oeuvre. A défaut de cette technique, on peut plus simplement utiliser une tarière pour prélever du sol et mesurer son humidité pondérale après séchage à l'étuve. On ne mesure alors que des variations d'humidité dans le profil.

Une autre méthode consiste à utiliser un modèle de simulation du bilan hydrique. L'évaluation des termes du bilan se fait par calcul. Différents modèles de simulation plus ou moins sophistiqués sont disponibles; comme *CROPWAT* (FAO, 1992) ou *BUDGET* (Raes, 2004). Dans tous les cas, il est évident que la précision et la validité des paramètres de sortie du modèle (ETR, drainage) dépendent de la précision des paramètres d'entrée (pluies, ETP, ETM, dynamique racinaire, etc.).

### 3-1 Evapotranspiration réelle (ETR)

L'ETR est l'évapotranspiration qui se produit effectivement au dessus d'une couverture végétale, l'apport d'eau étant constitué par les seules précipitations. Elle est fonction de la quantité d'eau disponible, du pouvoir évaporant de l'air et de la capacité de rétention du sol (Samba & Diop, 2000).

### 3-2 Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP est l'association de l'évaporation de l'eau à partir de toute surface et de la transpiration provenant des plantes (Chang, 1965) quand la fourniture en eau au substratum terrestre n'est pas limitée (Pédelaborde; 1968). L'ETP peut être mesurée par l'utilisation des cases lysimétriques ou estimée à partir de formules mathématiques : Thornthwaite (1948) ; Penman (1948), Turc (1961), Penman-Monteih (1981)...etc., prenant en compte les variables climatiques (température, pluies, vent, etc.).

### 3-3 Evapotranspiration de référence (ET<sub>o</sub>)

L'évapotranspiration de référence (ET<sub>o</sub>) (figure 1), est définie comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau (Allen & al,1998). La détermination de l'ET<sub>o</sub> peut être faite : soit directement à l'aide de lysimètre ; soit indirectement à l'aide de formules empiriques et théoriques qui combinent des variables climatiques en se servant de logiciel spécifique tel que l' ET<sub>o</sub> (Raes, 2000).

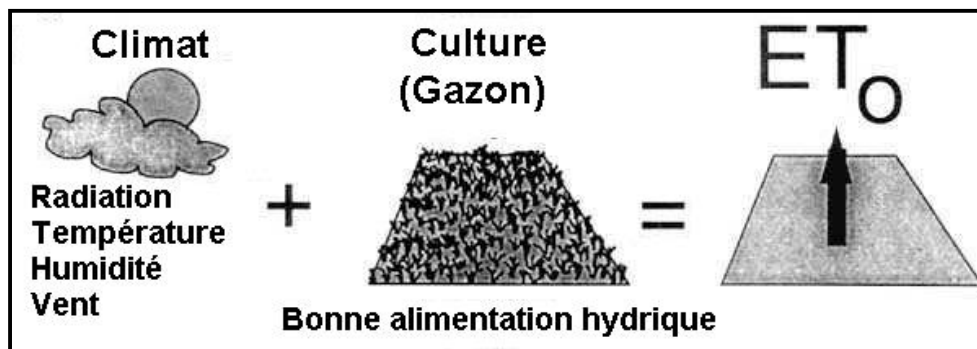


Figure 1. Evapotranspiration de référence (ET<sub>o</sub>).

### 3-4 Evapotranspiration potentielle de la culture (ET<sub>c</sub>)

L'évapotranspiration d'un sol couvert par de la végétation est difficile à estimer. Pour faciliter la tâche et dans un souci d'homogénéisation des modèles, les chercheurs sont arrivés à déterminer les besoins en eau des cultures, par la correction de l'évapotranspiration potentielle (ET<sub>o</sub>) d'une culture de référence, qui est le gazon, par un coefficient appelé "coefficient cultural" (k<sub>c</sub>) en utilisant la formule suivante :

$$ET_c = k_c * ET_o. \quad (2)$$

L'échelle de temps sur laquelle les besoins sont calculés peut être l'heure, la journée, la décennie, le mois ou la phase de croissance, selon l'objectif poursuivi et la disponibilité de données. (Allen, 1998). L'ET<sub>c</sub> est calculée dans les conditions de culture optimum à savoir ; absence de maladie, culture bien fertilisée et un état hydrique édaphique optimum (figure 02).

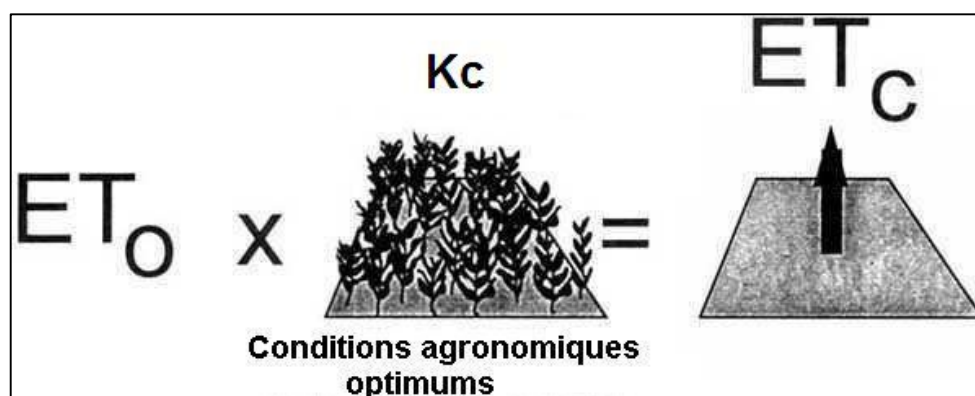


Figure 2. Evapotranspiration de culture (ET<sub>c</sub>).

### 3-5 Coefficient de culture (K<sub>c</sub>)

La valeur du coefficient K<sub>c</sub> (tableau 3) est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle, et son taux de croissance, mais aussi par la fréquence des pluies ou de l'irrigation au début du cycle de la culture. K<sub>c</sub> est toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture données, puis ensuite confiné dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire.

Tableau 03. Coefficient cultural du blé.

	Germination Levée	Levée Montaison	Montaison Epiaison	Epiaison Maturation	Source
K <sub>c</sub>	0,5	1	1,2	1	(Arles, 1986)
	0,17 - 1,10	1,10 - 1,15	1,15	1,15 - 0,35	(Raes, 2004)
	0,3 - 0,4	0,7 - 0,8	1,05 - 1,2	1,2 - 0,25	(FAO, 1992)

### 3-6 Evapotranspiration de la culture ajustée (ET<sub>c</sub> adj)

L'ET<sub>c</sub> adj (figure 3) est l'évapotranspiration réelle de la culture sous des conditions agronomiques non optimales c'est à dire qui diffèrent des conditions standards, comme la présence d'animaux nuisibles, fertilisation insuffisante, salinité du sol, les maladies, stress hydrique... , d'où l'introduction du coefficient de stress K<sub>s</sub> (Allen, 1998). L'évapotranspiration de la culture sera donc ajustée et calculée par la formule (3) :

$$ET_c \text{ adj} = ET_o * K_c * K_s \quad \text{avec } 1 \leq K_s \leq 0 \quad (3)$$

En absence de stress  $K_s = 1$  et en présence de stress,  $K_s$  est inférieur à 1

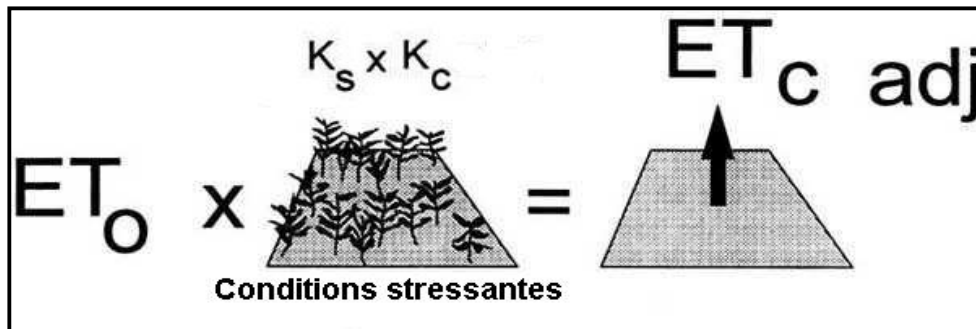


Figure 3. Evapotranspiration de culture ajustée (ET<sub>c</sub> adj).

### 3-7 Sol et bilan hydrique

L'état hydrique des sols correspond à la quantité d'eau qu'un sol est susceptible de renfermer, dans l'absolu et dans la réalité. Les sols contiennent plus ou d'humidité et leur état hydrique dépend de la capacité des réservoirs des matériaux à absorber et à conserver de l'eau. En fonction de la quantité d'eau présente dans le sol, il existe une grande variété de son état hydrique.

D'une manière générale, dans les sols on distingue quatre principaux types (états) d'eau en fonction de la taille des porosités : l'eau; capillaire, hygroscopique, d'hydratation et l'eau libre qui s'écoule librement, dans des macroporosités, des fissures larges de quelques centimètres à quelques millimètres voire moins, mais qui permettent un écoulement sous l'effet de la gravité. Une grande partie de l'eau libre circule en profondeur dans les fissures et les porosités des matériaux qui forment les versants pour rejoindre des nappes qui peuvent alimenter les cours d'eau.

#### 3-7-1 Réserve utile (Ru)

C'est la quantité d'eau du réservoir d'un sol pouvant être plus ou moins facilement utilisée par les racines d'une plante (Thornthwaite & Mather, 1957), variant au cours du temps en fonction des apports, et des pertes dues à l'ETR du couvert végétal (Jacquart & Choisnel, 1995).

La réserve d'eau utile du sol (RU) est définie par les paramètres hydriques du sol : la capacité de rétention et le point de flétrissement permanent, et par la profondeur utile qui peut être limitée ; soit par des facteurs pédologiques : encroûtement, nappe phréatique salée, soit par l'enracinement des cultures (Damagnez, 1975).

La réserve en eau du sol est le volume d'eau disponible par rapport à un volume donné du sol dans un temps bien déterminé. Les variations des réserves en

eau du sol ( $\Delta W$ ) exprimée en mm d'eau, sont calculées par tranche d'épaisseur  $z$ , en centimètre, avec la formule suivante :

$$\Delta W = (\sigma/10) * \Delta H * \Delta Z \quad (4)$$

Où  $\sigma$  est la densité apparente du sol,  $\Delta H$  est la variation d'humidité pondérale du sol et  $\Delta Z$  est la variation des tranches d'épaisseur du sol en cm (Damagnez, 1975).

L'estimation de la réserve utile en eau (RU) est obtenue par la relation (5) (Allen & *al.*, 1998) :

$$EU = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (5)$$

$$RU = EU * Z_r = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) * Z_r \quad (6)$$

$$RFU = RU * f \quad (7)$$

EU est la teneur en eau utile du sol (mm/m). EU est la différence entre le contenu en eau à la capacité au champ ( $\theta_{FC}$ ) et la teneur en eau au point de flétrissement ( $\theta_{WP}$ ).  $Z_r$  (m), la profondeur d'enracinement maximale, déterminée pour des cultures arrivées à maturité et cultivées sur sol profond. RU (mm) est l'eau accessible aux végétaux dans le volume de sol exploité par leurs racines.

### 3-7-2 Capacité au champ et Point de flétrissement

La capacité au champ est la quantité d'eau qu'un sol (saturé en eau) est capable de retenir après un ressuyage par la force gravitaire de l'eau libre. Elle représente environ 75% de la capacité maximale de rétention pour chaque type de sol (Chen & Dudhia, 2001). Le point de flétrissement correspond à l'humidité qui n'est plus extractible par les plantes, excepté, les halophytes et certaines espèces ligneuses xérophytes (Halitim, 2006).

Chaque famille texturale (tableau 4) présente des caractéristiques hydriques propres et notamment une valeur de "réserve en eau" théorique. On utilise un tableau de correspondance entre la texture et la réserve en eau par unité volumique mis en point par l'INRA (Jamagne & *al.*, 1977).

Le réservoir en eau du sol est estimé en additionnant les valeurs contenues pour chaque horizon. Cette démarche s'appuie donc sur des hypothèses simplificatrices et surtout elle considère que la texture est la seule caractéristique qui intervient dans la rétention en eau, ce qui n'est généralement pas le cas (Halitim, 2006).



**Tableau 4. Réserve en eau du sol selon la texture (Jamagne & al., 1977).**

Classe de texture	Humidité à la capacité au champ (en %)	Humidité au point de flétrissement (en %)	Réserve utile (%)	Densité apparente (grs/cm <sup>3</sup> )	Réserve utile (mm/cm <sup>3</sup> )
S	8	3	5	1,35	0,70
SL	12	5	7	1,40	1,00
SA	19	10	9	1,50	1,35
LIS	15	7	8	1,50	1,20
LS	19	9	10	1,45	1,45
LmS	20	9	11	1,45	1,60
LSA	22	11	11	1,50	1,65
LAS	24	12	12	1,45	1,75
LI	17	8	9	1,45	1,30
Lm	23	10	13	1,35	1,75
LA	27	13	14	1,40	1,95
AS	33	22	11	1,55	1,70
A	37	25	12	1,45	1,75
AL	32	19	13	1,40	1,80
ALo Sédimentaire	29	18	11	1,50	1,65
ALo Altération	38	25	13	1,30	1,70

### 3-7-3 Réserve facilement utilisable (RFU)

La réserve facilement utilisable (RFU) est la quantité d'eau qu'une plante peut extraire d'un sol sans que sa production ne soit affectée de façon notable. Elle est définie par l'introduction d'un coefficient empirique, *f*. Ce coefficient représente le risque potentiel de soumettre la plante à un stress hydrique, celui-ci est fonction de la culture. Il est généralement admis de lui donner une valeur de 2/3 (Van Laere, 2003).

La réserve facilement utilisable (RFU) varie entre des limites importantes. Cette réserve facilement utilisable ne peut pas être déterminée a priori pour chaque sol, car elle est sous la dépendance étroite de la dynamique d'exploitation des réserves d'eau du sol; elle dépend en particulier du volume de sol exploité par les racines et de la vitesse de dessèchement du sol qui fait intervenir des facteurs climatiques tels que l'évapotranspiration potentielle. Cette aptitude plus ou moins grande à utiliser les réserves d'eau du sol se traduit, pour des apports d'eau identiques - pluie et irrigation ou épandage de crue - par une consommation d'eau réelle plus ou moins élevée. Toutes les conditions de sol étant égales, une culture dont l'enracinement est dense et profond pourra se contenter d'apports d'eau relativement espacés, mais importants, à condition que la réserve utile du sol soit grande (Damagnez, 1975).

## **4- Simulation du bilan hydrique par le modèle *BUDGET***

Le modèle *BUDGET* (Raes, 2004) a été développé par la faculté des sciences de l'université de Leuven (Belgique). Le fonctionnement de ce modèle requiert l'entrée de certains paramètres pour permettre la sortie d'autres paramètres, sous forme numérique et graphique. Aussi, ce modèle permet la simulation de l'état hydrique du sol ainsi que les contraintes de la croissance et du développement pour des cultures conduites, en irriguée ou en sec.

### **4-1 Entrées du modèle**

Elles sont d'ordre climatiques, édaphiques et culturales. Les données sont classées en cinq modules de paramètres :

#### **4-1-1 Précipitations**

Elles sont fournies par des stations météorologiques. Selon leurs disponibilités, les précipitations sont saisies (en millimètre) par jour, par décennie ou par mois. Pour notre étude nous avons utilisé les données provenant d'une station météo, limitrophe de notre site, appartenant à l'exploitation agricole collective Dahel Nouari

#### **4-1-2 Evapotranspiration de référence ETo**

Elle est introduite (en millimètre) par jour, par décennie ou par mois. Elle peut être obtenue par mesure sur des cases lysimétriques ou estimées à partir des formules empiriques. Dans notre expérimentation, nous l'avons estimée à partir de la formule de Penman Montheil (1990), modifiée et recommandée par la FAO (1998), On utilisant le logiciel ETo (2000).

#### **4-1-3 sol**

Les données requises sont ; la texture du sol, le nombre et la profondeur des horizons ainsi que leurs caractéristiques hydriques (capacité de rétention, capacité au champ, point de flétrissement...etc.), le drainage et le ruissellement des eaux en surface. Dans notre essai, ses deux derniers paramètres ont été négligés.

#### **4-1-4 Matériel végétal**

Elle représente le quatrième module avec 09 paramètres requis : la durée des stades de croissance du végétal et les coefficients de culture correspondants, le paillage en surface, le taux du couvert végétal, le niveau de croissance des racines durant le cycle, le taux d'extraction de l'eau suivant la profondeur d'enracinement, la tolérance à la salinité, le coefficient de la tolérance au stress hydrique (selon l'épuisement de la RFU), le coefficient de stress due à un engorgement en eau et enfin le coefficient de sensibilité du rendement durant les phases de croissance.

Dans notre expérimentation, nous avons fixé les mêmes paramètres pour tous les géotypes, sauf ceux relatifs aux stades de croissance (levée, épiaison et maturité) qui ont été paramétrés.

## 4-2 Programmation

Le dernier module comporte de nombreux paramètres dont nous citons quelques uns : il s'agit surtout de l'établissement des conditions initiales et finales de la simulation telle que la réserve en eau du sol, les coefficients de calcul de l'évaporation (équation de Ritchie), la procédure de calcul des pluies efficaces, etc.

## 4-3 Sorties du modèle et simulation

Une fois que tous les paramètres sont introduits et la période de simulation fixée, le programme offre la possibilité de sortie de nombreux paramètres (tableau 5) qui sont présentés sous forme numérique et graphique. Aussi, *BUDGET* indique si un stress hydrique se manifeste ainsi que la prédiction du taux de diminution du rendement.

**Tableau 5. Paramètres de sortie du modèle *BUDGET*.**

-Transpiration relative	-Evaporation relative	-Evapotranspiration relative
-Transpiration potentielle	-Evaporation potentielle	-Evapotranspiration potentielle
-Transpiration réelle	-Evaporation réelle	-Evapotranspiration réelle
-Drainage journalier	-ETo journalière	-Pluies journalières
-Cumul du drainage	-Cumul d'ETo	-Cumul des pluies
-Ruissellement journalier	-Cumul du ruissellement	-Réserve en eau

## **1- La sécheresse et ses conséquences**

La sécheresse est une notion relative, car non seulement ses manifestations sont diverses mais sa définition même varie en fonction de son impact et selon l'approche scientifique (Reyes-Gómez & *al.*, 2006).

En agriculture, la sécheresse est définie comme un déficit marqué et permanent de la pluie qui affecte les productions agricoles estimées d'après des valeurs moyennes ou attendues (Gadsden & *al.*, 2003). D'un point de vue météorologique, la sécheresse est une absence prolongée, un déficit significatif, voire une faible distribution, des précipitations, en relation avec une valeur dite normale (McKee, & *al.*, 1993). En hydrologie, on parle de sécheresse dès lors qu'à l'échelle régionale la hauteur des pluies est inférieure à la moyenne saisonnière, ce qui se traduit par un approvisionnement insuffisant des cours d'eau et des réserves d'eau superficielles ou souterraines.

Les socio-économistes, quant à eux, parlent de sécheresse quand les pluies sont insuffisantes et ont des effets désastreux sur les populations et sur l'économie régionale.

Une autre approche de la sécheresse est celle des agro pastoralistes qui mettent davantage l'accent sur la sévérité et la fréquence d'un phénomène qui reste tout relatif. Pour eux, une année sèche chaque décennie est souvent critique et permet d'évaluer les effets réels du manque d'eau (Dyer, 1984).

### **1-2 Effets du déficit hydrique sur le végétal**

L'eau est la ressource naturelle qui limite le plus les rendements en agriculture (Boyer, 1982). Au niveau des hautes plaines semi-arides d'Algérie, la sécheresse est souvent le facteur principal qui affecte la production du blé (Larbi & *al.*, 1998).

En effet, L'eau est le constituant pondéral le plus important des végétaux (50 à 90% de leur masse de matière fraîche). Elle est le milieu dans lequel a lieu la quasi-totalité des réactions biochimiques; elle joue le rôle de solvant, substrat et de catalyseur. Par la pression qu'elle exerce sur les parois, l'eau permet la turgescence cellulaire qui est indispensable au port érigé des plantes herbacées et à l'expansion cellulaire dans les tissus en croissance. La turgescence est également à la base des mouvements des organes (feuilles, étamines) et des cellules (stomates). A l'échelle de l'organisme, l'eau permet de véhiculer les substances nutritives, les déchets du catabolisme et des phytohormones (Martre, 1999).

Le stress hydrique affecte plusieurs variables de fonctionnement de la plante, telles que la température foliaire (Wiegand & *al.*, 1983; Patel & *al.*, 2001; Luquet & *al.*, 2004), la conductance stomatique (Penuelas & *al.*, 1992; Yagoubi, 1993), la photosynthèse (Idso & *al.*, 1981; Moran & *al.*, 1994; Yuan & *al.*, 2004) et la surface foliaire (Penuelas & *al.*, 1992).

Une diminution de la teneur en l'eau de la plante se traduit immédiatement par une réduction de la croissance en dimension avant même que la photosynthèse ne soit affectée (Turner, 1997).

D'après Amigues & al (2006), à l'échelle annuelle, les conséquences d'une sécheresse dépendent de sa période de démarrage (par rapport au stade cultural) et de sa durée d'action. Les effets observés au champ le plus souvent sont :

- une levée incomplète et irrégulière (en vagues) : défaut de peuplement plus grave pour les cultures qui ne se ramifient pas (betterave, tournesol...), hétérogénéité dans les stades phénologiques jusqu'à la récolte...
- une implantation racinaire médiocre et superficielle : couverture du sol retardée, carences précoces, sensibilité à la sécheresse de fin de cycle...
- un défaut ou un retard de mise en solution des engrais (azotés) et des pertes par volatilisation
- un défaut de prélèvement du nitrate dans les horizons superficiels, qui sont les plus concentrés et les plus sensibles à la sécheresse édaphique
- une réduction de la surface foliaire, de la biomasse aérienne et des organes fructifères, en raison d'un défaut de transpiration et d'une carence azotée.
- une sénescence accélérée et un défaut de remplissage du grain (ou une réduction de calibre des fruits)
- des conséquences variables sur la qualité du grain ou du fruit.

### **1-3 Effet du déficit hydrique sur le blé**

Outre son rôle dans la photosynthèse, dans le transport et l'accumulation des éléments nutritifs ainsi que dans la division cellulaire et la régulation thermique, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes cultivées (Riou, 1993). Un déficit hydrique se traduit par une réduction de la croissance de la plante et/ou de sa production par rapport au potentiel du génotype. Un déficit hydrique précoce affecte en parallèle la croissance des racines et des parties aériennes, le développement des feuilles et des organes reproducteurs (Debaeke & al 1996).

Le déficit hydrique peut engendrer des pertes de rendement à n'importe quel stade de développement du blé. Chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.), en région méditerranéenne, la sécheresse est une des causes principales des pertes de rendement, qui varient de 10 à 80% selon les années (Nachit & al., 1998). La sécheresse de début de cycle coïncide avec le démarrage de la culture (levée, tallage) et celle de fin du cycle, qui est la plus fréquente et qui affecte le remplissage des grains (Watts & El Mourid, 1988).

Le rendement en grains chez le blé dépend fortement du nombre de grains par épi, du poids de grains par épi et du nombre d'épis par m<sup>2</sup>. (Assem & al., 2006). Le tallage est l'un des principaux facteurs déterminant le rendement en grains chez les céréales (Hucl & Baker, 1989) et une carence hydrique précoce durant la phase végétative réduit le nombre et la taille des talles chez le blé (Davidson & Chevalier, 1990), (Stark & Longley, 1986) et (Blum & al., 1990). Un déficit hydrique à la montaison se traduit par la régression du nombre d'épis par m<sup>2</sup>, la régression intense des talles et/ou la diminution du nombre de grains par épi (notamment par accroissement du taux d'avortement des épillets et l'induction de stérilité mâle) (Slama & al., 2005).

À la fin de la montaison, 10-15 jours avant l'épiaison, la sécheresse réduit le nombre de fleurs fertiles par épillet (Debaeke & al 1996). Le manque d'eau après la floraison, combiné à des températures élevées, entraîne une diminution du poids de 1000 grains par altération de la vitesse de remplissage des grains et/ou de la durée de remplissage (Triboï, 1990). Au cours du remplissage des grains, le manque d'eau a pour conséquence une réduction de la taille des grains (échaudage), réduisant par conséquent le rendement (Gate, 1993).

## **2- Mécanismes d'adaptation à la sécheresse**

La tolérance d'une plante à une contrainte hydrique peut être définie, du point de vue physiologique, par sa capacité à survivre et à croître et, du point de vue agronomique, par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles (Slama & al., 2005).

Il existe une large gamme de mécanismes de tolérances à la sécheresse qui ne sont pas exclusifs les uns des autres et qui peuvent même être complémentaire (Jones & al., 1980). Ces mécanismes sont d'ordre phénologique, morphologique, physiologique.

Ainsi, la tolérance du blé à la contrainte hydrique peut être associée à une précocité d'épiaison (Makhlouf & al., 2006), à un système racinaire abondant (Hurd, 1974) et (Passioura, 1983), à une fermeture rapide des stomates, à une grande efficacité d'utilisation de l'eau (Green & Read, 1983) ou au maintien d'un potentiel de turgescence élevé (Kreim & kronstad, 1981) et (Morgan & Gordan, 1986).

Diverses classifications des mécanismes de tolérance à la sécheresse ont été élaborées. Turner (2001) a décrit les principaux caractères impliqués dans les trois grands mécanismes, leur utilité et leur facilité d'utilisation pour la sélection (tableau 6).

### **2-1 Adaptations phénologiques**

L'esquive permet à la plante de réduire ou d'annuler les effets de la contrainte hydrique par une bonne adéquation de son cycle de culture à la longueur de la saison des pluies. (Amigues & al 2006).

La précocité constitue un important mécanisme d'esquive de la sécheresse de fin de cycle (Ben Naceur & al., 1999). Le rendement de nombreuses variétés a été amélioré grâce au raccourcissement des longueurs de cycle chez pratiquement toutes les espèces cultivées annuelles (Turner & al., 2001), sur les légumineuses (Subbarao, 1995), comme sur les céréales (Fukai & al., 1999).

La précocité au stade épiaison est une composante importante d'esquive du stress de fin de cycle chez le blé dur. Compte tenu de la distribution aléatoire des précipitations dans les régions arides à semi-arides, l'adoption de variétés à cycle relativement court est nécessaire (Makhlouf & al., 2006). Fisher & Maurer (1978) notent que chaque jour de gagner en précocité génère un gain en rendement de 30 à 85 kg/ha

**Tableau 6. Principaux caractères impliqués dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse (Turner & al., 2001).**

Mécanisme	Utilité	Facilité de sélection
<b>1- Esquive</b>		
Phénologie	Très haute	Facile
Plasticité de développement	Haute	Facile
<b>2- Evitement de la déshydratation</b>		
Contrôle stomatique	Haute	Difficile
ABA	Discutable	Difficile
Ajustement osmotique	Fonction des espèces	Difficile
Développement racinaire	Haute	Très difficile
<b>3- Tolérance à la déshydratation</b>		
Stabilité membranaire	Haute	Facile
Potentiel hydrique létal	Haute	Difficile
Proline	Discutable	Facile

En milieu où le gel tardif est une contrainte à la production des céréales, une précocité excessive n'est d'aucune utilité, au contraire, elle risque d'être une source d'instabilité des rendements en grains. Une précocité modérée peut cependant constituer un avantage lors de la reprise de la croissance après un bref stress (Bouzerzour & al., 1998).

## **2-2 Adaptations morphologiques**

L'effet de la sécheresse peut se traduire, selon la stratégie adaptative de chaque espèce ou variété, par des modifications morphologiques pour augmenter l'absorption d'eau et/ou pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes pour les assimilats. Ces modifications affectent la partie aérienne ou souterraine : réduction de la surface foliaire et du nombre de talles, enroulement des feuilles et/ou meilleur développement du système racinaire (Slama & al., 2005).

### **2-2-1 Système racinaire**

L'efficacité de l'extraction de l'eau du sol par les racines figure parmi les types d'adaptation permettant à la plante d'éviter ou, plus exactement, de retarder la déshydratation de ses tissus (Turner & al., 2001). L'aptitude des racines à exploiter les réserves en eau du sol sous stress est une réponse particulièrement efficace pour l'élaboration de la production de graines (Passioura, 1977).

Un système racinaire capable d'extraire l'eau du sol est un trait essentiel pour la tolérance à la sécheresse. Cette caractéristique revêt une importance particulière sur les cultures qui subissent régulièrement des déficits hydriques de fin de cycle (Subbarao, 1995) Son impact sur le rendement est particulièrement élevé car elle intervient directement dans l'efficacité d'utilisation de l'eau en conditions de stress. Un système racinaire extensif permet au blé de mieux résister à un stress hydrique (Bensalem & al., 1991) in (Mazouz, 2006).

Cependant, deux types de raisons limitent beaucoup l'utilisation des critères racinaires par les sélectionneurs (Turner & *al.*, 2001). L'impraticabilité du criblage au champ pour cette caractéristique sur une grande échelle et la difficulté de corrélérer des observations au champ à celles qui sont faites en pots. L'absence d'une compréhension précise du rôle exact des racines en conditions de ressources hydriques limitées (Passioura, 1994) est un autre facteur limitant à la mise en place d'un système de criblage efficace.

### **2-2-2 Surface foliaire**

La réduction de la surface foliaire, quand le stress hydrique est très important, est un mécanisme de réduction des besoins en eau (Perrier & *al.*, 1961). O'toole & Cruz (1980), montrent que l'enroulement des feuilles entraîne une diminution de 40% à 60% de la transpiration, le phénomène d'enroulement des feuilles peut se manifester quand la sévérité du stress est de -0,8 à -1,0 MPa et on observe l'enroulement complet vers -2,0 à -2,5 MPa, ce qui correspond à des conditions de déficit hydrique intense (Morgan, 1984).

D'après Blum (1984), les feuilles très étroites permettent une réduction des pertes en eau. Les travaux de Araus & *al.*, (1989), montrent l'existence de différences significatives, entre les différentes espèces de blé tétraploïdes et hexaploïdes, pour le nombre stomates et la surface foliaire.

D'après Acevedo & Ceccarelli, (1987), le port des feuilles serait lié à la tolérance à la sécheresse. Chez l'orge, les feuilles verticales étroites seraient plus favorables à une adaptation au stress hydrique que les feuilles larges et flasques (Borojevic & Denic, 1986).

### **2-2-3 Glaucescence, pilosité, cire et barbes**

La glaucescence, la pilosité des feuilles ou des tiges, la couleur claire des feuilles et la présence de cire induisent une augmentation de la réflectance qui conduit à une réduction des pertes en eau. Clarke & *al.*, (1989) montrent que la glaucescence réduit le taux de déperdition d'eau (transpiration cuticulaire) en conditions sèches et que les variétés qui ont une glaucescence élevée donnent dans ces conditions, des rendements plus élevés que les variétés à faible glaucescence. Clarke & Richards (1988), montrent que la glaucescence réduit la transpiration résiduelle de 10% en moyenne. La comparaison de deux lignées isogéniques pour ce caractère montre que les quantités de cire épicuticulaires et la glaucescence influent également sur la transpiration résiduelle, celle-ci étant supérieure de 30% chez la lignée non glaucescente et à faible teneur en cire.

La présence des barbes chez les céréales augmente la possibilité d'utilisation de l'eau et l'élaboration de la matière sèche lors de la maturation de grain (Nemmar, 1980). La photosynthèse, chez les génotypes barbus comparativement aux génotypes glabres, est moins sensible à l'action inhibitrice des hautes températures lors du remplissage des grains (Fokar & *al.*, 1998).

En comparant trois variétés de blé dur, Slama, (2002) trouve que la variété ayant la barbe la plus développée, sous contrainte hydrique, présente le meilleur



rendement. En effet, les barbes peuvent améliorer le rendement en conditions de sécheresse par augmentation de la surface photosynthétique de l'épi (Slama, 2005).

## **2-3 Adaptations physiologiques**

### **2-3-1 Régulation stomatique**

L'eau peut être perdue par toute la surface de la plante, cependant les stomates demeurent la principale voie d'émission de la vapeur d'eau (85 à 100%). Les stomates sont des ouvertures microscopiques dans l'épiderme des feuilles permettant la transpiration et assurant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère. La transpiration se manifeste par une perte d'eau sous forme de vapeur d'eau entraînant un refroidissement des tissus de la plante. Près de 98% l'eau absorbée par la plante est perdue par la transpiration. Cette perte est inévitable car les stomates doivent s'ouvrir pour permettre l'entrée du CO<sub>2</sub> et assurer la photosynthèse. De plus, elle entraîne une absorption supplémentaire d'eau et favorise l'absorption et la circulation des éléments minéraux.

En situation de déficit hydrique, la plante ferme ses stomates pour réduire ses pertes en eau (Tardieu & Dreyer, 1997). La régulation, de l'ouverture et la fermeture des stomates dépend du potentiel hydrique foliaire et de l'humidité de l'air au champ (Turner, 1997). Une faible conductance stomatique induit une fermeture des stomates rapide en conditions de déficit hydrique. Les génotypes à faible conductance sont plus sensibles au déficit de vapeur et à la baisse du potentiel hydrique foliaire que les génotypes à forte conductance.

Une faible conductance est généralement proposée comme critère favorable à l'adaptation à la sécheresse (Turner, 1986). Cependant la fermeture stomatique réduit l'assimilation du CO<sub>2</sub> et conduit inévitablement à une réduction de l'activité photosynthétique. En conséquence, l'intérêt d'une réponse stomatique plus ou moins rapide au déficit hydrique résulte d'un compromis entre la réduction de l'assimilation du CO<sub>2</sub> et la nécessité d'éviter la déshydratation (Ludlow & Muchow, 1990).

La détermination de la fonction de l'ouverture stomatique reste encore en débat (Cochard & al, 1996). Néanmoins, l'effet de plusieurs facteurs agissant sur l'ouverture stomatique a été montré : l'augmentation de l'irradiation a pour conséquence d'ouvrir les stomates tandis que l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> ou du déficit de vapeur dans l'air induisent un processus inverse (Hinckley & Braatne, 1994). De nombreuses études ont mis en évidence des facteurs internes à la plante agissant sur les processus de régulation stomatique.

L'effet de l'acide absicique (ABA) en tant qu'inducteur de la fermeture stomatique a été largement documenté (Wartinger & al., 1990; Davies & Zhang, 1991), mais il y a encore des incertitudes sur son origine et sur sa contribution exacte à ce phénomène (Dreyer, 1997). Le signal de la fermeture stomatique en conditions de sécheresse a été attribué à une production de l'acide absicique (ABA) par les racines (Meinzer & Grantz, 1990), mais l'état hydrique de la plante entière reste un facteur important à considérer car il intervient sur la sensibilité des stomates à la concentration d'ABA (Salah & Tardieu, 1997).

Chez les céréales, Davies & *al.*, (1994) ont montré que la fermeture des stomates est contrôlée par l'acide abscissique ou ABA en réponse à l'assèchement du sol. Mais les sélections réalisées sur l'accumulation de l'ABA dans les céréales n'ont pas conduit à une amélioration du rendement (Quarrie & *al.*, 1995).

### **2-3-2 Potentiel hydrique et ajustement osmotique**

L'eau est conduite à travers la plante depuis le sol jusqu'à l'atmosphère. Ce processus est comparable à un courant électrique. Ce courant est freiné par les résistances hydrauliques de la plante, telle que l'ouverture plus ou moins importante des stomates au niveau des feuilles ainsi que la résistance des cellules racinaires au transfert de l'eau depuis le sol jusqu'aux vaisseaux du xylème.

Au fur et à mesure que la transpiration augmente au niveau des feuilles, le potentiel hydrique foliaire diminue (il devient de plus en plus négatif). Si l'eau est disponible au niveau du sol (lorsque le potentiel hydrique du sol est fort) alors un courant d'eau depuis le sol jusqu'aux feuilles compense les pertes d'eau lors de la transpiration. Lorsque la quantité d'eau au niveau du sol diminue le potentiel hydrique foliaire nécessaire pour provoquer le mouvement d'eau depuis le sol jusqu'aux feuilles doit être d'autant plus faible (Lacaze, 2006).

La diminution du potentiel hydrique du sol en conditions de sécheresse provoque une perte importante de la turgescence au niveau de la plante (Henchi, 1987). L'augmentation de la production, dans ces conditions, dépend des mécanismes de tolérance qui assurent l'hydratation cellulaire et diminuent la perte en eau en maintenant un statut hydrique favorable au développement foliaire (Sorrells & *al.*, 2000). Le maintien d'un potentiel hydrique élevé est lié à l'aptitude à extraire l'eau du sol et à la capacité à limiter les pertes d'eau par transpiration (Turner, 1986).

Le mécanisme d'ajustement osmotique permet de maintenir la conductance stomatique et la photosynthèse à des potentiels hydriques foliaires bas, par ajustement du potentiel osmotique. Il intervient aussi en retardant la sénescence foliaire et en améliorant l'extraction de l'eau par les racines (Turner, 1997).

Dans le cas d'abaissement du potentiel hydrique, la tolérance s'exprime par un maintien de la turgescence, rendue possible grâce au phénomène d'ajustement osmotique qui est liée à la capacité, du végétal, à accumuler, au niveau symplasmique et de manière active, certains solutés (Blum, 1988). L'ajustement osmotique permet une protection des membranes et des systèmes enzymatiques (Santarius, 1973), en particulier au niveau des organes jeunes (Morgan, 1984).

Parmi les osmorégulateurs dont l'accumulation permet la diminution du potentiel osmotique :

- Les ions inorganiques, tels que le potassium qui contribue à 40% environ de l'osmolarité (Gaudillière & Barcelo, 1990) ; le nitrate pourrait également jouer, chez certaines espèces, un rôle important : sa teneur augmente considérablement, en cas de stress hydrique, dans les feuilles immatures du tournesol (Jones & *al.*, 1980).

- Les sucres solubles auraient un rôle majeur dans l'ajustement osmotique ; leur participation à l'abaissement du potentiel osmotique a été mise en évidence chez le sorgho (Jones & *al.*, 1980) et le blé (Johnson & *al.*, 1984).

- La teneur en acides aminés libres augmente significativement en situation de déficit hydrique chez le sorgho et le tournesol ; chez cette dernière espèce, cela explique 7% de la baisse du potentiel osmotique (Jones & *al.*, 1980). Parmi ces acides aminés, la proline semble jouer un rôle particulièrement important : on lui attribue un rôle d'osmoticum au niveau du cytosol et au niveau de la vacuole, mais aussi un rôle dans la protection des membranes et des systèmes enzymatiques et dans la régulation du pH (Venekamp & *al.*, 1989).

- Les acides organiques : l'acide malique est quantitativement important chez la plupart des espèces cultivées (Clark, 1969) ; il contribuerait (pour une assez faible part toutefois) à l'abaissement du potentiel osmotique chez le sorgho (Newton & *al.*, 1986)

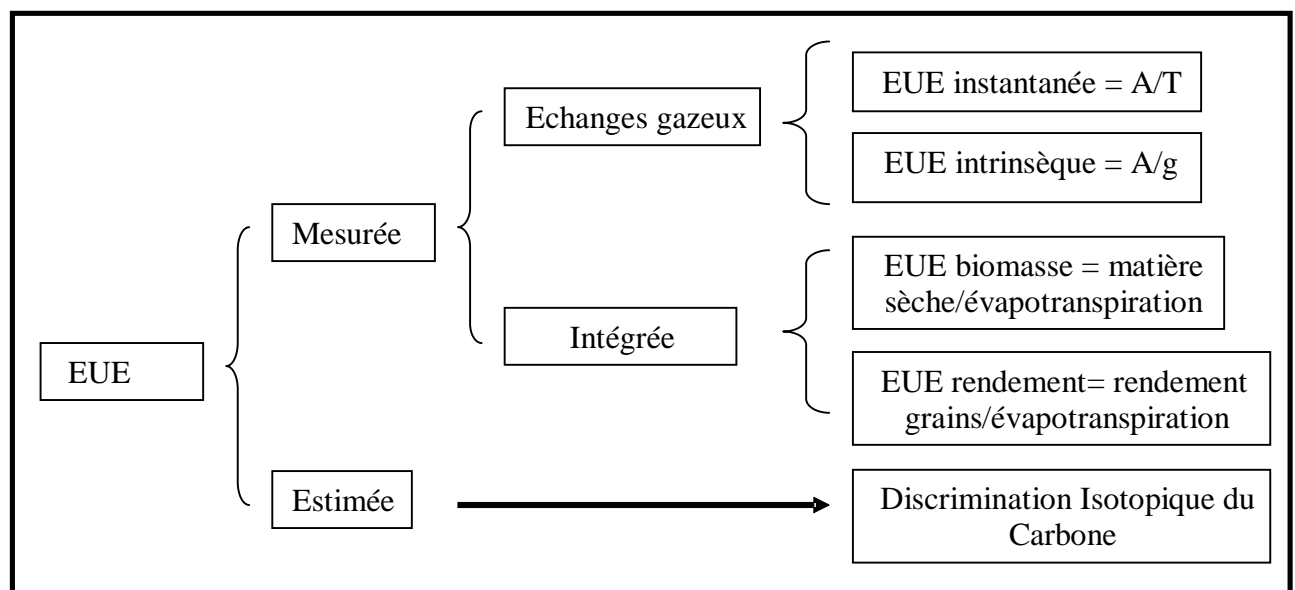
L'ajustement osmotique apparaît donc comme un mécanisme majeur d'adaptation à la sécheresse : il permet le maintien de nombreuses fonctions physiologiques (photosynthèse, transpiration, croissance...) ; il peut intervenir à tous les stades du développement et son caractère inductible suggère qu'il n'a pas (ou peu) d'incidence sur le rendement potentiel (Belhassen & *al.*, 1995).

## 1- Efficacité d'utilisation de l'eau

Généralement l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) exprime le rapport de la matière sèche totale produite à l'évapotranspiration pendant une période donnée (Richards & al., 2002) Si cette période est spécifique au cycle cultural, on parle d'efficacité d'utilisation nette (EUE nette) ; si elle s'étale durant toute l'année, on parle d'efficacité d'utilisation brute (EUE brute) (Bos, 1985). Lorsque la production considérée n'est pas la biomasse totale, mais une partie de celle-ci, telles que les grains ou les fruits, on parle alors d'efficacité d'utilisation de l'eau pour le rendement. D'un point de vue économique, l'efficacité de l'eau est définie comme le rapport du rendement économique à la quantité d'eau utilisée (Gardner & al., 1985).

### 1-1 Efficacité d'utilisation de l'eau comme critère de sélection

L'efficacité d'utilisation de l'eau, comme objective de sélection, peut être définie dans différents domaines qui dépendent de l'échelle et de l'unité de mesure considérée (figure 4) sachant que A est le taux de photosynthèse nette exprimé en  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  de  $\text{CO}_2$  ; T, est le taux de transpiration exprimé en  $\text{mmol}/\text{m}/\text{s}$  d' $\text{H}_2\text{O}$  et  $\Delta^{13}\text{C}$  est la discrimination isotopique du carbone exprimée.



**Figure 4. Echelle d'étude de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Tambussi, & al., 2007).**

Toutes les définitions potentielles ont en commun : un échange d'eau contre une unité de production.

Pour les fermiers et les agronomes, l'efficacité d'utilisation de l'eau correspond au rapport de la matière sèche produite à l'évapotranspiration de la culture (EUE), exprimée par la relation suivante :

$$\text{EUE} = W / [1 + (\text{Es}/\text{T})] \quad (1)$$

Où  $W$  est l'efficacité de la transpiration (matière sèche/transpiration),  $E_s$  est l'eau perdue par évaporation de la surface du sol et  $T$  est l'eau perdue par transpiration du végétal (Richards, 1991).

La relation (1) montre que l'efficacité d'utilisation de l'eau peut être améliorée soit par, l'augmentation de l'efficacité de la transpiration, soit par une réduction de l'évaporation du sol. L'importance relative de chacune des composantes de EUE varie selon la distribution des pluies. Si les pluies sont rares pendant la saison de croissance, et que la culture utilise uniquement l'eau stockée dans le sol, alors l'augmentation de l'efficacité de la transpiration ( $W$ ) offre une belle opportunité pour l'amélioration de EUE. En revanche, si l'alimentation en eau de la culture repose uniquement sur les pluies, alors la réduction de l'évaporation du sol ( $E_s$ ) fournit un autre moyen pour l'amélioration de EUE (Richards & *al.*, 2002).

Pour les physiologistes, l'unité de base de la production est le gain d'un mole de carbone dans la photosynthèse ( $A$ ) par rapport à l'eau transpirée ( $T$ ). Donc, cette définition correspond à l'EUE instantanée à l'échelle des échanges gazeux de la feuille ( $A/T$ ). Ces deux définitions peuvent être reliées par l'équation suivante (Passioura, 1977):

$$\text{Rendement} = ET * T/ET * W * HI \quad (2)$$

Dans cette relation, le rendement est défini comme étant une fonction du produit de; l'eau utilisée par la culture (évapotranspiration  $ET$ ), la proportion de la transpiration actuelle de la culture ( $T/ET$ ), l'efficacité de la transpiration pour la production de biomasse ( $W$ ) et qui correspond à la quantité de biomasse produite par millimètre d'eau transpirée et enfin le ratio entre le rendement en grain et la biomasse aérienne ( $HI$ ) (Condon & *al.*, 2004).

Dans la relation (2), aucune des composantes n'est vraiment indépendante l'une des autres (Condon & Richards, 1993), mais chacune d'elles peut faire l'objet d'amélioration génétique. L'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle foliaire,  $A/T$ , est directement et uniquement liée à l'une de ces composantes,  $W$ , qui est l'efficacité de la transpiration pour la production de biomasse. Potentiellement donc,  $A/T$  peut influencer l'une des trois autres composantes (Condon & *al.*, 2004).

## 1-2 Sélection pour l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la feuille

La recherche pour l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau agronomique par la sélection pour une grande efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la feuille a été longtemps attractive (Fischer, 1981).

$A/T$  peut être décrite mathématiquement en notant en premier que  $A$  est le produit de la conductance stomatique pour le  $CO_2$ ,  $G_c$  et le gradient de la concentration du  $CO_2$  entre l'extérieur ( $C_a$ ) et l'intérieur ( $C_i$ ) de la feuille (équation 3):

$$A = G_c(C_a - C_i) \quad (3)$$

Deuxièmement,  $T$  est le produit de la conductance stomatique de la vapeur d'eau  $G_w$  et le gradient de la concentration de la vapeur d'eau, à l'intérieur ( $W_i$ ) et l'extérieur ( $W_a$ ) de la feuille (équation 4)

$$T = G_w(W_i - W_a) \quad (4)$$

Puisque la concentration du CO<sub>2</sub> est plus grande à l'extérieur de la feuille, alors que celle de l'eau est plus grande à l'intérieur, le ratio A/T devient donc équation (5):

$$A/T = [G_c (C_a - C_i)] / [G_w(W_i - W_a)] \quad (5)$$

L'équation 4 peut être simplifiée par l'équation 6, sachant que le ratio entre la diffusion du CO<sub>2</sub> et de l'eau dans l'air est égale à 0,6 :

$$A/T \approx 0,6 C_a(1 - C_i/C_a) / (W_i - W_a) \quad (6)$$

L'équation (6) indique deux voies possible pour l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la feuille : soit, par l'abaissement du rapport C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub> et donc l'augmentation de la valeur de (1-C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>). Soit, de rendre la valeur de (W<sub>i</sub>-W<sub>a</sub>) plus petite, par diminution des pertes en eau en abaissant le gradient de la transpiration

### 1-2-1 Diminution du gradient de la concentration en vapeur d'eau

Le moyen le plus simple par lequel la sélection a amélioré l'efficacité de la transpiration pour la production de biomasse via A/T, a été la modification des caractéristiques des cultures, comme la réduction du gradient d'évaporation durant le cycle de croissance de la culture (Tanner & Sinclair, 1983; Richards & *al.*, 2002).

Ainsi, le processus de réflectance au niveau des feuilles diminue la perte en eau, de la culture provenant du gradient de la concentration de la vapeur d'eau entre le couvert végétal et l'atmosphère. Ce gradient est faible dans les régions froides, humides et dans la plupart des régions durant les mois les plus froids de l'année.

Durant le dernier siècle, les sélectionneurs de nombreuses espèces cultivées, ont exploité la variation génétique associée à la précocité, la réponse à la photopériode et au besoin en vernalisation, pour générer d'énormes variations dans la phénologie des cultures. Cette variation phénologique a permis aux cultures de croître successivement dans des régions et à des moments de l'année où la demande évaporative prévalente est faible, ce qui engendre une élévation de A/T et une augmentation des rendements des cultures.

Pour saisir cette opportunité, tous les efforts doivent être axés pour une amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau des cultures. L'ajustement de la date de semis pourrait améliorer le ratio A/T et donc le rendement des cultures (Condon & *al.*, 2004).

### 1-2-2 Changement du rapport C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>

En référence à l'équation (6), une autre voie est offerte à la sélection pour l'amélioration de A/T et de ce fait à l'amélioration de l'efficacité de la transpiration pour la production de biomasse. Il s'agit d'élever le numérateur du rapport (1-C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>) pour sélectionner des génotypes qui ont une faible valeur de C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>.

La faible valeur de  $C_i/C_a$  peut refléter une valeur faible de la conductance stomatique, une grande capacité photosynthétique ou la combinaison des deux (Farquhar & al., 1989).

Théoriquement, la réduction de  $C_i/C_a$  de 0,7 à 0,6 aboutit à un gain de 33% d'efficacité d'utilisation de l'eau, sachant que cette dernière est proportionnelle à la valeur  $(1-C_i/C_a)$ . Cependant, des dysfonctionnements peuvent avoir lieu. Par exemple, si la baisse de la valeur de  $C_i/C_a$  est due à une augmentation de la capacité photosynthétique, ceci conduit à une augmentation de l'assimilation du  $CO_2$  pour chaque unité de mesure, et si la baisse de  $(C_i/C_a)$  est due à une faible conductance stomatique, alors elle conduit à une diminution de l'assimilation du  $CO_2$ .

Outre la diminution de l'assimilation du  $CO_2$ , une autre pénalité accompagne la conductance stomatique : si la conductance de la couche externe de la feuille n'est pas très élevée, la température foliaire et la concentration en vapeur d'eau à l'intérieur de la feuille ( $W_i$ ) augmentent et en parallèle la concentration en vapeur d'eau à l'extérieur de la feuille et la conductance baissent. Les modifications de  $W_i$  et  $W_a$  aboutissent à l'augmentation de la transpiration par unité de conductance stomatique, et par conséquent à l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau comme prédite par l'équation (6) (Condon & al., 2002,2004).

## 2- Discrimination isotopique du carbone

### 2-1 Relation entre $\Delta^{13}C$ et le ratio $C_i/C_a$

Il est important de noter que la conductance stomatique, la capacité photosynthétique et  $A/T$  sont très difficiles à mesurer malgré la disponibilité des systèmes de mesure des échanges gazeux au niveau de la feuille. Actuellement, il est admis qu'au moins chez les espèces à photosynthèse de type  $C_3$ , des différences relatives de  $C_i/C_a$ , peuvent être estimées indirectement, en mesurant la composition isotopique du carbone de la matière sèche de la plante (Farquhar & al., 1989).

Le  $^{13}C$  est un isotope stable, il constitue près de 1% du  $CO_2$  atmosphérique. Chez les plantes  $C_3$ , la proportion du  $^{13}C$  est plus petite que celle de l'atmosphère, car, les espèces de type  $C_3$  discriminent contre le  $^{13}C$  pendant la photosynthèse. La discrimination isotopique du carbone ( $\Delta^{13}C$ ) est une mesure du ratio  $^{13}C/^{12}C$  dans le matériel végétal, relativement au même ratio de l'air qui l'entoure et d'où elle puise le  $CO_2$  et qui peut être défini comme suit (Farquhar & Richards, 1984):

$$\Delta^{13}C = [(R_a/R_p) - 1] * 1000 \quad (7)$$

ou  $R_a$  est la valeur du ratio  $^{13}C/^{12}C$  dans l'atmosphère et  $R_p$  est celle du matériel végétal. Pour des raisons de commodité l'unité de  $\Delta^{13}C$  est exprimée en (‰). Chez les plantes de type  $C_3$ , le ratio  $C^{13}/C^{12}$  a une valeur proche de 1,02 donnant une valeur de  $\Delta^{13}C$  proche de 20‰.

Chez les espèces  $C_3$ , de nombreux processus contribuent à la détermination de la valeur de  $\Delta^{13}C$  mesurée dans leur matière sèche (Farquhar & al., 1989; Brugnoli & Farquhar, 2000).

L'expression approximative suivante (équation 8) a été développée par Farquhar et Richards (1984) pour expliquer deux processus majeurs; le fractionnement associé à la diffusion du CO<sub>2</sub> dans les espaces intercellulaires (a = 4,4‰) et le fractionnement associé à la carboxylation du CO<sub>2</sub> par la Rubisco dans les produits primaires de la photosynthèse (b ≈ 28‰)

$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b - a)C_i/C_a \quad (8)$$

La valeur 28‰ de b est une approximation parce qu'il existe des sources supplémentaires de la variation de  $\Delta^{13}\text{C}$ , telles que celles associées au métabolisme et à la respiration et qui restent mal définies et dont la magnitude est faible dans la plus part des situations (Brugnoli & Farquhar, 2000). Les valeurs numériques citées dans la formule (8) donnent :

$$\Delta^{13}\text{C} \approx 4,4 + 23,6 C_i/C_a \quad (9)$$

Cette simple équation montre que  $\Delta^{13}\text{C}$  est positivement corrélée à  $C_i/C_a$ . Comme auparavant il a été admis que A/T devrait être corrélée négativement avec  $C_i/C_a$  (équation 6), alors,  $\Delta^{13}\text{C}$  et A/T doivent être toujours négativement corrélés.

## 2-2 Relation entre $\Delta^{13}\text{C}$ et l'efficacité d'utilisation de l'eau

Le fait d'admettre que  $\Delta^{13}\text{C}$  pourrait fournir une mesure relativement simple et indirecte de la variation du rapport A/T (Farquhar & al., 1982; Farquhar & Richards, 1984) a relancé la perspective de l'exploitation de la variation de l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle foliaire pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau.

Cependant, Il a été montré dans d'autres travaux, qu'il existe une légère variation de  $C_i/C_a$  parmi les espèces de type C<sub>3</sub>, et qu'elle est l'unique différence substantielle entre les espèces de type C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> (Fischer, 1981; Tanner & Sinclair, 1983). Depuis des études novatrices ont mis en évidence pour plusieurs espèces C<sub>3</sub> que la variation en  $\Delta^{13}\text{C}$  reflète étroitement la variation dans le ratio  $C_i/C_a$  (Farquhar & al., 1982; Farquhar & Richards, 1984).

Brugnoli et Farquhar (2000), ont mesuré  $\Delta^{13}\text{C}$  *in situ* à partir du courant d'air à l'entrée et à la sortie de la feuille ainsi qu'au niveau des photosynthétats extraits fraîchement des feuilles ou mesuré dans la matière sèche des tissus. La variation de  $\Delta^{13}\text{C}$  entre les génotypes des espèces de type C<sub>3</sub> est assez importante. Théoriquement, cette variation est substantielle pour A/T et pour l'efficacité d'utilisation de l'eau ainsi que pour le potentiel de production de la matière sèche (Farquhar et Richards, 1984).

Des corrélations négatives entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes ont été enregistrées chez plusieurs espèces (Farquhar & al., 1989; Hall & al., 1994; Condon & Hall, 1997). Depuis,  $\Delta^{13}\text{C}$  est considéré comme un caractère à forte héritabilité qui est relativement facile à manipuler dans la sélection des populations (Condon & Richards, 1992; Rebetzke et al., 2002).



La mesure de  $\Delta^{13}\text{C}$  peut être effectuée sur des échantillons de matériel végétal frais ou stocké, c'est est une technique relativement rapide qui peut être automatisée. Cependant, de sérieuses difficultés sont survenues lorsqu'on a essayé de passer de l'association entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et l'efficacité d'utilisation de l'eau des feuilles et des plantes entières vers l'association entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et l'efficacité d'utilisation de l'eau et le rendement obtenu au champ. La nature de ces difficultés et les solutions possibles sont abordées dans les points suivants.

### **2-3 Relation entre rendement en grains et $\Delta^{13}\text{C}$ chez les céréales**

La difficulté majeure à laquelle se heurte l'utilisation de la discrimination isotopique du carbone  $\Delta^{13}\text{C}$  dans la sélection pour l'amélioration agronomique de l'efficacité d'utilisation de l'eau est l'incohérence observée entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et le rendement. Ces incohérences ont été bien répertoriées dans de nombreuses études impliquant les céréales, tels que le blé tendre (*Triticum aestivum* L.), le blé dur (*T. turgidum* var. D.) et l'orge (*Hordeum vulgare* L.).

L'association négative entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et A/T à l'échelle foliaire et les associations négatives observées entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la plante dans plusieurs études menées dans des pots, ont toujours révélé des corrélations négatives entre le rendement des cultures et  $\Delta^{13}\text{C}$ .

Aussi, beaucoup d'études sur des collections de céréales cultivées, en Australie sous régime pluvial ou irrigué et dans d'autre régions (Sayre & *al.*, 1995; Fischer & *al.*, 1998), ont montré que les relations entre le rendement en grains et  $\Delta^{13}\text{C}$  ont été rarement négatives, si ce n'est souvent des relations positives ou neutres. Beaucoup de ces études associant  $\Delta^{13}\text{C}$  et la productivité chez les céréales ont utilisé des groupes de géotypes qui diffèrent entre eux non seulement par  $\Delta^{13}\text{C}$ , mais aussi par la date de floraison et la hauteur, deux caractéristiques qui peuvent influencées considérablement les productions, indépendamment de  $\Delta^{13}\text{C}$  (Condon & *al.*, 1987, 1993, 2002; Condon & Richards, 1993; Condon & Hall, 1997), en région méditerranéenne (Voltas & *al.*, 1999; Merah & *al.*, 2001; Royo & *al.*, 2002; Araus & *al.*, 2003)

Il existe plusieurs raisons qui peuvent expliquer que de nombreuses études ont montré des relations variables entre le rendement et  $\Delta^{13}\text{C}$ . Chez les céréales un faible  $\Delta^{13}\text{C}$  (donc un fort A/T) est un caractère dominant en matière l'utilisation de l'eau, probablement plus important en matière de taux de croissance du végétal. En effet, en l'absence de déficit hydrique du sol, les géotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$  ont tendance à croître moins vite que ceux à fort  $\Delta^{13}\text{C}$ , et par conséquent, ils produisent moins de biomasse et de rendement grain (Condon & Richards, 1993; Condon & *al.*, 1993, 2002; Lopez-Casteneda & *al.*, 1995).

Une raison évidente largement citée fait que chez les cultures de céréales,  $\Delta^{13}\text{C}$  est associé au caractère dominant du taux de croissance. En effet, la différence dans  $\Delta^{13}\text{C}$  en absence de déficit hydrique du sol résulte de la variation de la conductance stomatique. Les géotypes à faible conductance stomatique ont tendance à avoir un fort A/T et un faible  $\Delta^{13}\text{C}$ . Dans ce cas, A/T sera

vraisemblablement associé à un faible taux de photosynthèse par unité de surface foliaire et un taux de croissance faible.

La faible conductance, n'est pas la seule raison qui explique l'association entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et le caractère dominant du taux de croissance de la culture. Chez les céréales, la variation de  $\Delta^{13}\text{C}$  peut résulter aussi de la variation de la capacité photosynthétique (Condon & *al.*, 1990; Morgan & Le Cain, 1991). Si la faible valeur de  $\Delta^{13}\text{C}$  est le résultat d'une forte capacité photosynthétique, alors il y aura un fort taux de photosynthèse par unité de surface foliaire et donc un taux de croissance de la culture plus rapide. Les augmentations substantielles de la capacité photosynthétique sont facilement réalisées grâce à une concentration en azote dans les petites feuilles qui interceptent moins la lumière. Cette faible interception peut ralentir le taux de croissance (Condon & Richards, 1993; Condon & Hall, 1997). Si l'interception de la lumière n'est pas réalisée ou l'est promptement, comme dans les cultures en sec, alors la forte capacité photosynthétique ne va pas entraîner une augmentation de la croissance.

Par ailleurs, des génotypes de céréales à faible capacité photosynthétique peuvent avoir une croissance plus rapide, une corrélation positive entre la production de biomasse à l'anthesis et  $\Delta^{13}\text{C}$ . Dans une expérience où ont été testés trois génotypes ayant de fortes valeurs de  $\Delta^{13}\text{C}$  et de faibles valeurs de conductance stomatique, il a été montré que pour des conductances similaires mais avec de fortes valeurs de  $\Delta^{13}\text{C}$ , les génotypes avaient une faible capacité photosynthétique. Cette déduction a été confirmée sur de grandes plantes cultivées en serre (Condon & *al.*, 1990).

Ainsi, chez les céréales, une grande capacité photosynthétique ne peut être nécessairement associée à un plus fort taux de croissance de la culture. Cette conclusion peut être confortée par l'étude de Fischer & *al.*, (1998) sur les changements physiologiques du blé tendre publiée par le CIMMYT de 1962 à 1988. Ces blés récents ont relativement un grand rendement, mais, il n'est pas lié à une production plus grande de la biomasse. Par ailleurs, ce gain en rendement reflète un plus fort indice de récolte pour la plus part de ces blés récents. Parmi l'historique collection des blés du CIMMYT, il n'y a pas eu de changement de production de la biomasse totale malgré que les blés récents aient une plus grande capacité photosynthétique et une forte conductance stomatique, qui à elles seules génèrent relativement une grande valeur de A à l'échelle de la surface foliaire.

### **3- Interaction entre croissance et utilisation de l'eau**

Indépendamment de sa base physiologique, chez les génotypes des céréales, le caractère dominant de la croissance à travers un faible  $\Delta^{13}\text{C}$ , a des implications importantes pour l'efficacité agronomique de l'utilisation de l'eau. Les plus importantes relations entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et le rendement ont été observées dans des milieux ou des saisons durant lesquels, les irrigations complémentaires ou les précipitations régulières, maintenaient un statut hydrique élevé du sol durant le cycle de croissance. Dans ces environnements, la rapide croissance des génotypes à forte discrimination isotopique du carbone, se traduit souvent et directement par, une plus grande production de biomasse finale et de rendement en grains (Condon & *al.*, 1987, 2002; Sayre & *al.*, 1995; Fischer & *al.*, 1998).

A maturité, les génotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$  qui produisent moins de biomasses et de rendements, n'exploitent pas l'eau restante dans le sol (Condon & *al.*, 2002).

Dans les environnements moins favorables, une limitation en eau suite à une variation en quantité ou dans le temps, peut interagir avec le caractère dominant de la croissance et de l'utilisation de l'eau des génotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$ , pour générer des relations complexes entre le rendement et  $\Delta^{13}\text{C}$ . Cette complexité peut être illustrée par l'étude de Condon & Hall, (1997) sur deux lignées F6 et F7 cultivées durant 1992 et 1993. Pour l'année sèche de 1992, ils ont observé, chez le premier croisement (Rosella x Matong), une liaison entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et la faible production de biomasse et de rendement, mais chez le deuxième (Quarrion x Cranbrook) il n'y avait pas de liaison entre la productivité et  $\Delta^{13}\text{C}$ . Le statut hydrique du sol était vraisemblablement élevé pour le second croisement, parce que la deuxième lignée a fleuri une semaine en avance par rapport à la première.

Les résultats de ces deux lignées cultivées sur ces deux saisons, indiquent que la quantité des pluies est une variable importante qui contribue dans la variation des rendements en grains. Aussi, ils indiquent que le développement d'un déficit hydrique du sol correspondant à la phase critique de la floraison est aussi une variable importante.

Si les génotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  épuisent l'eau disponible dans le sol très rapidement avant la floraison, ce sera une pénalité pour leur rendement (Fischer, 1981). Cependant, la pénalité en matière de rendement et d'utilisation de l'eau par la culture, associés à la rapide croissance des génotypes de céréales à forte  $\Delta^{13}\text{C}$ , n'est pas aussi grande à celle prévue. En fait, la croissance rapide des génotypes de céréales à fort  $\Delta^{13}\text{C}$ , a toujours été considérée comme avantageuse dans les environnements ou pendant les saisons où les fréquences de chute de pluies précoces dans la saison sont très importantes, mais ceci n'est pas le cas pour les stades avancées en climat méditerranéen typique (Condon & *al.*, 1993; Condon & Hall, 1997; Voltas & *al.*, 1999; Merah & *al.*, 2001; Royo & *al.*, 2002; Araus & *al.*, 2003).

Dans ce genre d'environnement, l'évaporation de la surface du sol représente près de 50% des précipitations de la saison de culture (Cooper et *al.*, 1987). Les études, où l'eau utilisée a été bien répartie entre les plantes et le sol, ont montré que la plus forte transpiration associée au fort  $\Delta^{13}\text{C}$  résulte de la différence d'utilisation de l'eau total jusqu'à l'anthèse bien que les génotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  aient une croissance plus rapide à ce stade critique de développement (Condon & *al.*, 1993, 2002; Lopez-Castaneda & *al.*, 1995). La raison de ceci est que, contrairement aux génotypes tardifs à faible  $\Delta^{13}\text{C}$ , les génotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  et à croissance précoce, arrivent à couvrir rapidement le sol, et par là, à bien réduire l'évaporation du sol lorsque les chutes de pluies sont fréquentes. Parce que l'eau total utilisée jusqu'à l'anthèse était similaire, les génotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  produisent plus de biomasse et arrivent à la transloquer pour produire un nombre élevé de grains et de rendement.

Les géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  peuvent produire plus de biomasse à l'anthèse en puisant la réserve en eau du sol (Condon and *al.*, 1993). La faible croissance après la floraison comparée aux géotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$  qui sont plus économes dans l'utilisation de l'eau. Les géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  donnent plus de rendement, grâce à la production d'un grand nombre de grains (associée à une plus grande production de biomasse à l'anthèse) et grâce à leur capacité à les remplir, probablement par translocation de grandes quantités d'assimilats stockées. Dans les mêmes environnements, les géotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$  n'arrivent pas à utiliser efficacement les assimilats stockés. Ceci est dû à leurs faibles réserves engendrées par une moindre production de biomasse à l'anthèse, ou bien les assimilats stockés n'étaient pas utiles, car les géotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$  avaient plus de réserves hydriques dans leurs sol dont ils se servaient pour le remplissage des grains grâce à une forte photosynthèse (Condon and Hall, 1997). En dépit de leurs faibles croissances après la floraison, les géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  réalisent des rendements élevés, car ils ont tendance à avoir un indice de récolte très élevé.

Pour résumer la complexe association entre  $\Delta^{13}\text{C}$ , la croissance, l'utilisation de l'eau et le rendement chez les céréales, le caractère conservatif de la croissance associé avec le faible  $\Delta^{13}\text{C}$  et la forte A/T a été développé pour interagir avec l'ampleur et le moment des limitations en eau, afin de générer des effets divers sur la structure des composantes du rendements précédemment citée (équation 1).

Dans certaine études, une grande efficacité de transpiration pour la production de biomasse (W), reflétant une forte A/T à l'échelle foliaire, a été compensée par une utilisation réduite de l'eau totale de la culture. Les géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  ont donné plus de rendement et ont épuisé toute l'eau contenue dans le profil du sol. Les géotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$  extraient moins d'eau et perdent plus d'eau par évaporation du sol. Dans la combinaison de ces deux facteurs (moins d'extraction et plus d'évaporation), quelques fois il a été observé chez les géotypes à faible  $\Delta^{13}\text{C}$ , une transpiration considérablement faible comparée à celle des géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  (Condon & *al.*, 1993, 2002).

Donc souvent, il n'y a pas eu de relation entre le gain en biomasse et une forte A/T, et fréquemment entre la production de biomasse et le faible rendement. La forte production de biomasse chez les géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  a été le plus souvent réalisée à l'anthèse, cette différence à l'anthèse a été substantiellement reflétée par un nombre de grains et un rendement élevés chez les géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$  bien qu'ils aient produit moins de biomasse à après l'anthèse. Tout en prenant en compte le rendement, dans quelques études, les relations positives entre la production de biomasse et  $\Delta^{13}\text{C}$  ont été soutenues par les relations positives entre l'indice de récolte (HI) et  $\Delta^{13}\text{C}$  qui est probablement due, en partie, à une forte translocation des réserves stockées chez les géotypes à fort  $\Delta^{13}\text{C}$ .

## **1- Protocole expérimental**

L'expérimentation a été réalisée durant la campagne agricole 2006/2007. L'essai a été mené sur le site de la pépinière Latreche Amar, située au lieu dit : 'Chirhoum', à 12 kilomètres au Nord Est du chef lieu de la wilaya de Sétif. La parcelle expérimentale se trouve à une altitude de 1180 mètres, avec une latitude de 36° 10 et 5° 20 de longitude, ses coordonnées géographiques ont été mesurées à l'aide d'un GPS 'Garmin 72'.

Le précédent cultural est une jachère labourée au printemps avec une charrue à disque et recroisée au cover crop en automne, suivi d'un amendement phosphaté avec du TSP à 46% à raison de 1qx/ha. Le lit de semence a été préparé par le passage d'une herse juste avant le semis. On a pratiqué un désherbage à la main tout au long du cycle de la culture, complété par un désherbage chimique au stade fin tallage et début montaison avec du Granstar (12 g/h) et Hussar (1 Litre/h). Une fertilisation azotée a été réalisée à ce même stade avec de l'urée à 46% à raison de 1qx/h. Le semis a été exécuté à la main le 26 novembre 2006 à raison de 75 grains/ml et la récolte a été réalisée les 28 et 29 juin 2007.

Le dispositif expérimental adopté est en bloc complètement randomisé à quatre répétitions. La parcelle élémentaire comporte quatre lignes de 2,50 mètres avec un écartement entre lignes de 18 cm. Pour éviter l'effet de bordure lors des notations, on a fixé dès le semis quatre stations de 01 ml par parcelle élémentaire sur les deux lignes du milieu en écartant les 10 et 30 centimètres, respectivement des extrémités et du milieu. Le matériel végétal est composé d'un groupe de 08 variétés dont les caractéristiques sont données en annexe 1.

Notant enfin que le premier bloc a été réservé pour le prélèvement d'échantillon servant pour l'estimation de la matière sèche et du tallage herbacé, les trois autres blocs ont servi pour l'estimation des autres paramètres.

## **2- Notations**

### **2-1 Rendement et composantes du rendement**

Les notations ont été effectuées par repérage, des dates et le nombre de jours, qui correspondent aux quatre stades repères du cycle de croissance du matériel végétal étudié. Il s'agit des stades : levée, montaison, épiaison et maturité.

Nous avons comptabilisé la phase située entre 50% de la levée et 50% de l'épiaison, puis transformé le nombre de jours calendaires correspondant, en somme de température par cumul des températures moyennes journalières positives.

Au stade deux nœuds, nous avons prélevé un échantillon de 10 plants/génotype qu'on a pesé, passé à l'étuve à 120 °C puis repeser pour calculer la matière sèche. Aussi, on a prélevé un autre échantillon de 10 plants/variété qui a servi pour calculer le coefficient de tallage herbacé.

Pour les autres blocs, sur toutes les stations nous avons noté le nombre de plant levé. A maturité, nous avons récolté les stations séparément. Sur chacune

d'elle nous avons estimé la biomasse aérienne, la hauteur, le nombre d'épis. La fertilité a été calculée sur un échantillon de 05 épis de chaque station. Ces mêmes grains ont été pesés et à l'aide de la règle de trois nous avons calculé le poids de mille grains. Le rendement final a été calculé par peser des grains sur chaque station.

## 2-2 Teneur en chlorophylle

Sur le milieu de la feuille drapeau de dix plants de chaque variété, nous avons mesuré la teneur moyenne en chlorophylle total (a+b), en utilisant un chlorophyllo mètre digital de type SPAD 501 qui donne des lectures en unité SPAD. Ensuite nous avons prélevé deux feuilles, dont les teneurs en chlorophylle en unité SPAD sont connues, et grâce à la technique du DMSO (Arnon, 1949), nous avons estimé leur teneur en chlorophylle en  $\mu\text{mol}/\text{gramme}$  puis transformé les unités SPAD en unité  $\mu\text{mol}/\text{g}$  de matière sèche. On note que pour chaque variété on a effectué quatre mesures étalées entre les stades épiaison et remplissage

## 2-3 Discrimination isotopique du carbone ( $\Delta$ )

Pour chaque parcelle élémentaire, on a broyé finement quelques graines puis pris un échantillon de 02 grammes qui a servi pour mesurer le rapport isotopique,  $R = C^{13}/C^{12}$ , par spectrométrie de masse (Spectrométrie de masse Optima, GV Instruments, Manchester, UK) dans les laboratoires de Seibersdorf à l'Agence Internationale à l'Energie Atomique de Vienne, Autriche.

La valeur de la composition isotopique  $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$  est obtenue par la relation suivante :

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R \text{ échantillon}/R \text{ standard})-1]*100 \quad (1)$$

Le R standard est celui de Pee Dee Belemnite "PDB". Enfin pour obtenir les valeurs de la discrimination isotopique ( $\Delta$ ), on a utilisé la relation suivante :

$$\Delta (\text{‰}) = [ (\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_p)/(1 + \delta^{13}\text{C}_p) ] * 1000 \quad (2)$$

a et p sont respectivement l'air et l'échantillon considéré

## 2-4 Etat hydrique du sol

Afin de caractériser l'état hydrique de notre parcelle, nous avons réalisé un profil pédologique sur une profondeur d'un mètre. Il ressort que notre sol présente les caractéristiques suivantes :

- \* Une bonne structuration en surface ainsi qu'en subsurface, collant et peu plastique.
- \* la structure est de type grumeleuse à polyédrique respectivement vers la surface et en profondeur.
- \* sol apparemment jamais inondé mais qui renferme des matériaux indurés (graviers et petits cailloux) bien ancrés dans l'ensemble du profil.

La succession lithologique et les processus pédologiques, laissent penser qu'une accumulation d'origine alluvionnaire s'y est installée.

Les résultats de L'analyse granulométrique réalisée (laboratoire de pédologie de l'UFA Sétif) avec la méthode de la pipette robinson, sur les quatre premiers horizons avec un pas d'échantillonnage de 20 centimètres, montrent, selon le diagramme de l'USDA, que la texture est de type Limono argileuse avec une teneur en sable légèrement élevé pour le premier horizon (tableau 7). La densité apparente, réalisée avec la méthode du cylindre, révèle que les horizons différent entre eux et que le deuxième horizon est plus dense comparer aux autres.

**Tableau 7. Granulométrie et paramètres hydriques du sol de l'expérimentation.**

Horizon (cm)	Argile (%)	Limon Grossier (%)	Limon Fin (%)	Sable (%)	Densité Apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Cc (mm)	pF (mm)	RU (mm)	RFU (mm)
0 – 20	32,00	28,80	22,00	17,20	1,32	71,28	34,32	36,96	24,64
20 – 40	34,90	25,05	24,70	15,35	1,42	76,68	36,92	39,76	26,51
40 – 60	34,90	25,05	24,70	15,35	1,36	73,44	35,36	38,08	25,39
60 – 80	34,90	25,05	24,70	15,35	1,36	73,44	35,36	38,08	25,39
0 – 80	31,38	25,99	24,03	15,8	1,38	294,8	141,9	152,8	101,9

On a utilisé le tableau de correspondance entre texture et réserve en eau par unité volumique mis en point par l'INRA (Jamagne & al., 1977), pour estimer la réserve en eau du sol. Il ressort que la capacité au champ de notre sol est de 27% et son point de flétrissement est de 13%.

On a pratiqué la méthode gravimétrique (utilisation d'une tarière agronomique de 120 centimètres) pour le suivi du profil hydrique du début jusqu'à la fin du cycle cultural. Pour chaque horizon, Nous prélevons un échantillon de 100 grammes de sol frais, après l'avoir passer à l'étuve à 105 C° pendant 24 heures, nous le repesons et calculons son humidité pondérale selon la formule suivante :

$$\text{Humidité pondérale (\%)} = (\text{Poids frais} - \text{Poids sec}) / \text{Poids sec}$$

### 3- Traitement statistique

Concernant l'analyse de variance les données ont été traitées par le logiciel ViSta (Young, 2001). La comparaison des moyennes des paramètres mesurés ainsi que les corrélations et les régressions ont été réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA (StatSoft, 1997).

## 1- Résultats

### 1-1 Bilan hydrique par la méthode gravimétrique

#### 1-1-1 Températures

L'examen des données (figure 5) montre que la campagne 2006/2007 a été plus chaude comparée aux dernières 25 années. Seules les températures moyennes mensuelles de Mars (8,10°C) et Mai (16,56 °C) semblent être proches de la moyenne des mêmes mois de 1981-2005 avec respectivement 8,94 et 16,71 °C (tableau 8).

Pour les mois de Novembre et Décembre, on note une diminution des températures minimales de 3,27 et 2,05 °C respectivement, suivie d'une élévation des températures maximales de 7,10 et 4,66 °C. Le mois de Janvier qui est normalement le plus froid, a enregistré durant cette campagne, une élévation de température moyen de 3,42 °C, cela est due à l'augmentation des températures maximales soit ; 4,15 °C en plus par rapport à la normale.

Notons enfin que la vague de chaleur qui a caractérisée la période allant du 17 au 25/06/2007 (annexe 2a), avec une moyenne de 29,83 °C et un maxima de 37,16 °C, enregistre une élévation de température de 1.93 °C pour le moins de Juin comparée aux 25 dernières années.

**Tableau 8. Températures (en °C) et précipitations (en mm) des périodes 1981/2005 et 2006/2007**

Mois	T moy 2006/2007	T moy 1981/2005	T max 2006/2007	T max 1981/2005	T min 2006/2007	T min 1981/2005	Pluie 2006/2007
Nov	12,27	9,81	2,93	6,2	21,60	14,5	6,90
Déc	7,86	6,07	0,75	2,8	14,96	10,3	61,80
Janv	8,45	5,03	3,36	1,7	13,55	9,4	9,50
Févr	8,10	6,18	3,69	2,3	12,51	11,1	23,20
Mars	8,10	8,94	3,74	4,6	12,46	14,3	108,60
Avr	12,38	11,56	8,34	6,8	16,42	17,2	95,60
Mai	16,56	16,71	10,83	11,3	22,28	23	27,80
Juin	23,93	22,02	17,08	16,1	30,78	29,3	22,70

#### 1-1-2 Précipitations

Durant la campagne 2006/2007, 50 jours de précipitations ont été enregistrés (annexe 2b) dont deux jours de neige qui ont coïncidé avec le début du printemps (21 et 22 Mars). Le cumul des précipitations de Novembre à Juin 2007 a atteint 356,1 mm. Novembre, Janvier et Juin sont les moins pluvieux, respectivement : 6,9 ; 9,50 et 22,70 mm (tableau 8). Décembre a enregistré 61,80 mm, alors que le pic a été enregistré au mois de Mars et Avril, qui totalisent plus de la moitié des précipitations cumulées durant le cycle cultural (figure 6).



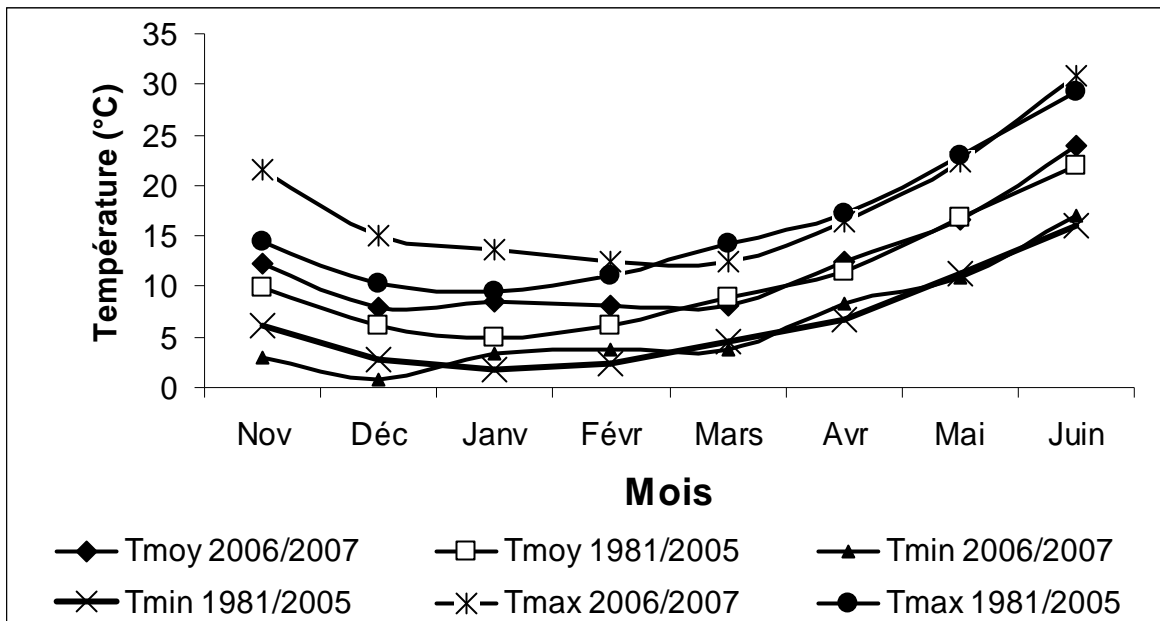


Figure 5. Températures mensuelles des périodes 1981/2005 et 2006/2007.

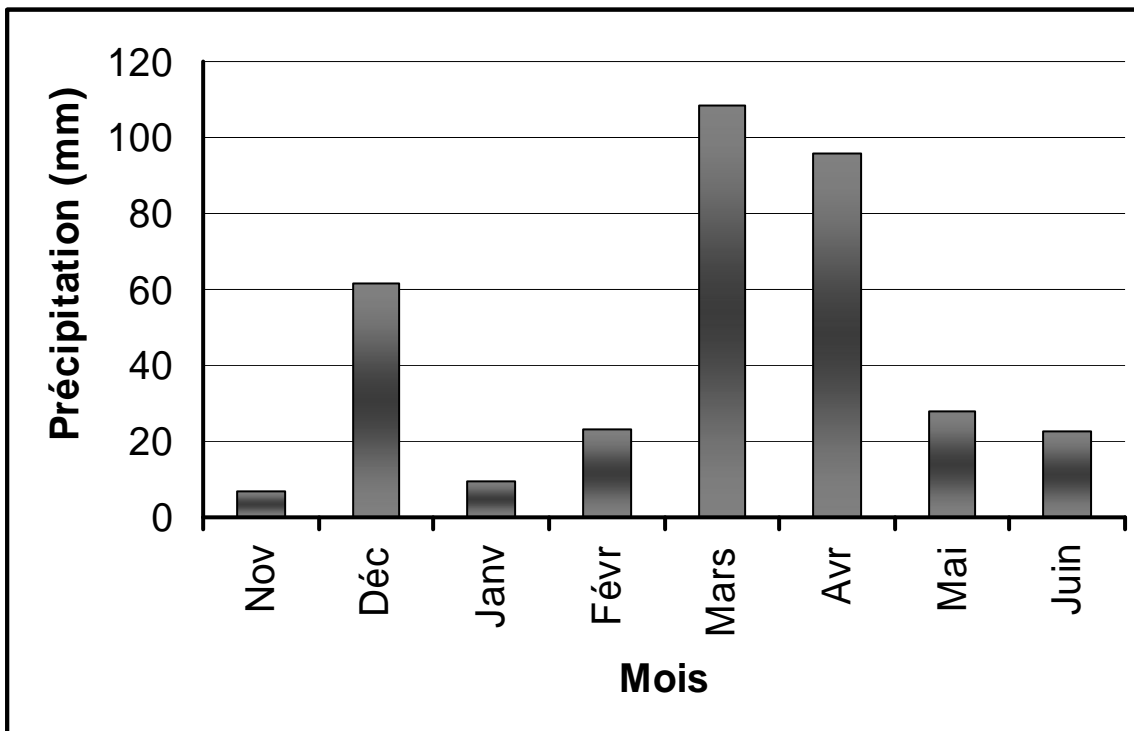


Figure 6. Précipitations mensuelles de la campagne 2006/2007.

### 1-1-3 Etat hydrique du sol selon les horizons

Sur la figure 6 on observe une variation spatio-temporelle de la réserve hydrique du sol. A l'échelle du temps, on constate que pour le même horizon, la réserve hydrique présente de très grandes fluctuations suivant les différentes dates. A l'échelle de l'espace, on constate que pour la même date, la réserve hydrique n'est pas similaire chez les différents horizons (tableau 9).

Dès le semis, le sol est presque à sec. Tous les horizons présentent des déficits hydriques qui se traduisent par un déficit de la réserve facilement utilisable (RFU), soit ; -10,03 et -11,52 mm pour H1 et H2, et -6,76 et -5,89 mm pour H3 et H4.

Dès les premières pluies de Décembre, le réservoir du sol commence à se remplir graduellement. Il enregistre une réserve facilement utilisable de 8,2 mm pour H1 le 8 Décembre et atteint 8,61 mm pour H2, 14 jours après. Pour H3 et H4, le déficit persiste plus tard et il n'est pallié qu'au mois de Février, avec respectivement une RFU de 8,85 mm le 2 Février pour le troisième horizon et 3,60 mm le 22 Février pour le dernier horizon.

Mis à part un léger déficit ressenti durant la troisième décennie de février (-1,56 mm pour H1), le réservoir du sol se remplit progressivement atteignant la capacité au champ à la fin du mois de Mars. Le stock en eau était constamment à son maximum sur toute la profondeur de notre parcelle, mais à partir de la deuxième décennie de Mai, il a été noté un épuisement de la réserve en eau, puisque sur une dizaine de jours seulement, toute la RFU a été consommée.

A partir de la troisième décennie de Mai et jusqu'à la récolte, un déficit hydrique permanent s'installe. Il est plus avancé pour H1 et H2, qui avoisinent le point de flétrissement, avec une RFU respective de -11,96 et -11,45 mm, comparés à H3 et H4 dont la RFU est estimée à -7,63 et -6,51 mm.

### 1-1-4 Bilan hydrique selon des stades phénologiques

En utilisant les relations suivantes :

$$ETR = P - \Delta RU \quad (1)$$

ETR : évapotranspiration réelle, P : précipitation et  $\Delta RU$  : variation de la réserve hydrique

et

$$ETc = ETo * Kc \quad (2)$$

L'ETc est l'évapotranspiration de la culture en absence de stress, et l'ETo est l'évapotranspiration de référence et Kc : le coefficient cultural

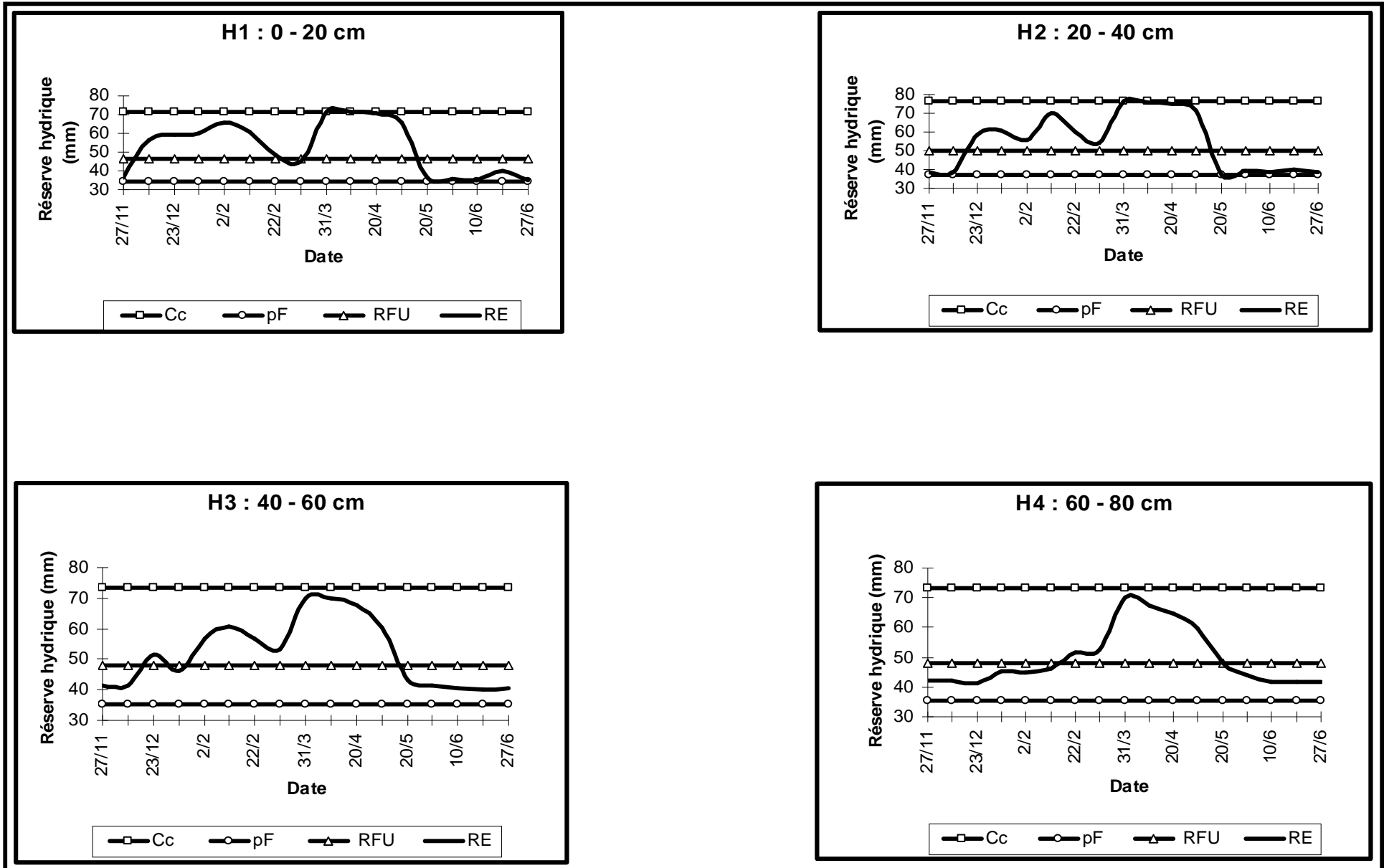


Figure 7. Variation de la réserve hydrique du sol selon les horizons.

**Tableau 9. Variation de la réserve utile et de la RFU selon les horizons (en mm).**

Horizon (cm)	Date																
	27/11	08/12	23/12	05/1	02/2	12/2	22/2	04/3	31/3	10/4	20/4	10/5	20/5	30/5	10/6	20/6	27/6
<b>0 - 20</b>																	
Humidité Pondérale	13,87	21,24	22,55	22,77	24,78	22,91	18,44	17,11	26,97	26,95	26,69	24,97	13,70	13,46	13,19	15,21	13,13
Réserve Utile	2,29	21,76	25,21	25,81	31,10	26,16	14,37	10,85	36,88	36,83	36,15	31,60	1,85	1,20	0,49	5,83	0,36
RFU	-10,03	9,44	12,89	13,49	18,78	13,84	2,05	-1,47	24,56	24,51	23,83	19,28	-10,47	-11,12	-11,83	-6,49	-11,96
<b>20 - 40</b>																	
Humidité Pondérale	13,61	13,62	20,70	21,30	19,67	24,64	21,05	19,06	26,98	26,53	26,41	25,23	13,12	13,78	13,66	14,05	13,64
Réserve Utile	1,73	1,77	21,87	23,57	18,96	33,06	22,86	17,22	39,71	38,44	38,07	34,75	0,35	2,21	1,88	2,99	1,81
RFU	-11,52	-11,48	8,61	10,32	5,70	19,81	9,61	3,96	26,46	25,18	24,82	21,49	-12,91	-11,04	-11,37	-10,27	-11,45
<b>40 - 60</b>																	
Humidité Pondérale	15,18	15,19	18,93	17,03	20,92	22,37	20,80	19,59	25,75	25,63	24,86	22,19	15,87	15,21	14,92	14,81	14,86
Réserve Utile	5,93	5,97	16,14	10,95	21,54	25,48	21,22	17,92	34,69	34,35	32,26	25,00	7,82	6,00	5,21	4,92	5,07
RFU	-6,76	-6,73	3,45	-1,74	8,85	12,79	8,53	5,23	22,00	21,66	19,56	12,30	-4,87	-6,69	-7,48	-7,77	-7,63
<b>60 - 80</b>																	
Humidité Pondérale	15,50	15,47	15,18	16,66	16,50	17,05	18,99	19,29	25,85	24,84	23,76	21,91	17,63	16,10	15,34	15,27	15,27
Réserve Utile	6,80	6,73	5,93	9,95	9,51	11,03	16,30	17,11	34,95	32,22	29,27	24,23	12,60	8,44	6,37	6,18	6,18
RFU	-5,89	-5,97	-6,76	-2,74	-3,18	-1,66	3,60	4,41	22,26	19,52	16,58	11,53	-0,09	-4,25	-6,33	-6,51	-6,51
<b>0 - 80</b>																	
Humidité Pondérale	14,54	16,69	20,73	20,37	21,79	23,31	20,10	18,59	26,57	26,37	25,99	24,13	14,23	14,15	13,92	14,69	13,88
Réserve Utile	16,76	36,22	69,15	70,29	81,11	95,74	74,75	63,09	146,23	141,83	135,76	115,57	22,62	17,86	13,95	19,92	13,42
RFU	-28,31	-8,77	24,95	22,07	33,33	46,44	20,18	7,72	73,02	71,35	68,22	53,07	-28,25	-28,85	-30,68	-24,53	-31,03

**Tableau 10. Précipitation, ETR et variation de la réserve utile (en mm).**

	27/11	8/12	23/12	5/1	2/2	12/2	22/2	4/3	31/3	10/4	20/4	10/5	20/5	30/5	10/6	20/6	27/6	Total
<b>ΔRU</b>		19,46	32,93	1,13	10,82	14,63	20,99	-	83,14	-4,40	-6,08	20,19	92,95	-4,76	-3,91	5,97	-6,51	-3,34
<b>Pluies</b>		<b>19,80</b>	<b>34,00</b>	<b>8,00</b>	<b>11,50</b>	<b>20,20</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>95,60</b>	<b>37,30</b>	<b>64,90</b>	<b>32,90</b>	<b>0,30</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>16,20</b>	<b>0,00</b>	343,70
<b>ETR</b>		<b>0,34</b>	<b>1,07</b>	<b>6,87</b>	<b>0,68</b>	<b>5,57</b>	<b>20,99</b>	<b>12,65</b>	<b>12,46</b>	<b>41,70</b>	<b>70,98</b>	<b>53,09</b>	<b>93,25</b>	<b>5,76</b>	<b>4,91</b>	<b>10,23</b>	<b>6,51</b>	347,04

S'il n'y a pas de stress, l'ETR sera égale à l'ETc. Mais si il y'a un stress, l'ETc est ajustée par l'introduction du coefficient de stress ; Ks, suivant la relation (3) :

$$ET_{caj} = ETo * Kc * Ks \quad (3)$$

L'évapotranspiration réelle cumulée durant tout le cycle cultural est de 347,04 mm pour une pluviométrie totale de 343,70 mm, soit un déficit sur la réserve hydrique de 3,34 mm (tableau 10). L'évolution de l'ETR, l'ETo et l'ETc est liée aux stades phénologiques et diffère tout au long du profil (0-80 cm) pour chacun des paramètres cités.

#### 1-1-4-1 Semis - Levée

Cette phase correspond à l'installation de la culture, durant laquelle le taux de la couverture végétale est très faible. Elle a duré en moyenne 36,25 jours, marquée par un léger déficit hydrique (figure 8).

L'évapotranspiration réelle (ETR) pour ce stade est relativement faible soit ; 6,16 mm, alors que l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETc) est de 12,25 mm, (tableau 11), soit une différence de 6,08 mm. L'ajustement de l'ETc par l'utilisation de la relation (3) donne un coefficient de stress Ks1 = 0,5, ceci signifie que l'évapotranspiration réelle était déficitaire de près de 50% de celle prédite pour cette phase.

**Tableau 11. Bilan hydrique selon les stades phénologiques.**

Paramètre	Semis - Levée	Levée - Montaison	Montaison - Epiaison	Epiaison - Maturité	Cycle total
Durée (j)	36	70	70	32	208
P (mm)	61,80	84,20	179,50	18,20	343,70
ETR (mm)	6,16	45,70	268,36	26,83	347,04
ETo (mm)	35,00	115,20	200,40	242,10	592,70
Kc	0,35	0,75	1,2	0,73	0,87
ETc (mm)	12,25	86,4	240,48	176,73	515,86
Ks	0,50	0,53	1,12	0,15	0,67

#### 1-1-4-2 Levée - Début montaison

Cette phase se caractérise par l'augmentation du taux de la couverture végétale du sol, un développement considérable du système racinaire et une sensible hausse des besoins en eau de la culture. Ce stade s'étale sur 70 jours. Il enregistre un cumul d'ETR et de d'ETc de 45,70 et 86,40 mm, respectivement. Le coefficient de stress pour ce Ks2 = 0,53. Ce stress est enregistré durant la période du 12 Février au 4 Mars, correspondant au stade plein tallage à début montaison. Ceci malgré que la réserve hydrique sur l'ensemble du profil (0 - 80) cm était au dessus de la RFU (figure 7).

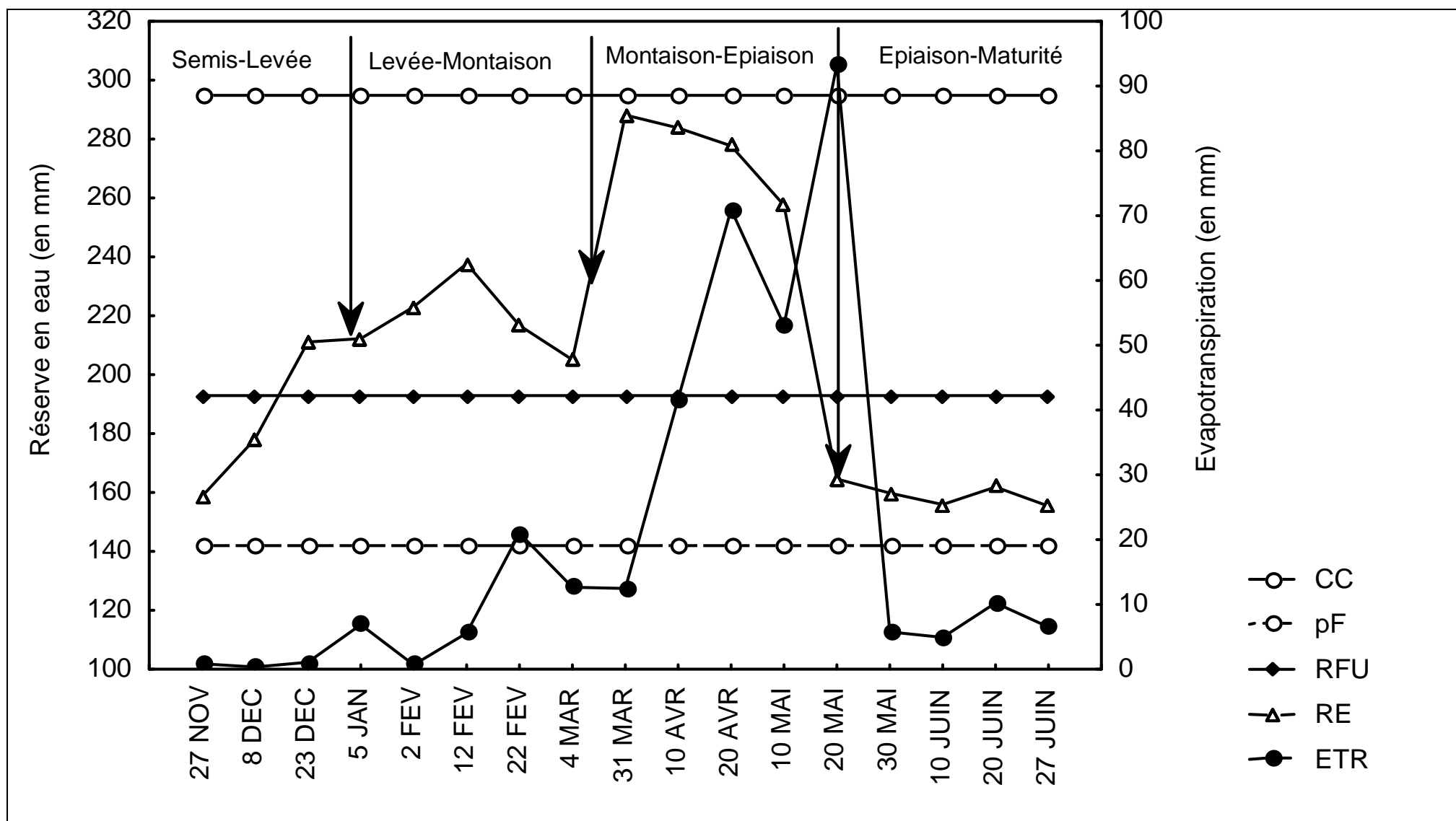


Figure 8. Evapotranspiration réelle et variation de la réserve hydrique sur le profil 0 – 80 cm.

On note un épuisement progressif de la réserve hydrique (figure 7) suivant les horizons H1, H2, puis H3. Soit une RFU respective de: -1,47 ; 3,96 et 5,23 mm durant la première semaine de Mars. Ceci serait probablement la conséquence du manque de précipitations, puisqu'il n'a été enregistré qu'un mm du 10 Février au 07 Mars, d'une part, et d'autre part par l'élévation brusque des températures maximales avoisinant en moyenne 20,41 °C durant la période du 28 Février au 06 Mars.

### 1-1-4-3 Début montaison - Epiaison

Cette phase a durée 70 jours. Il a été enregistré 179,50 mm de pluie, représentant l'équivalent de 52% de tout le cycle cultural. Elle totalise à elle seule, 77% de l'ETR du cycle.

Durant les 60 premiers jours, la RFU est positive avec 73,02 et 53,07 mm respectivement pour les dates : 31 Mars et le 10 Mai. Ceci laisse supposer que ces deux mois se sont déroulés dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique du sol. En revanche durant la deuxième décade de Mai, on enregistre seulement 0,3 mm de pluie pour une ETR estimée à 93,35 mm, représentant 1/3 de l'ETR de tout le stade. Ceci a pour conséquence, l'épuisement de la réserve hydrique du sol, puisqu'il a été noté, pour la même décade un  $\Delta$ RU égale à 92,25 mm et une chute de la RFU à -28,25 mm au 20 Mai.

L'ETc calculée pour ce stade est estimée à 240,48 mm pour une ETR de 268.36 mm, soit un  $Ks3 = 1,12$ . Mais, en calculant l'ETc du début de ce stade jusqu'au 10 Mai, on obtient une ETc = 176,28 mm, qui est très proche de l'ETR = 174,53 mm, avec un  $Ks3' = 0,99$ . Du 10 au 20 mai l'ETc est égale à 64,2 mm pour une ETR égale à 174,53 mm soit, un  $Ks3'' = 1,46$ . La différence entre l'ETc et l'ETR pour seulement cette décade, représente près de 46% ; ceci est probablement dû à une sous estimation du coefficient culturale (Kc) pour cette décade (tableau 12) où il a été observé une élévation significative des températures, qui passent d'une moyenne de près de 13 °C à près de 18 °C et des maxima atteignant près de 24 °C. Cette élévation dans les températures a peut être accentué l'évapotranspiration réelle de cette décade.

**Tableau 12. Bilan hydrique du stade; début montaison à l'épiaison.**

Paramètre	du 12 Mars au 10 Mai	du 10 Mai au 20 Mai	du 12 Mars au 21 Mai
<b>P (mm)</b>	179,2	0,3	179,5
<b>ETR (mm)</b>	174,53	93,83	268,36
<b>ETo (mm)</b>	146,9	53,5	200,4
<b>KC</b>	1,2	1,2	1,2
<b>ETc (mm)</b>	176,28	64,2	240,48
<b>Ks3</b>	0,99	1,46	1,12

#### **1-1-4-4 Epiaison - Maturité**

Ce dernier stade de développement, qui va de l'épiaison jusqu'à la maturation, a duré 32 jours. Il se caractérise par une forte ETc (176,73 mm) et un faible ETR (26,83 mm). En effet, la conjugaison de la faible pluviométrie (18,20 mm) et l'épuisement de la RFU (allant de -28,25 à -31,03 mm du 20 Mai jusqu'à la récolte) ont fait que ce stade a été caractérisé par un stress hydrique intense ( $K_s = 0,15$ ).

#### **Conclusion**

Le bilan hydrique indique trois phases de stress: la première a été observée avant la levée et ne semble pas avoir affecté la culture. En revanche, la seconde et la quatrième phase de stress ont eu probablement, un effet contraignant sur la culture, étant donné qu'elles ont coïncidées avec deux stades importants de la croissance et du développement de la végétation.



## 1-2 Simulation du bilan hydrique par le modèle *BUDGET*

### 1-2-1 Paramètres du bilan hydrique

A l'échelle du cycle cultural entier (tous géotypes confondus), les résultats de la simulation du bilan hydrique par le modèle *BUDGET* indiquent un grand écart (187 mm) entre l'évapotranspiration réelle (353 mm) et l'évapotranspiration potentielle (540 mm). Cet écart n'est pas dû à une différence de l'évaporation, puisque que l'évaporation réelle et potentielle sont similaires (78 mm), mais plutôt de l'écart , entre la transpiration réelle (275 mm) et la transpiration potentielle (462 mm), soit un coefficient de stress avoisinant 0,6 (tableau 13).

La transpiration potentielle, de Polonicum et de Oued Zenati, 473 484 mm, ainsi que leurs transpirations réelles, 276 et 277 mm respectivement, sont les plus élevées. Par contre, la plus faible transpiration potentielle est observée chez Mexicali, alors que Waha enregistre la plus faible transpiration réelle.

La simulation du bilan hydrique par le modèle *BUDGET* a mis en évidence un intervalle de sensibilité au stress allant de 0,57 à 0,62. Polonicum est le géotype qui a subi le plus de stress, alors que, Mexicali et Altar ont subit moins de stress.

**Tableau 13. Résultats de la simulation du bilan hydrique.**

Géotypes	Evaporation réelle (mm)	Evaporation potentielle (mm)	Transpiration réelle (mm)	Transpiration potentielle (mm)	ETR (mm)	ETc (mm)	K's
Oued Zenati	76,8	76,8	277,5	473,7	354,3	550,5	0,59
Polonicum	79,8	79,8	276,2	484,2	356,0	564,0	0,57
Altar	75,5	75,5	276,1	448,4	351,6	523,9	0,62
Sooty	79,3	79,3	275,6	470,2	354,9	549,5	0,59
Waha	79,2	79,2	272,5	449,4	351,7	528,6	0,61
Dukem	79,3	79,3	275,6	470,2	354,9	549,5	0,59
Mexicali	75,2	75,2	275,4	443,4	350,6	518,6	0,62
Kucuk	78,2	78,2	275,0	462,7	353,2	540,9	0,59
Moyenne	77,9	77,9	275,5	462,8	353,4	540,7	0,60

### 1-2-2 Phases de stress hydrique selon la phénologie

#### 1-2-2-1 Première phase

Elle coïncide avec le stade semis – levée. Elle s'étale sur les dix-sept jours qui précèdent le semis. Les résultats montrent que les paramètres du bilan (évaporation, transpiration, etc.) de cette phase ne sont pas assez différents les uns des autres entre les géotypes. La simulation montre que la transpiration potentielle journalière est en moyenne de 0,1 mm, et un cumul de 1,5 mm pour toute la phase.

Alors que, la transpiration réelle cumulée de cette phase est seulement de 0,3 mm. Ceci engendre un coefficient de stress,  $K's1$  égal à 0,2 indiquant un stress hydrique intense pour cette phase (tableau 14).

Toutefois, sur le terrain nous avons noté que la germination des graines a commencé réellement quelques jours après la première pluie du 07 Décembre, date coïncidant avec la fin du stress hydrique de cette phase. Ceci laisse penser que les génotypes ont échappé au stress hydrique de cette phase, surtout si l'on considère que la levée était relativement homogène, avec un taux moyen de 89 % de plants levés (tableau 18).

**Tableau 14. Le stress hydrique des deux premières phases.**

<b>Cumule (en mm)</b>	<b>Phase 1 Du 27/09 au 13/12</b>	<b>Phase 2 Du 09/01 au 10/03</b>
<b>Transpiration potentielle</b>	1,5	101
<b>T réelle</b>	0,3	39,2
<b>Ecart</b>	0,2	61,8
<b>K's</b>	0,20	0,39

### **1-2-2-2 Deuxième phase**

Elle s'étale de la fin levée jusqu'à la montaison. Comme dans la première phase, les paramètres hydriques du bilan sont similaires chez tous les génotypes. La transpiration potentielle et réelle augmente sensiblement durant cette phase, soit un cumul respectif de 101 et 39 mm. Le stress hydrique est moins intense  $K's2 = 0,39$  mais plus long soit 60 jours, correspondant à un déficit journalier moyen d'un millimètre (tableau 14).

La simulation montre que, le stress hydrique s'installe progressivement avec une intensité maximale vers la fin du mois de Janvier, où la transpiration est presque nulle. Ensuite, l'intensité du stress diminue graduellement jusqu'à la première décade de Février, pour s'intensifier de nouveau jusqu'à la fin de cette phase (figure 9).

### **1-2-2-3 Troisième phase**

En moyenne, elle s'étale sur quarante jours, allant de l'épiaison à la maturité complète. Elle est plus courte que la seconde phase mais avec un stress plus intense ( $K's3 = 0,26$ ). La transpiration potentielle moyenne de cette phase est de 169 mm, et la transpiration réelle est en moyenne de 44 mm (tableau 15 et figure 10).

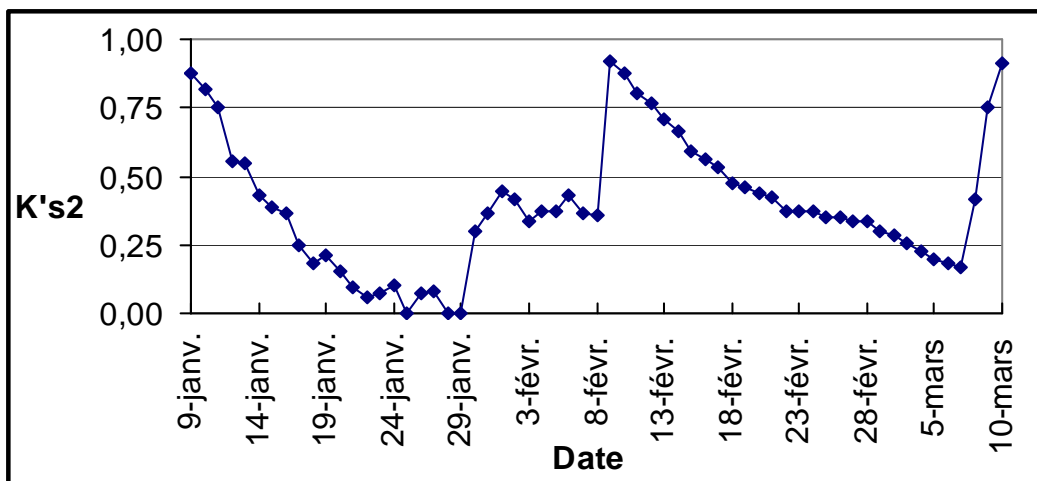


Figure 9. Stress hydrique durant la deuxième phase.

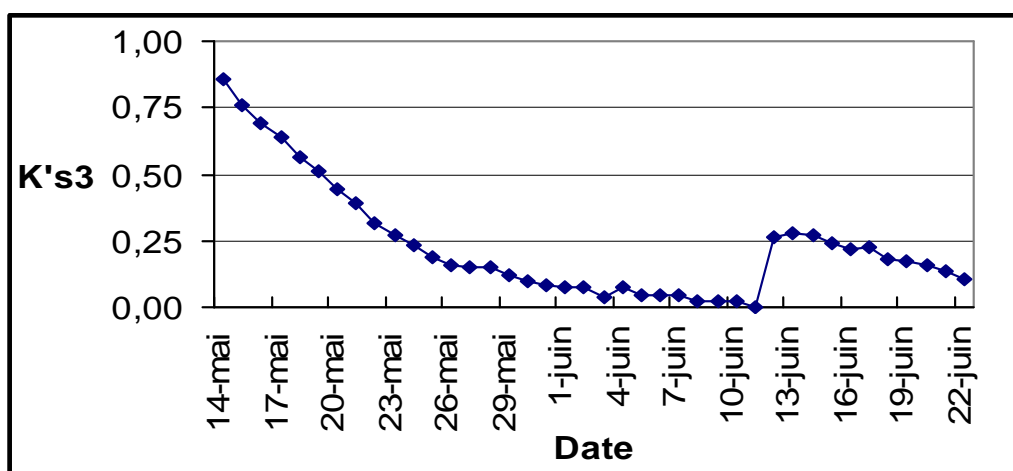


Figure 10. Stress hydrique durant la troisième phase.

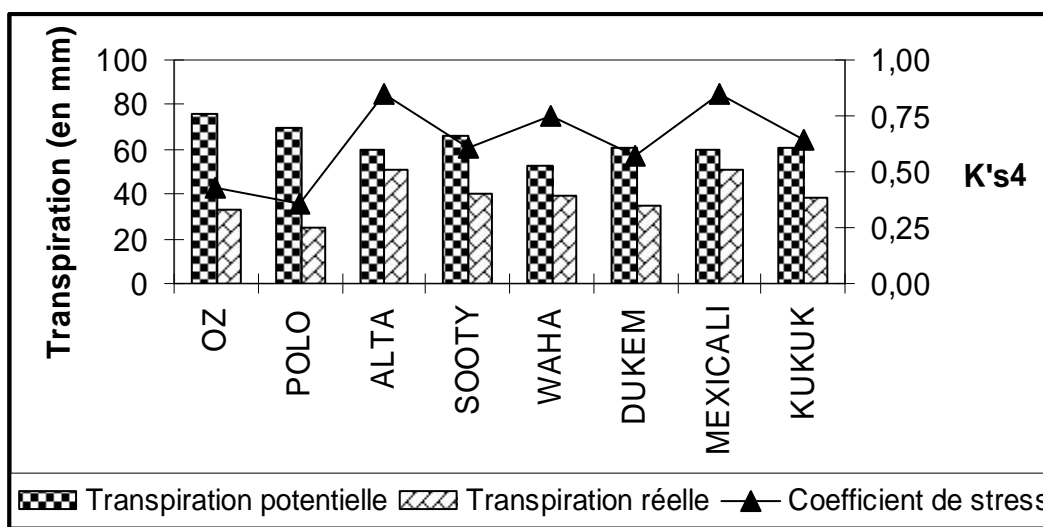


Figure 11. Stress hydrique durant le stade épiaison.

La transpiration réelle ne semble pas être différente entre les géotypes, puisque on observe un écart de seulement trois millimètres entre Polonicum qui enregistre la transpiration réelle la plus élevée (45,6 mm) et Mexicali qui enregistre la plus faible valeur (42,6 mm). En revanche, les géotypes ont des transpirations potentielles assez différentes. On note que, Polonicum est le géotype qui transpire le plus (190 mm), alors que Mexicali est le géotype qui transpire le moins (148 mm).

Les résultats montrent que les géotypes ont des coefficients de stress très rapprochés soit une moyenne de  $K's3$  égale à 0,26. Par ailleurs, on note que Polonicum et Oued Zenati enregistrent les écarts les plus élevés entre la transpiration potentielle et réelle, soit, 145 et 133 mm respectivement. Ils sont de ce fait les géotypes les plus stressés, alors que Mexicali et Altar ont subi légèrement moins de stress, ils enregistrent les plus faibles écarts entre transpiration potentielle et réelle, soit 105 et 109 mm respectivement.

**Tableau 15. Paramètres du bilan hydrique de la troisième phase.**

Géotypes	Transpiration Potentielle (mm)	Transpiration Réelle (mm)	T potentielle - T réelle	K's3
<b>Oued Zenati</b>	177,8	44,7	133,1	0,25
<b>Polonicum</b>	190,6	45,6	145,0	0,24
<b>Altar</b>	152,5	43,3	109,2	0,28
<b>Sooty</b>	176,8	45,2	131,6	0,26
<b>Waha</b>	161,9	44,1	117,8	0,27
<b>Dukem</b>	177	45,2	131,8	0,26
<b>Mexicali</b>	148	42,6	105,4	0,29
<b>Kucuk</b>	169,3	44,6	124,7	0,26
<b>Moyenne</b>	<b>169,2</b>	<b>44,4</b>	<b>124,8</b>	<b>0,26</b>

### **A - Stade épiaison**

Il représente la période allant du début jusqu'à la fin de l'épiaison. La simulation montre que Mexicali a la transpiration réelle la plus élevée (50 mm), il réduit ainsi l'écart de la transpiration potentielle à seulement 9 mm. Son coefficient de stress pour ce stade est de 0,85, et de ce fait, il est le géotype le moins stressé, alors que Waha et Altar se classent juste après Mexicali, ils enregistrent un  $Ks4 = 0,75$  (figure 11 et tableau 16).

Polonicum et Oued Zenati ont les transpirations potentielles et réelles les plus élevées, l'écart entre ces deux transpirations est le plus élevé (44 mm). Avec un  $k's4$  de 0,43 et 0,36, Oued Zenati et Polonicum sont respectivement les géotypes les plus stressés de tout le groupe.

Enfin les géotypes ; Kucuk, Sooty et Dukem forment un groupe intermédiaire : Ils enregistrent un écart moyen entre la transpiration potentielle et réelle de 24 mm et un  $K's4$  de 0,64 ; 0,61 et 0,57 respectivement.

**Tableau 16. Paramètres du bilan hydrique du stade épiaison.**

Géotypes	Transpiration Potentielle (mm)	Transpiration Réelle (mm)	Ecart	K's4
Oued Zenati	75,6	32,7	42,9	0,43
Polonicum	69,8	24,9	44,9	0,36
Altar	59,8	44,6	15,2	0,75
Sooty	66,5	40,5	26	0,61
Waha	52,7	39,7	13	0,75
Dukem	60,6	34,6	26	0,57
Mexicali	59,8	50,6	9,2	0,85
Kucuk	60,4	38,7	21,7	0,64
<b>Moyenne</b>	<b>63,2</b>	<b>38,3</b>	<b>24,9</b>	<b>0,62</b>

### B - Stade post épiaison

Ce stade est marqué par un déficit hydrique élevé. L'écart entre la transpiration potentielle et réelle est en moyenne de 100 mm. Le stress hydrique durant ce stade est plus intense comparé au stade épiaison, soit un  $K's5 = 0,15$ . Les géotypes ont des coefficients de stress assez rapprochés, variant entre 0,11 et 0,20. Le géotype Altar enregistre la plus forte transpiration potentielle et réelle ; 123,9 et 24,5 mm respectivement. Il est avec Mexicali, le géotype le moins stressé, leur coefficient de stress est égal à 0,20. Les résultats de la simulation indiquent que la transpiration potentielle et réelle de Oued Zenati et Polonicum sont les plus faibles. En enregistrant un coefficient de stress de 0,12 et 0,11, Oued Zenati et Polonicum sont les géotypes qui ont subi le plus de stress hydrique durant cette phase.

**Tableau 17. Paramètres du bilan hydrique du stade post épiaison.**

Géotypes	Transpiration Potentielle (mm)	Transpiration Réelle (mm)	Ecart	K's5
Oued Zenati	102	12,3	89,7	0,12
Polonicum	110,5	12,6	97,9	0,11
Altar	123,9	24,5	99,4	0,20
Sooty	122	16,8	105,2	0,14
Waha	127	22,1	104,9	0,17
Dukem	122	16,8	105,2	0,14
Mexicali	119,1	23,9	95,2	0,20
Kucuk	120,8	18,0	102,8	0,15
<b>Moyenne</b>	<b>118,4</b>	<b>18,4</b>	<b>100</b>	<b>0,15</b>

### 1-3 Elaboration du rendement

#### 1-3-1 Levée et tallage herbacé

La phase depuis le semis jusqu'à 50% de plants levés, a pris en moyenne 28,25 jours. Oued Zenati, Altar et Mexicali ont enregistré 27 jours seulement, alors que le reste des génotypes ont accompli cette phase en 29 jours. La levée complète a été observée en moyenne après 36,25 jours du semis. La densité moyenne est de 370 plants/m<sup>2</sup>, soit un taux moyen de levée de 88,89%. L'analyse de variance du nombre de plants/m<sup>2</sup> ne montre pas de différence entre les parcelles de l'essai. L'installation des génotypes peut être considérée comme homogène.

Les variétés locales Oued Zenati et Polonicum occupent mieux leur milieu et couvrent bien le sol en produisant plus de talles herbacées avec 3,45 et 3,43 talles/plant, comparé à Waha et Dukem qui enregistrent 3 et 3.10 talles/plant respectivement. En plein tallage herbacé, Kucuk et Oued Zenati produisent plus de matière sèche avec 0,38 et 0.33 g/plant comparés à Dukem et Waha avec 0.26 et 0,23 g/plant respectivement (tableau 19).

**Tableau 19. Levée, tallage herbacé et production de matière sèche**

Génotype	50 % levée (en jours)	100 % Levée (en jours)	Levée Plant/m <sup>2</sup>	Taux de levée (%)	Talles/plant	MS g/plant
Oued Zenati	27	35	390,81	93,80	3,35	0,33
Polonicum	29	37	387,58	93,03	3,43	0,29
Altar	27	35	374,16	89,81	3,11	0,28
Sooty	29	37	351,96	84,48	3,12	0,27
Waha	29	37	376,48	90,36	3,00	0,26
Dukem	29	37	350,58	84,15	3,10	0,23
Mexicali	27	35	363,99	87,37	3,25	0,31
Kucuk	29	37	367,23	88,14	3,13	0,38
<b>Moyenne</b>	<b>28,25</b>	<b>36,25</b>	<b>370,35</b>	<b>88,89</b>	<b>3,19</b>	<b>0,29</b>

#### 1-3-2 Epiaison

Le début et la fin de la phase de l'épiaison s'est déroulé en 20 jours (annexe 3). En cumulant le nombre de jours, entre la date qui correspond à 50% de plants levés et celle des 50% de plants épiés, on comptabilise une moyenne de 143,07 jours, et à 100% d'épiaison on trouve 148,13 jours, correspondant à un cumul de température respective de 1402,94 et 1480,44 °C

Mexicali est le plus précoce, il a atteint les 50% de plants épiés après 139,06 jours, pour un cumul de température de 1315,49 °C, tandis que Oued Zenati et Polonicum sont les plus tardifs, puisqu'ils n'atteignent leurs 50% de plants épiés qu'à 148,22 et 146,90 jours pour un cumul de température correspondant à 1480,25 et 1483 °C respectivement (tableau 20).

Tableau 20. Duré d'épiaison.

Génotype	Epiasion en jour		Epiasion en °C	
	50%	100%	50%	100%
Oued Zenati	148,22	153,00	1480,25	1568,75
Polonicum	146,90	152,00	1483,66	1581,45
Altar	140,47	146,00	1343,57	1418,40
Sooty	141,27	148,00	1382,80	1486,00
Waha	140,91	145,00	1377,44	1421,95
Dukem	144,46	148,00	1430,39	1486,00
Mexicali	139,06	146,00	1315,49	1418,40
Kucuk	143,25	147,00	1409,91	1462,60
Moyenne	143,07	148,13	1402,94	1480,44

Le suivi de la cinétique de l'épiaison (figure 12 et annexe 3) fait ressortir quatre groupes de variétés qui se classent deux à deux et se distinguent par leur vitesse d'épiaison. Par ordre décroissant il s'agit de Mexicali - Altar, Waha - Sooty, Kucuk - Dukem et Oued Zenati - Polonicum.

Waha rejoint le premier groupe en fin d'épiaison et enregistre seulement un jour de retard et forme de ce fait le groupe le plus précoce avec Mexicali et Altar. En revanche, Sooty se fait devancé d'un jour par Kucuk et est à égalité avec Dukem, formant à eux trois, un groupe dont la précocité semble intermédiaire. Enfin, Oued Zenati et Polonicum demeurent les génotypes les plus tardifs, ils enregistrent respectivement, 03 et 04 jours de retard sur le groupe intermédiaire et près d'une semaine sur le groupe le plus précoce.

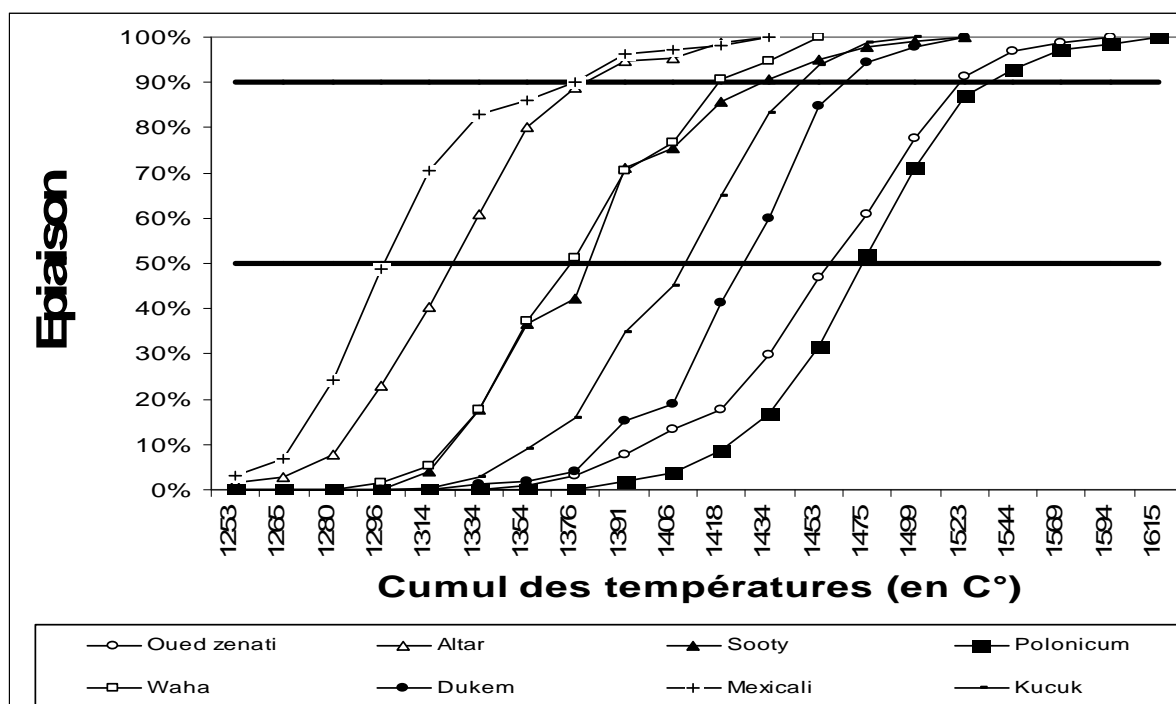


Figure 12. Cinétique de l'épiaison.

### 1-3-3 Tallage épi

Le nombre moyen d'épis par m<sup>2</sup> est de 492 épis/m<sup>2</sup>. L'analyse de variance fait ressortir une différence significative entre les génotypes. Oued Zenati produit moins d'épis (416,25 épis/m<sup>2</sup>) et de talles (1,07 épis/plant), tandis que, Dukem et Mexicali ont le meilleur peuplement épis avec; 559,16 et 556,39 épis/m<sup>2</sup>. En moyenne, leurs talles sont de 1,60 et 1,53 épis/plant, respectivement. La comparaison du nombre d'épis moyen produit par plant fait ressortir quatre groupes homogènes (tableau 21).

**Tableau 21. Nombre d'épis et tallage**

Génotype	Epis/m <sup>2</sup>	Epis/plant
Oued Zenati	416,3 a	1,07 a
Polonicum	432,4 ab	1,14 a
Altar	454,2 abc	1,22 ab
Sooty	492,1 abcd	1,40 bc
Waha	524,5 cd	1,41 cd
Dukem	559,2 d	1,60 d
Mexicali	556,4 d	1,53 cd
Kucuk	505,5 bcd	1,38 bc

**N b** : Les moyennes ayant en moins une lettre en commun constituent un groupe homogène.

### 1-3-4 Nombre de grains par m<sup>2</sup> et fertilité épi

L'analyse de la variance indique qu'il existe une différence significative entre les génotypes pour le nombre de grains par épis et le nombre de grains par mètre carré. Sooty Produit 18297 grains/m<sup>2</sup>, sa fertilité est de 37,18 grains/épis. Oued Zenati est le moins fertile de tous les génotypes avec 21,03 grains/épis, il produit aussi le moins de grains par unité de surface soit 8755 grain/m<sup>2</sup>.

### 1-3-5 Poids de mille grains

Les résultats montrent que le poids de mille grains varie entre 28,7 et 45,4 grammes. Altar enregistre le PMG le plus élevé, alors que celui de Sooty est le plus faible. L'analyse de la variance du poids de mille grains montre une différence significative entre les génotypes, qui sont répartis en cinq groupes homogènes.

### 1-3-6 Biomasse aérienne et hauteur des chaumes

L'analyse de variance de la biomasse aérienne ne montre pas de différence significative entre les variétés testées. Toutefois, Polonicum et Oued Zenati arrivent à produire les biomasses les plus élevées : 17,14 et 16,52 t/ha, respectivement alors qu'Altar avec 14,88 t/ha enregistre la plus faible biomasse.



Notre collection comporte des variétés précoces caractérisées par des tailles qui diffèrent significativement des variétés locales. A titre indicatif, Oued Zenati a une hauteur de 131.42 cm comparée à Dukem qui enregistre 88,08 cm (tableau 18).

### 1-3-7 Rendement grain

L'analyse de la variance des rendements en grains, montre une différence significative entre les génotypes. La comparaison de leurs moyennes fait ressortir trois niveaux de rendement : Oued Zenati enregistre le plus faible rendement avec 3.63 t/ha suivi par Polonicum 4.34 t/ha. Les génotypes introduits forment un groupe homogène à part et se distinguent des variétés locales par leurs rendements élevés en grains. A titre indicatif, le génotype Sooty a le rendement le plus faible dans son groupe, il enregistre 5,16 t/ha (tableau18).

### 1-3-8 Indice de récolte

L'indice de récolte (HI) est significativement différent d'une variété à une autre. On note qu'Altar a enregistré le plus fort indice, soit 37,68%, alors qu'Oued Zenati a le plus faible indice 22,06 %. La comparaison des moyennes de l'indice de récolte met en évidence quatre groupes homogènes (Tableau 18).

**Tableau 18. Valeurs moyennes du rendement et de ses composantes.**

Génotype	Rendement (t/ha)	Nombre de grains par épi	Nombre de grains par m <sup>2</sup>	PMG (g)	Biomasse (t/ha)	Hauteur (cm)	Hi (%)
Oued Zenati	3,6 a	21,0 a	8755 a	42,6 ab	16,5	131,4 a	22,06 a
Polonicum	4,3 b	25,7 b	11092 ab	40,5 b	17,1	125,0 b	25,41 b
Altar	5,6 c	27,5 b	12474 b	45,4 a	14,9	91,0 cd	37,68 d
Sooty	5,2 c	37,2 d	18297 c	28,7 d	15,0	90,9 cd	34,42 cd
Waha	5,8 c	33,1 cd	17377 c	34,4 ce	16,0	93,5 c	35,99 cd
Dukem	5,4 c	33,6 cd	18769 c	29,3 d	16,1	88,1 d	33,35 c
Mexicali	5,8 c	29,4 bc	16339 c	36,8 c	16,1	92,0 cd	36,06 cd
Kucuk	5,4 c	33,5 cd	16917 c	32,9 e	15,0	88,4 d	36,08 cd

**N b :** Les moyennes ayant en moins une lettre en commun constituent un groupe homogène.

## 1-4 Evaluation de quelques paramètres physiologiques

### 1-4-1 Teneur en chlorophylle

La teneur moyenne en chlorophylle varie entre un maximum de 0,658  $\mu\text{mol/g}$  noté le 24 mai, date qui correspond à la fin de l'épiaison et un minimum de 0,126  $\mu\text{mol/g}$ , le 12 juin qui correspond au remplissage des grains soit une diminution de 77 % (tableau 21).

**Tableau 21. La teneur en chlorophylle (en  $\mu\text{mol/g}$ ).**

	<b>TC1</b>	<b>TC2</b>	<b>TC3</b>	<b>TC4</b>
<b>Oued Zenati</b>	0,594	0,625	0,602	0,138
<b>Polonicum</b>	0,602	0,607	0,606	0,173
<b>Altar</b>	0,609	0,664	0,618	0,140
<b>Sooty</b>	0,763	0,747	0,792	0,100
<b>Waha</b>	0,658	0,661	0,644	0,048
<b>Dukem</b>	0,695	0,672	0,697	0,105
<b>Mexicali</b>	0,627	0,689	0,637	0,076
<b>Kucuk</b>	0,584	0,594	0,595	0,229
<b>Moyenne</b>	<b>0,642</b>	<b>0,658</b>	<b>0,649</b>	<b>0,126</b>

**N b :** TC1 = 17 Mai, TC2 = 24 Mai, TC3 = 29 Mai, TC4 = 12 Juin

Des corrélations positives ont été observées entre TC1 et TC2 ( $r=0,87$ ), TC1 et TC3 ( $r=0,99$ ) et TC2 et TC3 ( $r=0,88$ ) (tableau 22). Les trois premières mesures (TC1, TC2 et TC3) indiquent que Sooty possède les plus fortes teneurs en chlorophylle, atteignant un pic de 0,792  $\mu\text{mol/g}$  le 29 mai, tandis que les plus faibles teneurs sont notées chez Kucuk avec 0,584  $\mu\text{mol/g}$  enregistrée le 17 mai. On enregistre une baisse sensible de la teneur en chlorophylle chez tous les génotypes vers le 12 juin. Waha a la plus faible teneur avec 0,048  $\mu\text{mol/g}$  et enregistre la plus forte diminution soit près de 93%, contrairement à Kucuk qui enregistre en même temps la plus faible diminution soit 62%.

**Tableau 22. Matrice de corrélations des teneurs en chlorophylle**

	<b>TC1</b>	<b>TC2</b>	<b>TC3</b>
<b>TC2</b>	0,87*	1	
<b>TC3</b>	0,99*	0,88*	1
<b>TC4</b>	-0,56	-0,70	-0,46

**N b :** \* = corrélation significative ( $p < 0,05$ ),

Le classement des génotypes selon un ordre croissant de la teneur en chlorophylle, fait ressortir Sooty en première position et Kucuk en dernier pour les trois premières mesures, tandis que pour la dernière mesure, Waha occupe la dernière place et Kucuk se positionne en premier (tableau 23).

**Tableau 23. Classement des géotypes selon la teneur en chlorophylle.**

Géotypes	TC1	TC2	TC3	TC4
<b>Sooty</b>	1	1	1	6
<b>Dukem</b>	2	3	2	5
<b>Waha</b>	3	5	3	8
<b>Mexicali</b>	4	2	4	7
<b>Altar</b>	5	4	5	3
<b>Polonicum</b>	6	7	6	2
<b>Oued Zenati</b>	7	6	7	4
<b>Kucuk</b>	8	8	8	1

#### 1-4-2 Discrimination isotopique du carbone

L'analyse de la variance de la discrimination isotopique du carbone ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) montre une différence significative entre les géotypes. Le test de comparaison de moyenne indique qu'il existe six groupes homogènes de géotypes. D'une part, Oued Zenati (15,31‰) n'est pas différent de Polonicum (15,40‰) et d'autre part, Mexicali (16,79‰) ressemble à Kucuk (16,74‰). Enfin, on note que Dukem qui enregistre un  $\Delta^{13}\text{C} = 17.02\text{‰}$  est le plus discriminant de tous les géotypes (tableau 24).

**Tableau 24. Discrimination isotopique du carbone.**

Géotypes	$\Delta^{13}\text{C}$ (‰)
<b>Oued Zenati</b>	15,31 a
<b>Polonicum</b>	15,40 a
<b>Altar</b>	16,03 b
<b>Sooty</b>	15,91 c
<b>Waha</b>	16,54 d
<b>Dukem</b>	17,02 e
<b>Mexicali</b>	16,79 f
<b>Kucuk</b>	16,74 f

**N b** : Les moyennes ayant en moins une lettre en commun constituent un groupe homogène.

### 1-4-3 Efficacité d'utilisation de l'eau et de la transpiration

#### 1-4-3-1 Production de Biomasse

L'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) pour la production de biomasse est en moyenne de 4,48 gramme/mm/m<sup>2</sup> d'eau évapotranspirée. Les résultats indiquent que les géotypes locaux sont les plus performants. A titre indicatif, l'écart entre Polonicum, qui a la meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (4,81 grammes/mm/m<sup>2</sup>), et Sooty, qui a la plus faible EUE (4,23 grammes/mm/m<sup>2</sup>), est de 12%.

On note que, Polonicum et Oued Zenati enregistrent l'efficacité de transpiration pour la production de biomasse la plus élevée soit 6,21 et 5,95 gramme/mm/m<sup>2</sup>, tandis que Altar a la plus faible  $W = 5,39$  grammes/mm/m<sup>2</sup> d'eau transpirée soit un écart relatif de 15 et 10% respectivement (tableau 24).

#### 1-4-3-2 Rendement grain et EUE

Contrairement à la production de la biomasse, les géotypes introduits ont une efficacité d'utilisation de l'eau, pour le rendement en grains, plus élevée par rapport aux variétés locales. En effet, l'écart entre l'EUE de Mexicali (1,65 grammes/mm/m<sup>2</sup>) et celle de Oued Zenati (1,02 gramme/mm/m<sup>2</sup>) est d'environ 60%.

De même, les variétés introduites enregistrent la meilleure efficacité de transpiration pour le rendement grains. A titre indicatif, Mexicali produit 2,1 grammes/mm/m<sup>2</sup> d'eau transpirée. Il est supérieur d'environ 61% à Oued Zenati qui produit seulement 1,02 grammes de grains par unité d'eau transpirée et par unité de surface (tableau 25).

**Tableau 25. Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) et efficacité de la transpiration (W) en gramme/millimètre /m<sup>2</sup> d'eau**

Géotypes	EUE grains	EUE biomasse	W grains	W biomasse
Oued Zenati	1,02	4,66	1,31	5,95
Polonicum	1,22	4,81	1,57	6,21
Altar	1,59	4,23	2,02	5,39
Sooty	1,45	4,23	1,87	5,44
Waha	1,63	4,54	2,11	5,86
Dukem	1,51	4,54	1,94	5,85
Mexicali	1,65	4,59	2,10	5,84
Kucuk	1,51	4,24	1,95	5,45
Moyenne	<b>1,45</b>	<b>4,48</b>	<b>1,86</b>	<b>5,75</b>

## 2- Discussion des résultats

### 2-1 Relations entre le rendement et ses composantes

#### 2-1-1 Biomasse, hauteur et indice de récolte

Les efforts en amélioration durant le vingtième siècle ont fait augmenter le rendement du Blé dans divers environnements avec des gains allant de 5 à 71 kg/ha (Calderini & *al.*, 1999). Ces gains génétiques dans le rendement ont contribué à 50% du total des gains de la productivité du blé (Slafer & *al.*, 1994). La répartition de la biomasse dans les organes de reproduction a été le principal facteur responsable de ce gain (Cox & *al.*, 1988; Austin, 1989; Siddique & *al.*, 1989; Slafer & Andrade, 1989; Calderini & *al.*, 1995). Les variétés améliorées dans plusieurs régions du monde ont déjà été atteint leur potentiel optimal qui est d'environ 62 % (Austin & *al.*, 1980). La supériorité des variétés modernes de Blé dur en termes de rendement grain a été attribuée largement aux changements de l'indice de récolte, avec de faibles augmentations dans la production de biomasse et dans le nombre de grains/m<sup>2</sup> (Austin & *al.*, 1980, 1989; Siddique & *al.*, 1989; Slafer & Andrade, 1993; Brancourt-Hulmel & *al.*, 2003)

L'amélioration de la biomasse et la photosynthèse est un objectif majeur pour l'amélioration du potentiel de rendement du blé (Waddington & *al.* 1987). Dans cette étude, la production de biomasse aérienne à maturité ne semble pas différée d'un génotype à un autre, bien qu'il existe un léger avantage en faveur des génotypes locaux (Oued Zenati et Polonicum). Ces derniers se distinguent aussi par une hauteur plus élevée, qui est significativement et positivement corrélée ( $r = 0,73$ ) à la biomasse aérienne (annexe 4 et figure13).

Chez les céréales à petit grain, la biomasse où la surface foliaire aux stades précoces du développement a été aussi positivement corrélée au rendement grain sous des environnements de type Méditerranéen, en raison de la réduction des pertes d'eau du sol par évaporation d'une part et l'accroissement de l'efficacité d'utilisation de l'eau, d'autre part (La relation entre le rendement et l'eau disponible pour la culture à travers les précipitations et /ou l'irrigation), quand la croissance se déroule dans la saison froide (López-Castañeda & Richards, 1994; Hafid & *al.*, 1998).

En dépit d'une meilleure hauteur et d'une bonne production de biomasse, le rendement en grains de Oued Zenati et Polonicum demeure inférieur et différent significativement de celui des génotypes introduits. Puisque on note une relation négative entre la production de biomasse et le rendement ( $r = -0,56$ ) d'une part, et la hauteur et le rendement ( $r = -0,93$ ) d'autre part (Figure13). Des relations significatives entre le rendement et la biomasse à l'anthesis où durant la période de remplissage ont été rapportées chez le blé tendre (Turner, 1997), l'orge (Ramos & *al.*, 1985) et le blé dur (Boggini & *al.*, 1990; Villegas & *al.*, 2001; Ramdani, 2004).

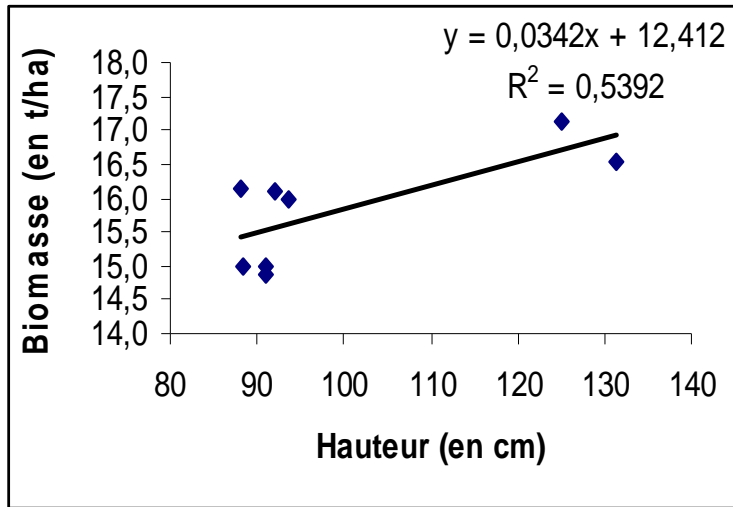


Figure 13. Relation entre la biomasse et la hauteur.

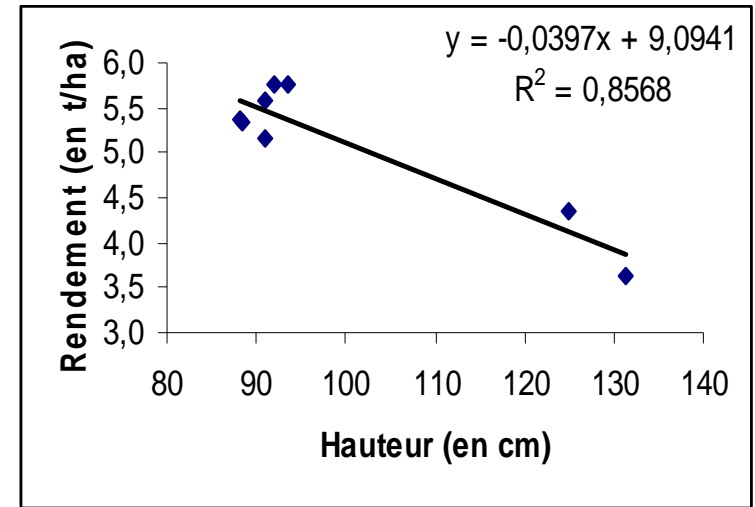


Figure 14. Relation entre le rendement et la hauteur.

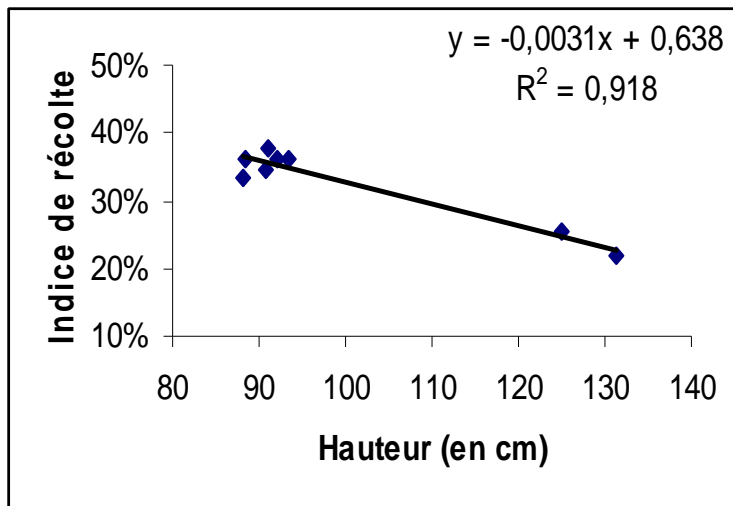


Figure 15. Relation entre la hauteur et l'indice de récolte.

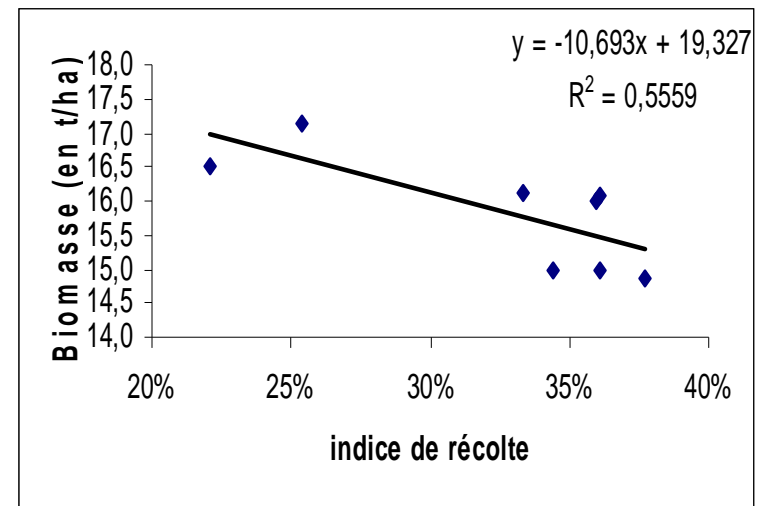


Figure 16. Relation entre l'indice de récolte et la biomasse.

L'indice de récolte est le rapport du rendement grain sur le rendement biologique. C'est une mesure de la capacité d'une plante à accumuler les assimilats dans les organes d'une manière économique (Donald, 1962, 1968).

La supériorité du rendement en grains des génotypes modernes, s'est traduite par une supériorité de l'indice de récolte (HI). Chez ce dernier groupe, HI varie entre un minimum de 33,3% pour Dukem et un maximum de 37,7% pour Altar, alors que pour Oued Zenati et Polonicum, il est respectivement de 22,1 et 25,4%. Enfin, il est à noter que le rendement est très fortement corrélé à l'indice de récolte ( $r = 0,97$ ). En revanche, une relation négative associe HI à la Hauteur ( $r = -0,96$ ) et à la biomasse aérienne (figure 15 et 16).

## 2-1-2 Nombre et poids du grain

Le rendement en grains intègre deux composantes majeures, le nombre de grains /m<sup>2</sup> et le poids moyen du grain (Slafer & Rawson, 1994). Dans notre essai, on constate que le rendement en grains est significativement et positivement corrélé au nombre de grains/m<sup>2</sup> ( $r = 0,77$ ) (figure 17). Par contre, la relation entre le rendement et le poids du grain est négative.

En effet les génotypes modernes présente un nombre de gains/m<sup>2</sup> élevé comparé aux génotypes locaux. Ceci peut s'expliquer d'une part, par la bonne fertilité des génotypes introduits qui est en moyenne de 32,36 grains/épis alors que pour les deux génotypes locaux, elle est de 23,34 grains/épis, et d'autre part, par le fait que les génotypes modernes produisent plus d'épis par unité de surface qui est en moyenne de 515 épis/m<sup>2</sup>, comparés à Oued Zenati et Polonicum, avec seulement 424 épis/m<sup>2</sup>. En effet, on observe une forte corrélation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et la fertilité ( $r=0,95$ ) et entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et nombre d'épis/m<sup>2</sup> ( $r=0,88$ ) (figure 18 et 19). Aussi, on note que le poids moyen des grains diminue considérablement avec l'augmentation du nombre de grains/m<sup>2</sup>, et le coefficient de corrélation entre ces deux variables est de  $r = -0,88$  (figure 20).

Ces résultats corroborent ceux de Shanahan & al. (1984) qui ont indiqué que la variation dans le rendement grain, au sein du même environnement où entre environnements différents, est plus liée au nombre de grains qu'avec le poids du grain, mais une réduction dans le poids des grains est plutôt plus probable qu'une baisse du nombre de grains en période post anthèse en conditions de sécheresse (Fischer & Maurer, 1978).

Le stress hydrique peut réduire le potentiel de toutes les composantes du rendement, particulièrement le nombre d'épis fertiles par unité de surface ainsi que le nombre de grains par épi (Giunta & al., 1993; Simane & al., 1993; Abayomi & Wright, 1999). Cependant le poids du grain est négativement influencé par les températures élevées et la sécheresse durant la maturation (Chmielewski & Kohn, 2000).

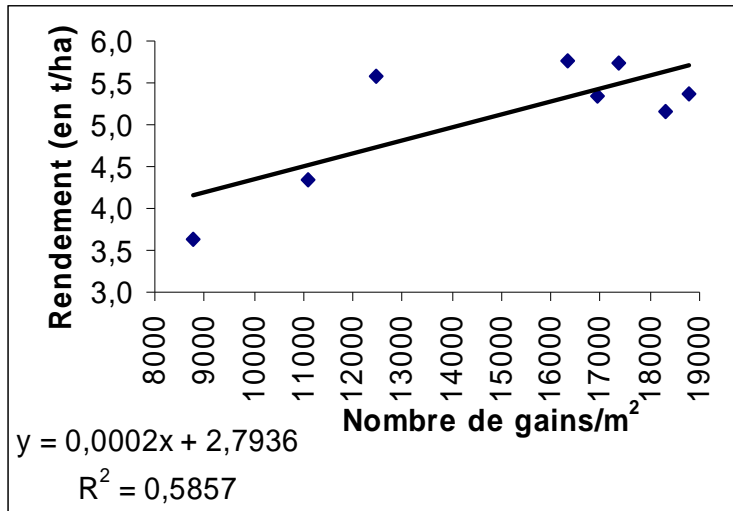


Figure 17. Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le rendement.

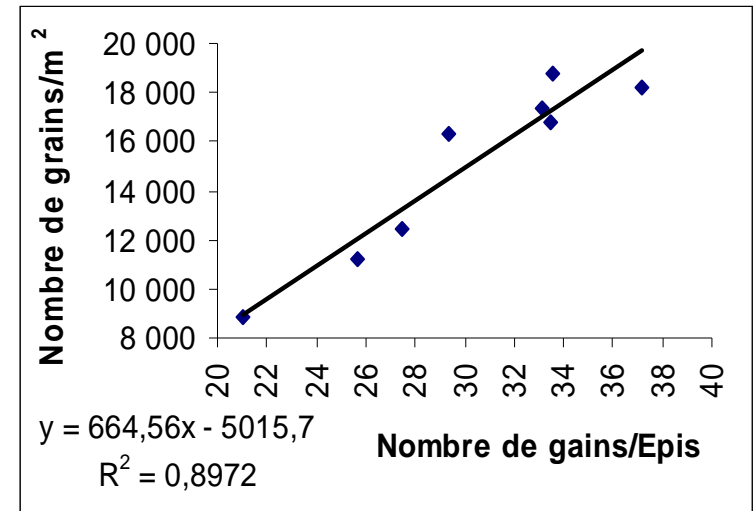


Figure 18. Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le nombre de grains/Epis.

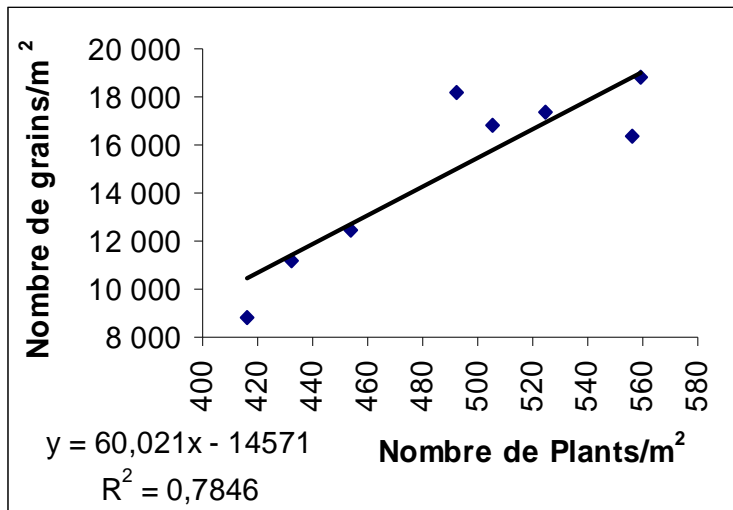


Figure 19. Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le nombre de Plant/m<sup>2</sup>.

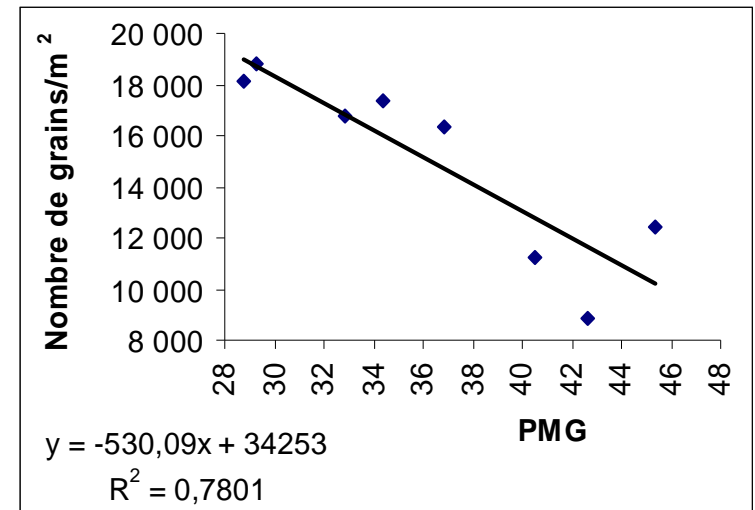


Figure 20. Relation entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le PMG.



Les résultats de la simulation du bilan hydrique montrent que le stress est fortement associé à la diminution du rendement. Le coefficient de corrélation entre le rendement et le coefficient de stress du cycle total de la culture (K's), est égal à 0,70.

Fischer (1985) a montré que la période critique pour l'élaboration du nombre de grains se situe 20 jours avant l'anthèse. D'autres études ont confirmé ce résultat et étendent cette période critique à 10 jours après l'anthèse (Savin & Slafer, 1991; Ortiz-Monasterio & *al.*, 1994; Abbate & *al.*, 1995, 1997).

La corrélation augmente significativement, entre le rendement et le stress hydrique de la phase épiaison maturation ( $r = 0,74$ ). Aussi, Les résultats indiquent que le stress hydrique enregistré durant le stade épiaison (en moyenne K's4 = 0,62), est plus associé au rendement ( $r = 0,88$ ), comparé au stress hydrique du stade post épiaison, qui était plus intense (K's5 = 0,15), mais moins corrélé au rendement (figure 21 et 22).

L'esquive permet à la plante de réduire ou d'annuler les effets de la contrainte hydrique par une bonne adéquation de son cycle de culture à la longueur de la saison des pluies. (Amigues &., al 2006).

La précocité constitue un important mécanisme d'esquive de la sécheresse de fin de cycle (Ben Naceur & *al.*, 1999). Le rendement de nombreuses variétés a été amélioré grâce au raccourcissement des longueurs de cycle chez pratiquement toutes les espèces cultivées annuelles (Turner & *al.*, 2001), sur les légumineuses (Subbarao, 1995), comme sur les céréales (Fukai & *al.*, 1999).

Les génotypes locaux (Oued Zenati et Polonicum) ont une épiaison plus tardive que celle des autres génotypes. Une forte corrélation existe entre la précocité à l'épiaison et le rendement. En effet, la date repère de 50% d'épiaison est négativement corrélée au rendement ( $r = -0,91$ ), et en prenant la date repère de 100% d'épiaison, on constate une forte augmentation de la corrélation entre la précocité à l'épiaison et le rendement (figure 23 et 24). Aussi, les résultats indiquent que les génotypes les plus précoces à l'épiaison sont les moins stressés. A titre d'exemple, les dates de 50% et 100% à l'épiaison sont très significativement corrélées au stress hydrique du stade épiaison, soit un coefficient de corrélation  $r = -0,94$  et  $-0,93$  respectivement.

Il semble donc, que les génotypes modernes qui sont plus précoces esquive le stress de fin du cycle. La précocité au stade épiaison est une composante importante d'esquive des stress de fin de cycle chez le blé dur. L'adoption de variétés à cycle relativement court est nécessaire dans les régions arides à semi-arides compte tenu de la distribution aléatoire des précipitations (Makhlouf & *al.*, 2006). Fisher & Maurer (1978) notent que chaque jour de gagner en précocité génère un gain en rendement de 30 à 85 kg/ha.

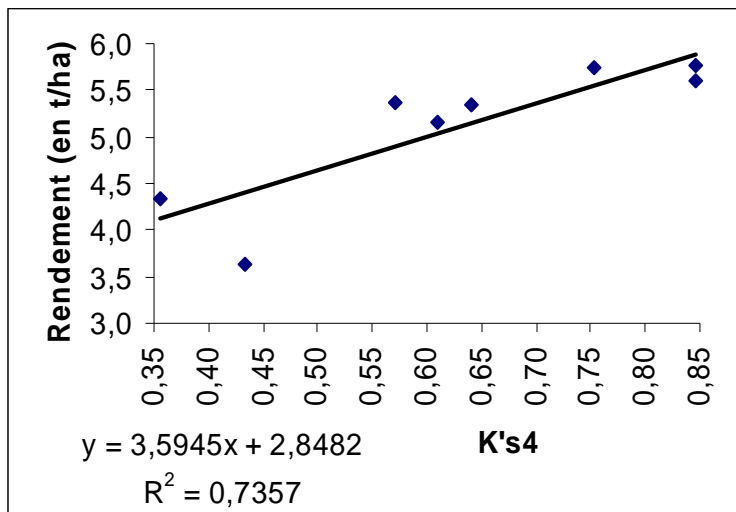


Figure 21. Relation entre le rendement et le stress hydrique du stade épiaison.

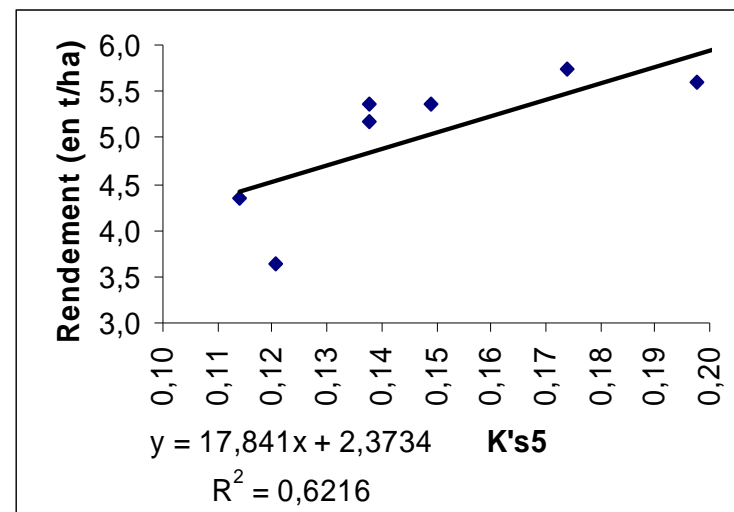


Figure 22 Relation entre le rendement et le stress hydrique du stade post épiaison.

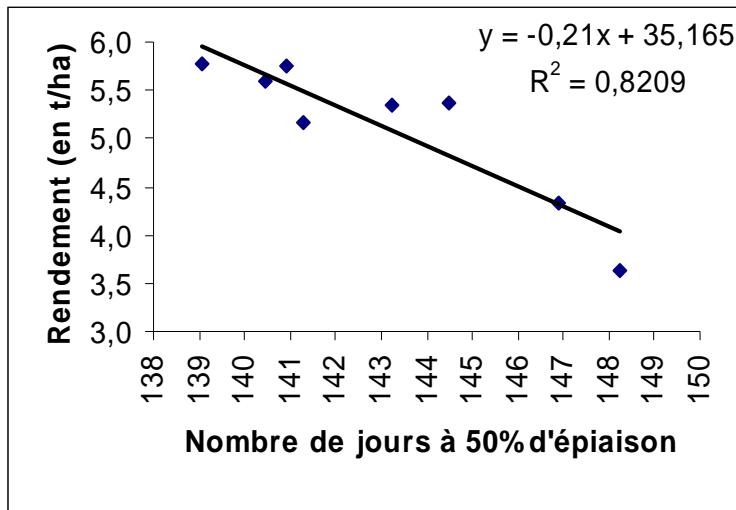


Figure 23. Relation entre le rendement et le stress au stade 50% de l'épiaison.

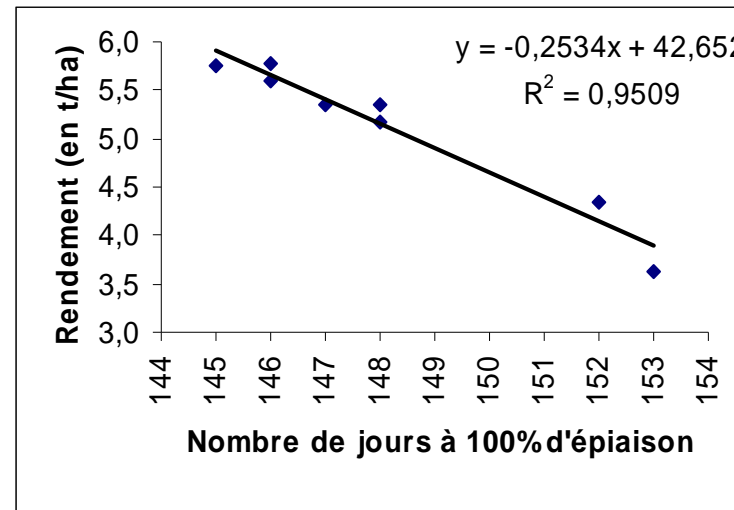


Figure 24 Relation entre le rendement et le stress hydrique au stade 100% de épiaison.

## 2-2 Efficacité d'utilisation de l'eau et de la transpiration en relation avec la discrimination isotopique du carbone

Durant le dernier siècle, les sélectionneurs de nombreuses espèces cultivées, ont exploité la variation génétique associée à la précocité, la réponse à la photopériode et au besoin en vernalisation, pour générer d'énormes variations dans la phénologie des cultures. Cette variation phénologique a permis aux cultures de croître successivement dans des régions et à des moments de l'année où la demande évaporative prévalente est faible, ce qui engendre une élévation de l'efficacité d'utilisation de l'eau et une augmentation des rendements des cultures.

Dans cet essai, les résultats indiquent que les génotypes les plus précoces surtout au stade épiaison (Waha; Mexicali et Altar) ont la meilleure efficacité d'utilisation de l'eau pour le rendement en grains (figure 25 et 26). L'efficacité d'utilisation de l'eau est positivement corrélée au nombre de grains/m<sup>2</sup>, d'épis/m<sup>2</sup> et de grains/épis, soit de coefficients de corrélations  $r = 0,75$ ;  $0,77$  et  $0,67$  respectivement. En revanche, l'EUE pour le rendement en grains est négativement et significativement corrélée à la hauteur ( $r = -0,92$ ) et elle est moins corrélée avec le PMG ( $r = -0,35$ ) (figure 27 et 28).

Les résultats montrent que les génotypes qui utilisent efficacement l'eau pour la production de grains sont ceux qui ont subi le moins de stress hydrique, que ce soit à l'échelle du cycle cultural entier ou au niveau des différents stades phénologiques. Ces génotypes se distinguent aussi, par une meilleure efficacité de la transpiration. A titre d'exemple, Mexicali qui a subi le moins de stress à tous les stades phénologiques et qui a la meilleure efficacité d'utilisation de l'eau pour produire des grains (EUE=1,65 gramme/mm d'eau), se distingue aussi, par l'efficacité de la transpiration la plus élevée ( $W=2,10$  gramme/mm).

La difficulté majeure à laquelle se heurte l'utilisation de la discrimination isotopique du carbone  $\Delta^{13}\text{C}$  dans la sélection pour l'amélioration agronomique de l'efficacité d'utilisation de l'eau est d'incohérences observées entre  $\Delta^{13}\text{C}$  et le rendement. Ces incohérences ont été bien répertoriées dans de nombreuses études impliquant les céréales, tel que le blé tendre (*Triticum aestivum* L.), le blé dur (*T. turgidum* D.) et l'orge (*Hordeum vulgare* L.).

L'efficacité d'utilisation de l'eau et l'efficacité de la transpiration pour le rendement en grains sont significativement et positivement corrélées à la discrimination isotopique du carbone,  $r = 0,80$  et  $0,81$  respectivement. En effet, Les génotypes locaux, Oued Zenati et Polonicum qui ont le plus faible rendement ; 3,63 et 4,34 t/ha respectivement, la plus faible efficacité d'utilisation de l'eau pour la production de grains ; ils produisent respectivement 1,02 et 1,22 gramme de grains pour chaque millimètre d'eau consommée, ainsi que la plus faible efficacité de la transpiration, sont les génotypes qui discriminent moins contre le carbone  $^{13}\text{C}$ , ils enregistrent un  $\Delta^{13}\text{C} = 15,88$  et  $15,92\%$  respectivement (figure 29).

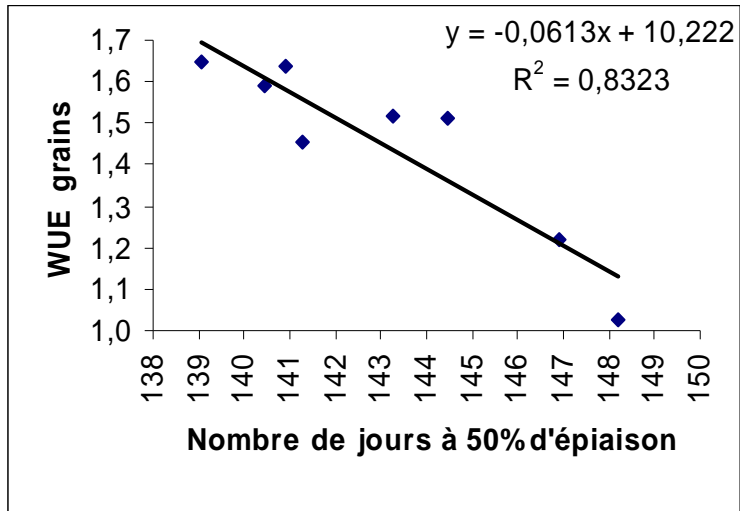


Figure 25. Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et nombre de jour à 50% de l'épiaison.

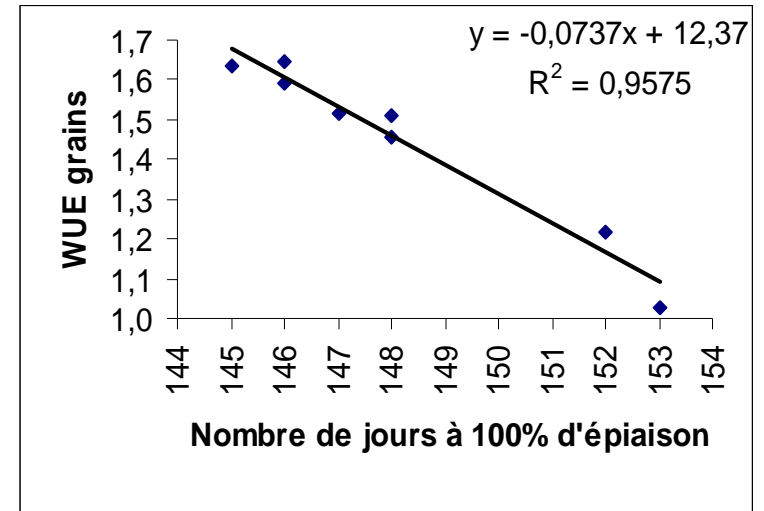


Figure 26 Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et nombre de jour à 100% de l'épiaison.

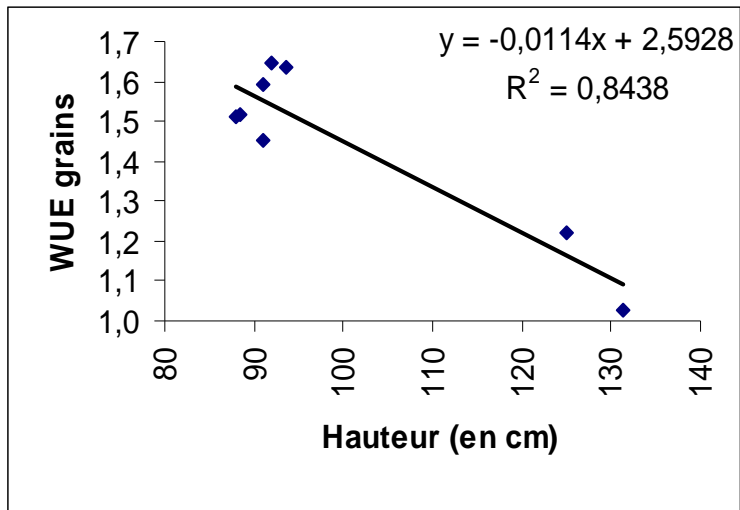


Figure 27. Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et la hauteur.

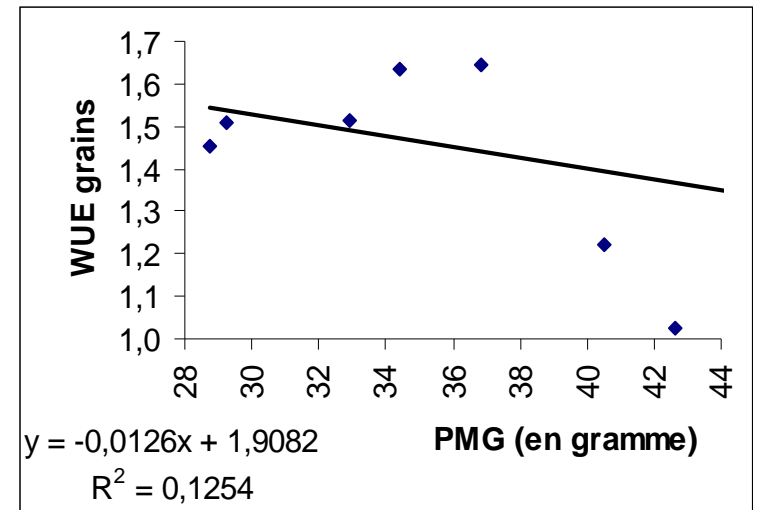


Figure 28 Relation entre le rendement et le stress hydrique du stade épiaison.

Les composantes du rendement telle que le nombre d'épis/m<sup>2</sup>, le nombre de grains/épis et le nombre de grains/ m<sup>2</sup> sont aussi associés significativement et positivement à la discrimination isotopique du carbone. Par contre, on observe une forte corrélation négative entre la hauteur et la discrimination isotopique du carbone ( $r = -0,83$ ). Alors que, les géotypes modernes qui transpirent et utilisent efficacement l'eau pour le rendement, sont les plus discriminants contre le <sup>13</sup>C. Une forte corrélation positive est observée entre la discrimination isotopique du carbone d'une part et le rendement en grains et l'indice de récolte, d'autre part (figure 30 et 31).

Ces résultats sont en accord avec d'autres études réalisées sur des collections de géotypes de céréales cultivées, en Australie sous régime pluvial ou irrigué (Condon & *al.*, 1987, 1993, 2002; Condon & Richards, 1993; Condon & Hall, 1997), en région méditerranéenne (Voltas & *al.*, 1999; Merah & *al.*, 2001; Royo & *al.*, 2002; Araus & *al.*, 2003) et même dans d'autres régions (Sayre & *al.*, 1995; Fischer & *al.*, 1998). Les relations entre le rendement en grains et  $\Delta^{13}C$  ont été rarement négatives, si ce n'est souvent des relations positives ou neutres. Beaucoup de ces études associant  $\Delta^{13}C$  et la productivité chez les céréales ont utilisé des groupes de géotypes qui diffèrent entre eux non seulement par  $\Delta^{13}C$ , mais aussi par la date de floraison et la hauteur, deux caractéristiques qui peuvent influencer considérablement les productions, indépendamment de  $\Delta^{13}C$ .

Chez les géotypes de céréale, le caractère dominant de la croissance à travers un faible  $\Delta^{13}C$ , a des implications importantes pour l'efficacité d'utilisation de l'eau. Les plus importantes relations entre  $\Delta^{13}C$  et le rendement ont été observées dans des milieux ou des saisons durant lesquelles les irrigations complémentaires ou les précipitations régulières maintiennent un statut hydrique élevé du sol. Dans ces environnements, la croissance rapide des géotypes à forte discrimination isotopique du carbone se traduit souvent et directement par une production en biomasse et en grains plus importante (Condon & *al.*, 1987, 2002; Sayre & *al.*, 1995; Fischer & *al.*, 1998).

A maturité, les géotypes à faible  $\Delta^{13}C$  produisent moins de grains et de biomasse en situation de stress hydrique (Condon & *al.*, 2002).

Le rendement en grain s'est associé positivement à la discrimination isotopique. En revanche, la production de biomasse aérienne est corrélée négativement à la discrimination isotopique (figure 32). En effet, dans des environnements soumis à des contraintes hydriques, les géotypes à fort  $\Delta^{13}C$  produisent plus de biomasse à l'anthesis en puisant les réserves hydriques du sol d'une manière intensive (Condon & *al.*, 1993). Les géotypes à fort  $\Delta^{13}C$  rendent mieux grâce à la production d'un grand nombre de grains associée à une plus grande production de biomasse à l'anthesis et à une meilleure translocation des grains.

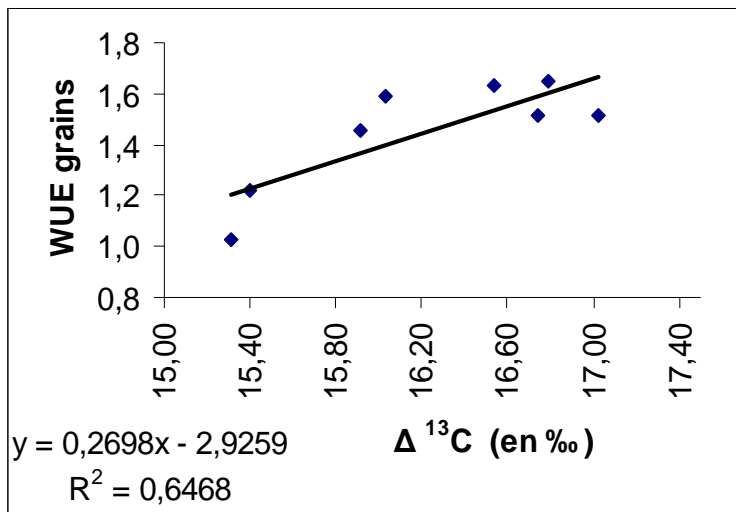


Figure 29. Relation entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

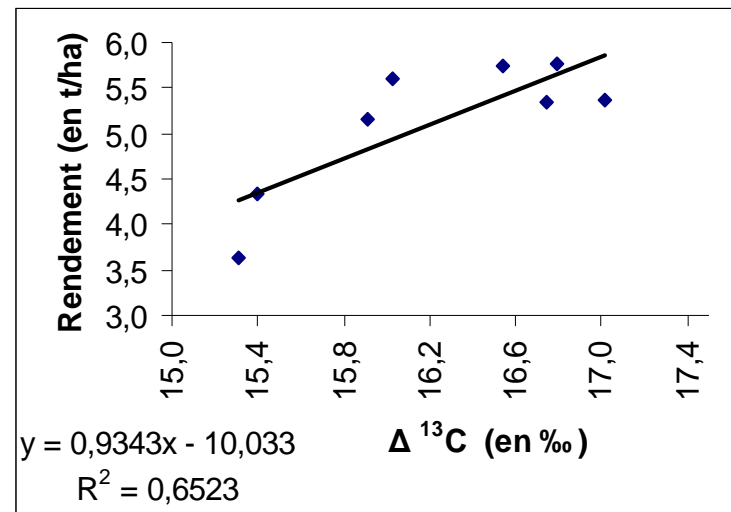


Figure 30. Relation entre rendement en grains et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

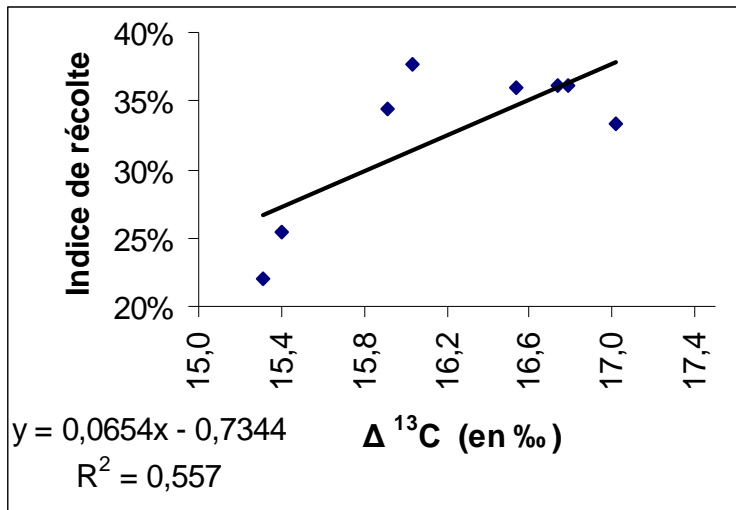


Figure 31. Relation entre l'indice de récolte et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

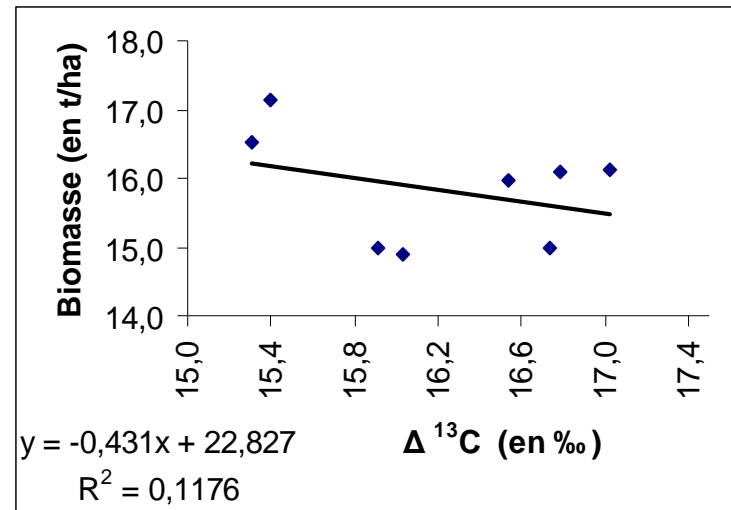


Figure 32. Relation entre la biomasse et la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$ .

## Conclusion

La production des céréales dépend des conditions climatiques, des caractéristiques morphophysiologiques, phénologiques et agronomiques du génotype et en très grande partie des interactions génotype environnement. Les différents facteurs climatiques et nutritionnels du milieu agissent d'une part sur le développement et d'autre part sur le potentiel de croissance. Ils conditionnent l'intensité de la compétition et déterminent le nombre, la taille et le devenir des organes (Triboï & Ntonga, 1993).

Dans cet essai, les résultats du bilan hydrique mettent en évidence trois phases de stress hydrique. La première relativement courte observée dès le semis et ne semble pas affecter la végétation. La seconde phase du stress qui est plus longue (60 jours), va de la levée jusqu'au début montaison. La simulation du bilan hydrique par le modèle *BUDGET* pour cette phase, montre que le stress hydrique est identique pour tous les génotypes. Ainsi, le cumul de la transpiration potentielle et réelle est le même à ce stade. En revanche, la troisième phase de stress qui coïncide avec un stade phénologique très important (l'épiaison) s'est répercutée d'une façon différente sur les génotypes. Les résultats montrent que les génotypes qui ont subi moins de stress hydrique à l'épiaison sont plus précoces (Mexicali, Altar, Waha...etc.). Contrairement aux génotypes tardifs (Oued zenati et Polonicum) qui ont subi plus de stress hydrique. Les génotypes précoces ont réalisé les meilleurs rendements en grains et ils ont une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau pour la production de grain.

On note que le nombre de grains produit par unité de surface est la composante la plus corrélée au rendement. Aussi, Les résultats indiquent qu'une meilleure production de biomasse aérienne n'est pas forcément synonyme d'un meilleur rendement. Par contre, l'indice de récolte qui est très bien corrélé au rendement ( $r= 0,97$ ) semble être un bon critère pour la sélection des génotypes à haut rendement en grains.

De nombreuses études ont montré l'existence d'une variation génotypique pour  $\Delta^{13}\text{C}$  chez le blé pendant l'épiaison et la floraison. La plupart de ces expériences ont été effectuées dans les régions méditerranéennes ou dans des régions similaires en culture pluviale. La plupart du temps, la relation entre le rendement et la discrimination isotopique du carbone s'est montrée plutôt positive (Condon & *al.*, 1987 ; Condon & Hall., 1997 ; Morgan & *al.*, 1993 ; Merah & *al.*, 2001 ; Sayre & *al.*, 1995).

Globalement, les résultats indiquent que la discrimination isotopique du carbone  $^{13}\text{C}$  est positivement corrélée à la précocité, à l'efficacité d'utilisation de l'eau et au rendement. En effet les génotypes précoces ayant des rendements élevés en raison d'une meilleure utilisation de l'eau ont des valeurs de  $\Delta^{13}\text{C}$  plus élevées. En revanche, la hauteur et la production de biomasse sont négativement corrélées à la discrimination isotopique du carbone.

De nombreux chercheurs proposent la recherche de critères intégrateurs pouvant associer plusieurs caractéristiques de tolérance, telles que la mesure des mécanismes d'ouverture stomatiques, la mesure de la température du couvert végétal et la discrimination isotopique du carbone. (Araus & *al.*, 2003).

Ce travail tente de décrire l'état hydrique d'un type de sol par simulation en utilisant le modèle Budget pour mieux comprendre le comportement des génotypes face aux différents scénarios climatiques. Ces premiers résultats obtenus sont encourageants ; Ils peuvent servir comme base pour d'autres travaux afin d'apporter quelques corrections dans le calcul de l'évapotranspiration et réduire ainsi l'écart observé entre les paramètres estimés et réels.



## Références bibliographiques

- \*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.
- \*Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 124, 351–360.
- \*Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P. Bindraban, P.S., 1997. Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Res.* 54, 245–257.
- \*Acevedo, E., Ceccarelli, S. 1987. Role of physiologist-breeder in a breeding program for drought resistance conditions. in : *Drought Resistance in Cereals*, Baker, F.W.G. (éd.). CAB, Wallingford, pp. 117-139.
- \*Acock, B., Acock M.C. 1993. Modelling approaches for predicting crop ecosystem responses to climate change. In: *International Crop Science I. D.R. Buxton & al. (eds.)*. Crop Science Society of America, Madison, WI. pp. 299-306.
- \*Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation & Drainage Paper No. 56. Rome, Italy. 300 p.
- \*Amigues, J.P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., Thomas, A. 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (Fr).
- \*Anonyme, 2004. [http://hypergeo.free.fr/article.php3?id\\_article=29](http://hypergeo.free.fr/article.php3?id_article=29).
- \*Araus, J.L., Tapia L., Alegre L. 1989. The effect of changing sowing date on leaf structure and gas exchange characteristics of wheat flag leaves grown under mediterranean climate condition. *Journal of experimental Botany*, vol. 40, n° 215, 639-646.
- \*Araus, J.L., Villegas, D., Aparicio, N., Garcia del Moral, .L.F., El Hani, S., Rharrabti, Y., Ferrio, J.P., Royo, C. 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Crop Science* 43, 170–180.
- \*Arles, Mas.Gand. 1986. Blé dur, ABADD, ITCF. In Madi S., Louail, K. 1995. *Comportement de trois variétés locales et améliorées de blé dur (Triticum durum Desf.) vis à vis d'une irrigation d'appoint dans les hautes plaines sétifiennes. Mémoire d'ingénieur d'Etat UFA Sétif.*
- \*Arnon, 1949 in Alpert, P. 1984. *Analysis of Chlorophyll Content in Mosses through Extraction in DMSO. The Bryologist*, Vol. 87, No. 4, pp. 363-365.
- \*Assem, N., El Hafid, L, Haloui, B, El Atmani, K. 2006. Effets du stress hydrique appliqué au stade trois feuilles sur le rendement en grains de dix variétés de blé cultivées au Maroc oriental. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 17, Numéro 4, 499-505.
- \*Austin, R.B. 1989. Genetic variation in photosynthesis. *J. Agric. Sci.* 112, 287–294.
- \*Austin, R.B., Bingham, J., Blackwell, R.D., Evans, L.T., Ford, R.A., Morgan, C.L., Taylor, M. 1980. Genetic improvement in winter wheat yield since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci.* 94, 675–689.

- \*Austin, R.B., Ford, M.A., Morgan, C.L., 1989. Genetic improvement in the yield of winter wheat: A further evaluation. *J. Agric. Sci.* 112, 295–301.
- \*Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.H. 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: Genotypic and environmental effects. *Crop Science* 45 45, 1141, 1141-1150.
- \*Belhssen, E., This, D., Monneveux, P. 1995. L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. *Cahiers Agricultures*. 4 / 251 – 61.
- \*Ben Naceur, M., Gharbi, M.S., Paul, R. 1999. L'amélioration variétale et les autres actions contribuant à la sécurité alimentaire en Tunisie en matière de céréales. *Sécheresse* ; 10 : 27-33.
- \*Benlaribi, M. 1990. Adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Etude des caractères morphologiques et physiologiques. Thèse Doctorat d'Etat, Univ . Constantine.
- \*Bessad, H. 2006. Le programme de production céréalière. *Agriculture et développement. Revue de vulgarisation et de communication, Inst. Nat. Vulg. Agric. Alger* ; (2) : 20-25.
- \*Blady, C.1993. Effets du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en méditerranée occidentale. Relationships with osmotic potential, carbon isotope ratio and grain yield. *In tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale. (Monneveux, P & Benselam, M. eds.). Colloque 55 : 83-99 INRA ed , Paris.*
- \*Blum A. 1988. Plant breeding for stress environments. Boca Raton : CRC Press eds ; 223p
- \*Blum, A., Ramaiah, S, Kanemasu, E.T, Paulsen, G.M. 1990. Recovery of wheat from drought stress at the tillering developmental stage. *Field Crop Res* ; 24 : 67-85.
- \*Boggini, G., Palumbo, M., Calcagno, L. 1990. Characterization and utilization of Sicilian Landraces of durum wheat in breeding programmes. *In: Srivastava, J.P., Damania, A.B. (Eds.), Wheat Genetic Resources: Meeting Diverse Needs. John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 223–234.*
- \*Bonjean, A., Picard, E. 1991. Les céréales à paille. Origine-histoire-économie-sélection. Ligugé ; Poitiers : Aubin imprimeur.
- \*Bos, M.G. 1985. Summary of ICID definitions on irrigation efficiencies. *In : Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11-14 septembre 1984. Paris : Institut national de la recherche agronomique (Inra), 889-99.*
- \*Bouzerzour, H. 1998. Sélection pour le rendement, la précocité à l'épiaison et la biomasse aérienne chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semis aride. Thèses Doctorat d'Etat, Univ constantine.
- \*Bouzerzour, H., Oudina, M. 1989. Association de certains caractères morphologiques au rendement grain chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) en conditions semi-arides. *Ann. Inst. Nat. Agron. El Harrach*, 13(1) : 157-167.
- \*Boyer, J.S. Plant 1982 productivity and environment. *Science* 218: 473-216.

- \*Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., B´erard, P., Le Buanec, V., Trottet, M. 2003. Genetic Improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci.* 43, 37–45.
- \*Brisson, N., Delecoller, R. 1992. Développement et modèles de simulation des cultures. *Agronomie*, 12(3) : 253-263.
- \*Brugnoli, E., Farquhar, G.D. 2000. Photosynthetic fractionation of carbon isotopes. *In: Leegood RC, Sharkey TD, von Caemmerer S, eds. Photosynthesis: physiology and metabolism. Advances in Photosynthesis, Vol. 9. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 399–434.*
- \*Calderini, D.F., Dreccer, M.F., Slafer, G.A. 1995. Genetic improvement in wheat bread and associated traits. Are-examination of previous results and the latest trends. *Plant Breed.* 114, 108–112.
- \*Calderini, D.F., Reynolds, M.P., Slafer, G.A. 1999. Genetic gains in wheat yield and associated physiological changes during the twentieth century. *In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Eds.), Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination. The Haworth Press Inc., New York, pp. 351–377.*
- \*Chang, J.H. 1965. Étude de l'évapotranspiration et du bilan hydrique. *Erdkunde Dtsch* ; 19 : 41-150.
- \*Chen, F., Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I. Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129: 569-585.
- \*Chmielewski, F., Kohn, W. 2000. Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agric. Forest Meteorol.* 102, 253–261.
- \*Choisnel E. 1992. L'analyse spatiale du bilan hydrique en agroclimatologie. *La Météorologie* ; 8e série : 31-42.
- \*CIC, 2000. Rapport annuel du Conseil International des Céréales "CIC" pour l'année 2000.
- \*Clark, R.B. 1969. Organic acids from leaves of several crop plants by gas chromatography. *Crop Sci.* 9 : 341 - 3.
- \*Clarke, J.M., Richards, R.A. 1988. The effect of glaucousness, epicuticular wax, leaf age, plant height and growth environment on water loss rates of excised wheat leaves. *Can; J.Plant Sci.* 68: 957-982.
- \*Clarke, J.M., Romagosa, I., Jana S., Srivastava, J.P., McCaig, T.N. 1989. Relation of excised leaf water loss rate and yield of durum wheat in diverse environments. *Can; J.Plant Sci.* 69 : 1057-1081.
- \*Cochard, H., Ridolfi, M., Dreyer, E. 1996. Responses to water stress in an ABA-unresponsive hybrid poplar (*Populus koreana* ´ *trichocarpa* cv. Peace). II. Hydraulic properties and xylem embolism. *New Phytol.* 134 : 455-461.
- \*Condon, A.G., Farquhar, G.D., Richards, R.A. 1990. Genotypic variation in carbon isotope discrimination and transpiration efficiency in wheat. Leaf gas exchange and whole plant studies. *Australian Journal of Plant Physiology* 17, 9–22.

- \*Condon, A.G., Hall, A.E. 1997. Adaptation to diverse environments: genotypic variation in water-use efficiency within crop species. In: Jackson LE, ed. *Agricultural ecology*. San Diego, CA: Academic Press, 79–116.
- \*Condon, A.G, Richards, R.A. 1992. Broad sense heritability and genotype x environment interaction for carbon isotope discrimination in field-grown wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 43, 921–934.[
- \*Condon, A.G., Richards, R.A. 1993. Exploiting genetic variation in transpiration efficiency in wheat: an agronomic view. In: *Ehleringer JR, Hall AE, Farquhar GD, eds. Stable isotopes and plant carbon-water relations*. San Diego, CA: Academic Press, 435–450.
- \*Condon, A.G, Richards, R.A, Farquhar, G.D. 1987. Carbon isotope discrimination is positively correlated with grain yield and dry matter production in field-grown wheat. *Crop Science* 27, 96–1001.
- \*Condon, A.G., Richards, R.A., Farquhar, G.D. 1993. Relationships between carbon isotope discrimination, water-use efficiency and transpiration efficiency for dryland wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 4, 1693–1711.
- \*Condon, A.G, Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Farquhar, GD. 2002. Improving intrinsic water-use efficiency and crop yield. *Crop Science* 42, 122–131.
- \*Condon, A.G., Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Farquhar G.D. 2004. Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 55, No. 407, *Water-Saving Agriculture Special Issue*, pp. 2447–2460.
- \*Cooper, P.J.M., Gregory, P.J., Keatinge, J.D.H., Brown, S.C. 1987. Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in northern Syria.2. Soil water dynamics and crop water use. *Field Crops Research* 16, 67–84.
- \*Cox, T.S., Shroyer, R.J., Ben-Hui, L., Sears, R.G., Martin, T.J. 1988. Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Sci.* 28, 756–760.
- \*Cropwat (FAO, 2001).
- \*Damagnez, J. 1975. Economie de l'eau en zone aride : utilisation des eaux de surface. Le développement des zones arides. *Options Méditerranéennes ; n. 28*. Paris : CIHEAM. pp. 35-41.
- \*Davidson, D.J., Chevalier, P.M. 1990. Pre-anthesis tiller mortality in spring wheat. *Crop Sci ; 30 : 832-6*.
- \*Davies, W.J . Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu Rev Plant Phys Mol Bio.* 42 : 55-76.
- \*Davies, W.J., Tardieu, F., Trejo, C.1994. How do chemical signals work in plant that grow in dryng soil? *Plant Physiol ; 104 : 309-14*.
- \*Debaeke, P., Cabelguenne, M., Casals, M.L., Puech, J. 1996. Élaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : Epicphase-blé. *Agronomie ; 16 : 25-46*.

- \*De cockborne, A., Bruckler, L., Auge, G. 1995. Estimation des bilans hydriques et azoté: le cas d'une petite région agricole maraîchère méditerranéenne (Gard). *Sécheresse* ; 6 : 189-200.
- \*Donald, C.M. 1962. In search of yield. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 28, 171–178.
- \*Donald, C.M. 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17, 385–403.
- \*Dreyer, E. 1997. Photosynthesis and drought in forest trees. *Trees-Contributions to Modern Tree Physiology*. (Rennenberg, H., Eschrich, W. & Ziegler, H., eds.). \*Backhuys Publishers, pp. 215-238.
- \*Dyer, J.A. 1984. Monitoring drought for grazing land managements. *J Soil Water Conserv* ; 39 : 176-8.
- \*Elias, E.M. 1995. Durum wheat products. *In Fonzo, N., di (ed.), Kaan, F., (ed.), Nachit, M., (ed.). Durum wheat quality in the Mediterranean region = La qualité du blé dur dans la région méditerranéenne. Zaragoza : CIHEAM-IAMZ, 1995. p. 23-31 : 1 ill.; 4 tables; 26 ref. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 22).*
- \*Evans, L.T. 1993. *Crop Evolution, Adaptation and yield*. Cambridge University. Press. Cambridge, UK. ISBN. 22:521-571.
- \*FAO. 1992. Besoin en eau des cultures. *Bulletin d'irrigation et de drainage*, N° 24, FAO. Eds, Rome. 120. pp.
- \*FAO. 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management by M. Smith. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 26*. Rome.
- \*FAO. (FAOSTAT), 2003.
- \*FAO. 2005. L'irrigation en Afrique en chiffres. Algérie. *Enquête AQUASTAT*, pp 11.
- \*Farquhar, G.D., Richards, R.A. 1984. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Australian Journal of Plant Physiology* 11, 539–552.
- \*Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R., Hubick, K.T. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40, 503–537.
- \*Farquhar, G.D., O'Leary, M.H., Berry, J.A. 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* 9, 121–137.
- \*Fischer, R.A. 1981. Optimizing the use of water and nitrogen through breeding of crops. *Plant and Soil* 58, 249–278.
- \*Fischer, R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 105, 447–461.
- \*Fischer, R.A, Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivar. Grain yield responses. *Aus J. Agr. Res* 29 : 897-912.

- \*Fischer, R.A., Rees, D., Sayre, K.D., Lu, Z-M, Condon, A.G., Larque Saavedra, A. 1998. Wheat yield progress is associated with higher stomatal conductance, higher photosynthetic rate and cooler canopies. *Crop Science* 38, 1467–1475.
- \*Focar, M., Nguyen, H.T., Blum, A. 1998. Heat tolerance in spring wheat. Grain filling. *Euphytica* 104 : 9-15.
- \*Fraquin P. 1973. Analyse agroclimatique en régions tropicales. Méthode des intersections et période fréquentielle de végétation. *Agron Trop* ; 6-7 : 665-82.
- \*Gadsden, H., Rodríguez, JA, Muñoz, C, Núñez, D, Hinojosa, O. 2003. Monitoring Drought in Chihuahua. UNAM, México. *Voices of Mexico*. ; 63 : 101-8.
- \*Galliot, M. 2007. Centre départemental de Limoges. Schéma régional d'aménagement et développement durable pour le Limousin. Etude prospective du climat de la région dans 20 ans.
- \*Gardner, F.P., Pearce, R.B., Michell, R.L. 1985. *Physiology of crop plants*. Ames (Iowa, États-Unis) : Iowa State University Press, ; 336 p.
- \*Gate, P. 1995. Ecophysiologie du blé blé- de la plante à la culture. In: *Techniques & Documentation tation*, p. 429, Paris.
- \*Gate, P., Bouthier, A, Casabianca, H, Deleens, E. 1993. Caractères physiologiques décrivant la tolérance à la sécheresse des blés cultivés en France : interprétation des corrélations entre le rendement et la composition isotopique du carbone des grains. Colloque Diversité génétique et amélioration variétale, Montpellier (France), 15-17 décembre 1992. *Les colloques*, n°64. Paris : Inra éditions.
- \*Gaudillière, J.P., Barcelo, M.O. 1990. Effets des facteurs hydriques et osmotiques sur la croissance des talles de blé. 1990. *Agronomie*. 10 : 423 – 32.
- \*Giunta, F., Motzo, R., Deidda, M. 1993. Effect of drought on yield and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 33, 399–409.
- \*Gottman, J. 1979. *A Geography of Europe*. 588 p., New York, Holt, Rinehart and Wiston.
- \*Gouar, W. 2006. Effet du cumul de pluie hivernale sur la réponse du cultivar Waha (*Triticum durum* Desf.) à la fertilisation azotée. Mémoire de Magister, Dépt, Agr. Fac, Sci. UHL, Batna, 66 pp.
- \*GPCCC, 1999. Groupe permanent des céréales du comité consultatif "Grandes Cultures Arables" de l'Union Européenne, Bruxelles, in Morancho, J. CIHEAM - Options Méditerranéennes.
- \*Grashoff, C., Dijkstra, P., Nonhebel, S., Schapendonk, A.H.C.M., van de Geijn, S.C. 1995. Effects of climate change on productivity of cereals and legumes; model evaluation of observed year-to-year variability of the CO<sub>2</sub> response. *Global Change Biology* 1 (6): 417-428.
- \*Green, D.J., Read, D.W.L. 1983. Water use efficiency of corn, sunflower and wheat with limiting soil moisture. *Can J Plant Sci* ; 63 : 747-9.
- \*Hafid, R.E., Smith, D.H., Karrou, M., Samir, K. 1998. Morphological attributes associated with early-season drought tolerance in spring durum wheat in a Mediterranean environment. *Euphytica* 101, 273–282.

- \*Hafsi, M. 2001. Adaptation du blé dur dans les condition des hautes plaines sétifiennes. Thèse de doctorat d'Etat ès-sciences. Faculté des sciences, UFAS, Sétif, Algérie, pp 80.
- \*Halitim, S. 2006. Contribution à l'étude de la réserve utile en eau des sols des cedraies dans les Aurès : influences des facteurs édaphiques. Mémoire de Magister, Dépt, Agr. Fac, Sci. UHL, Batna, 70 pp.
- \*Hall, A.E., Richards, R.A, Condon, A.G, Wright, G.C, Farquhar, G.D. 1994. Carbon isotope discrimination and plant breeding. *In: Janick J, ed. Plant breeding reviews, Vol. 12. New York: Wiley, 81–113.*
- \*Henchi, B. 1987. Effets des contraintes hydriques sur l'écologie et l'écophysiologie de *Plantago albicans*. L. Thèse de doctorat d'État, univ Tunis.
- \*Heurd, E.A. 1974. Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agric Meteorol*, 14 : 39-55
- \*Hinckley, T.M., Braatne, J. 1994. Stomata. *In : Plant-environment interactions. Wilkinson RE, eds. New York : Marcel Dekker Inc, pp. 323-355.*
- \*Hucl, P., Baker RJ 1989. Tillering patterns of spring wheat genotypes grown in a semi-arid environment. *Can J Plant Sci* ; 69 : 71-9.
- \*Hulme, M., Wigley, T.M.L., Barrow, E.M., Raper, S.C.B., Centella, A., Smith, S., Chipanshi, A.C. 2000. Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook, Climatic Research Unit, UEA, Norwich.
- \*Idso, S. B., Reginato, R. J., Jackson, R. D., and Pinter, J., P.J. 1981. Foliage and air temperatures: Evidence for a dynamic "equivalence point". *Agricultural Meteorology* , Vol. 24, pp. 223-226.
- \*Jacquart, C., Choisel, E. 1995. "Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisable en agrométéorologie", *La Météorologie*, 8(9), pp. 29-44.
- \*Jamagne, M., Bétrémieux, R., Bégon, J.C., Mori, A. 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information*. 324-325, pp. 627-641.
- \*Johnson, R.C., Nguyen, H.T., Croy, L.I. 1984. Osmotic adjustment and solute accumulation in two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Sci*. 24 : 957–62.
- \*Jones, M.M., Osmon, B., and Turner, N.C. 1980. Accumulation of solutes in leaves of sorghum and sunflower in response to water deficits. *Aust J Plant Physiol*, 7 : 193-205.
- \*Katz, R.W., Brown, B.J. 1992. Extreme events in a changing climate, *Climatic Change*, 21, 289-302.
- \*Kenny, G.J., Harrison, P.A., Olesen, J.E. Parry, M.J. 1993. The effects of climate change on land suitability of grain maize, winter wheat and cauliflower in Europe. *Eur. J. of Agronomy* 2: 325-338.

- \*Kreim, D.L., Kronstad, W.E. 1981. Drought response of winter wheat cultivars under field stress conditions. *Crop Sci* ; 21 : 11-5.
- \*Lacaze, X. 2006. Développer des plantes résistantes à la sécheresse. Exemple des recherches sur les céréales menées à l'Institut de L'Évolution. Ambassade France en Israël. Service de coopération & d'action culturelle 16 pp.
- \*Larbi, A., Mekliche, A., Abed, R., Badis, M. 1998. Effet du déficit hydrique sur la production de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) en région semi-aride. *CIHEAM - Options Méditerranéennes* 295-297.
- \*Leisz, D.R. 1982. Concern and cost of managing Mediterranean-type ecosystems. *Proceedings of the Symposium on Dynamics and management of Mediterranean-type ecosystems (22-26 juin 1981, San Diego, Californie)*, p. 3-5, USDA Forest Service, General Technical Report, PSW-58.
- \*López-Castañeda, C., Richards, R.A. 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments II. Phasic development and growth. *Field Crops Res.* 37, 63–75.
- \*López-Castañeda, C., Richards R.A., Farquhar G.D. 1995. Variation in early vigor between wheat and barley. *Crop Science* 35, 472–479.
- \*Loss, S.P., Sidique, K.H.M. 1994. Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in mediterranean environment. *Adv. Agron.* 52:229-276.
- \*Ludlow, M.M., Muchow, R. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water limited environments. *Adv Agron* ; 43 : 107-53.
- \*Luquet, D., Vidal, A., Dauzat, J., Begue, A., Olioso, A., Clouvel, P. 2004. Using directional tir measurements and 3d simulations to assess the limitations and opportunities of water stress indices. *Remote Sensing of Environment* , Vol. 90, No. 1, pp. 53-62.
- \*Martre, P. 1999. Architecture hydrolique d'une talle de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb). Implication pour les relations entre la transpiration et l'expansion foliaire. These de doctorat pp 13.
- \*Mazouz, L. 2006. Etude de la contribution des paramètres phéno morphologiques dans l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans l'étage bioclimatique semi aride. Mémoire de Magister. Dept Agr, Fac Sci, UHL, Batna, Algérie.
- \*McKee, T., Doesken, N., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conference on Applied Climatology, Anaheim (California)*, 17–22 January.
- \*Meinzer, F.C., Grantz, D.A. 1990. Stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane : stomatal adjustment to water transport capacity. *Plant, Cell Environ.* 13 :383-388.
- \*Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Hadj Sahraoui, A., Harkati, N. 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse*. Vol 17, Num 4, 507-13.
- \*Merabet, B.A., Boutiba, A. 2005. L'irrigation de complément du blé dur. Influence de la nature du matériel végétal et de la variabilité climatique interannuelle dans une plaine semis aride d'Algérie. *Sciences & Technologie C – N°23*, pp. 72-79.



- \*Merah, O., Deleens, E., Souyris, I., Nachit, M., Monneveux, P. 2001. Stability of carbon isotope discrimination and grain yield in durum wheat. *Crop Science* 41, 677–681.
- \*Merah, O., Deleens, E., Teulat B., Monneveux, P. 2001. Productivity and carbon isotope discrimination in durum wheat organs under a Mediterranean climate. *C R Acad. Sci. Paris.* 324 : 51- 57.
- \*Merah, O., Monneveux, P., Nachit, M., Deléens, E. 1999. La composition isotopique du carbone, critère intégrateur du fonctionnement phytosynthétique : application à l'amélioration génétique du blé dur en conditions méditerranéennes. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures.* Volume 8, Numéro 1, 37,
- \*Moran, S. M., Hymer, D. C., Qi, J., Sano, E. E. 2000. Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (sar) in semiarid rangeland. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 105, No. 1-3, pp. 69-80.
- \*Morgan, J.A., LeCain, D.R. 1991. Leaf gas exchange and related leaf traits among 15 winter wheat genotypes. *Crop Science* 31, 443–448.
- \*Morgan, J.A., LeCain, D.R., McCaig, T.N., Quick J.S. 1993. Gas exchange, carbon isotope discrimination and productivity in winter wheat. *Crop Sci.* 33 : 178-186.
- \*Morgan, J.M. 1984. Osmorégulation and water stress in higher plants. *Ann Rev Plant Physiol* ; 35 : 299 – 319
- \*Morgan, J.M., Gordan, A.G. 1986. Water use, grain yield and osmoregulation in wheat. *Aust J Plant Physiol* ; 13 : 523-32.
- \*Moulouche, B., Boulassel, A. 1997. Gestion rationnelle des irrigations de compléments des cultures de légumineuses alimentaires et de céréales. *Recherche Agronomique, Revue semestrielle N° 01 octobre 1997.* INRA d'Algérie. ISSN : 1111-1992.
- \*Mounier J. 1994. Données quantitatives : bilan hydrique, bilan hydrologique ; dynamique de l'eau et télédétection QA 94 : 133-57.
- \*Nachit, M.M., 1998. Association of grain yield in dryland and carbon isotope discrimination with molecular markers in durum (*Triticum turgidum* L. var durum). *University Extension Press.* Pp: 218-224.
- \*Nachit, M.M., Picard, E., Monneveux, P., Labhilili, M., Baum, M., Rivoal, R. 1998. Présentation d'un programme international d'amélioration du blé dur pour le bassin méditerranéen. *Cahiers Agric.*, 7 : 510-515.
- \*Naveh, Z., Lieberman, A.S. 1984. *Landscape ecology, Theory and application.* 356p., Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo.
- \*Nemmar, M. 1980. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé dur (*T durum dsf*) et chez le blé tendre (*T aestivum* L.) : étude l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique. Thèse D.A.A. ENSA. Montpellier 63 pp.
- \*Newton, R.J., Bhaskaran, S., Puryear, J.D., Smith, R.H. 1986. Physiological changes in cultured sorghum cells in response to induced water stress. *Solubles carbohydrates and organic acids.* *Plant physiol.* 81 : 626 – 9.

- \*Ortiz-Monasterio, R.J.I., Dhillon, S.S., Fischer, R.A. 1994. Date of sowing effects on grain yield and yield components of irrigated spring wheat cultivars and relationships with radiation and temperature in Ludhiana, India. *Field Crops Res.* 37, 169–184.
- \*O'toole, J.C., Cruz, R.T. 1980. Response of leaf water potential, stomatal resistance and leaf rolling to water stress. *Plant Physiol.* 51 : 993-997.
- \*Passioura, J.B. 1983. Roots and drought resistance. *Agricultural Water Management*, Vol. 7, 265-80.
- \*Passioura, J.B. 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *J Aust Agric Sci* ; 43 : 117-20.
- \*Passioura, J.B. 1994. The yield of crops in relation to drought. In : Boote KJ, et *al.*, eds. *Physiology and Determination of Crop Yield*. Madison, WI, USA : Crop Science Society of America : 343-59.
- \*Patel, N. R., Mehta, A. N., Shekh, A. M. 2001. Canopy temperature and water stress quantification in rainfed pigeonpea (*cajanus cajan* (L.) millsp.). *Agricultural and Forest Meteorology* , Vol. 109, No. 3, pp. 223-232.
- \*Pédélaborde, P.1968. Les bilans hydriques. *Cahiers de géographie du Québec* ; 12 : 5-23.
- \*Penuelas, J., Save, R., Marfa, O., Serrano, L. 1992. Remotely measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 58, No. 1-2, pp. 63-77.
- \*Quarrie, S., Pekic, S., Lazic-Pekic, S., Ivanosevic, V., Vasic, G. 1995. ABA and drought tolerance in maize: Future prospects. In : *Maize Research Institute, Videnovic Z, eds. Maize Breeding Production and Utilization : 50 years of Maize Research Institute. Belgrade, Yougoslavie : Zemin Polje, : 121-37.*
- \*Quizenberry, J.E. 1982. Breeding for drought resistance and plant water use efficiency. Dans : *Breeding Plants for Less Favourable Environments*, Christiansen, M.N. et Lewis, C.F. (éds). Wiley Intersci. Publ., New York, pp. 383-399.
- \*Raes, R. 2000. Logiciel Eto version 1.0, calculation of Reference Evapotranspiration. Faculty of Agriculture and Applied Biological Sciences. Department Land Management, K.U Leuven University, Leuven, Belgium.
- Raes, D. 2004. BUDGET 6.0 - A soil water and salt balance model.- IRRISOFT. K.U. Leuven University (Faculty of Bioscience Engineering). Division of Soil and Water Management. Celestijnenlaan 200 E B-3001 Leuven. Belgium.
- \* Ramdani, A. 2004. Impact of Spanish and Italian breeding activities on durum wheat yield and associated morpho-physiological and quality traits throughout the 20th century. Thèse de Ph.D. Département de Production végétale, Université de Lleida, Lleida, Espagne.
- \*Ramos, J.M., Garcí'a del Moral, L.F., Recalde, L. 1985. Vegetative growth of winter barley in relation to environmental conditions and grain yield. *J. Agric. Sci.* 104, 413–419.

- \*Rebetzke, G.J., Condon A.G, Richards, R.A, Farquhar, G.D. 2002. Selection for reduced carbon-isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. *Crop Science* 42, 739–745.
- \*Reyes-Gómez, V.M., López, D.N, Robles, C.A.M, Pineda, J.A.R, Gadsden, H, Ortíz, M.L, Hinojosa de la Garza, O.R, 2006. Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans le bassin-versant du Río Conchos (État de Chihuahua, Mexique). *Sécheresse* ; 17 (4) : 475-84.
- \*Reynolds, M.P., van Ginkel, J M., Ribaut, M. 2000. Avenues for genetics modification of radiation use efficiency in wheat, *J. Exp. Bot.* 51 459– 473.
- \*Rezgui, M., Zairi, A., Bizid, E., Ben Mechlia, N. 2005. Consommation et efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) cultivé en conditions pluviales et irriguées en Tunisie. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*. Volume 14, Numéro 4, 391-7, Étude originale.
- \*Richards, R.A. 1991. Crop improvement for temperate Australia : future opportunities. *Field Crops Res.* 26:141–169.
- \*Richards, R.A., Rebetzke, G.J, Condon, A.G, Van Herwaarden A.F. 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci* ; 42 : 111-21.
- \*Riou, C. 1993. L'eau et la production végétale. *Sécheresse* ; 2 : 75-83 .
- \*Rognon, P 1994. "Les conséquences de la sécheresse climatique sur la pédogenèse", *Sécheresse*, Vol.5, N°3, pp. 173-184.
- \*Rousset, N., Arrus, R. 2006. L'agriculture du Maghreb au défi du changement climatique : quelles stratégies d'adaptation face à la raréfaction des ressources hydriques? Communication à WATMED 3,3 conférence internationale sur les Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Tripoli (Liban), 1 -3 novembre 2006.
- \*Royo, C., Villegas, D., Garcia del Moral, L.F., Elhani S., Aparicio, N., Rharrabti, Y., Araus J.L. 2002. Comparative performance of carbon isotope discrimination and canopy temperature depression as predictors of genotype differences in durum wheat yield in Spain. *Australian Journal of Agricultural Research* 53, 561–569.
- \*Salah, H.B.H., Tardieu, F. 1997. Control of leaf expansion rate of droughted maize plants under fluctuating evaporative demand. A superposition of hydraulic and chemical messages?. *Plant Physiol.* 114 : 893-900.
- \*Samba, G., Diop, M. 2000. Bilan hydrique dans la région du Pool (République du Congo). *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*. Volume 9, Numéro 1, 47-53, Méthodes et techniques.
- \*Santaruus, K.A. 1973. The prospective effect of sugars on chloroplast membranes during temperature and water stress and its relationship to frost, dessication and heat resistance. *Planta.* 113 : 23 – 46.
- \*Savin, R., Slafer, G.A. 1991. Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 116, 1–7.

- \*Sayre, K.D, Acevedo, E., Austin R.B. 1995. Carbon isotope discrimination and grain yield for three bread wheat germplasm groups grown at different levels of water stress. *Field Crops Research* 41, 45–54.
- \* Shanahan, J.F., Smith, D.H. Welsh, J.R. 1984. An analysis of post-anthesis sink-limited winter wheat grain yields under various environments. *Agron. J.*, 76: 611-615.
- \*Siddique, K.H.M., Kirby, E.J.M., Perry, M.W. 1989. Ear to stem ratio in old and modern wheats: relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Res.* 21, 59–78.
- \*Slafer, G.A., Andrade, F.H. 1989. Genetic improvement in wheat bread (*Triticum aestivum* L.) yield in Argentina. *Field Crops Res.* 21, 289–296.
- \*Slafer, G.A., Andrade, F.H., 1993. Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different eras. *Field Crop Res.* 31, 351–367.
- \*Slafer, G.A., Rawson, H. 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologist and modellers. *Aust. J. Plant Physiol.* 21, 393–426.
- \*Slafer, G.A., Satorre, E.H., Andrade, F.H. 1994. Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In: Slafer, G.A. (Ed.), *Genetic Improvement of Field Crops*. Marcel Dekker, New York, pp. 1–68.
- \*Slama, A. 2002. Étude comparative de la contribution des différentes parties du plant du blé dur dans la contribution du rendement en grains en irrigué et en conditions de déficit hydrique. Thèse de doctorat en biologie, faculté des sciences de Tunis.
- \*Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M., Zid, B. 2005. Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Sécheresse* ; 16 (3) : 225-9.
- \*Simane, B., Struik, P.C., Nachit, M., Peacock, J.M. 1993. Ontogenic analysis of yield components and yield stability of durum wheat in water-limited environments. *Euphytica* 71, 211–219.
- \*Sorrells, M.E., Diab, A., Nachit, M. 2000. Comparative genetics of drought tolerance. *Options méditerranéennes série A (Séminaires méditerranéens)* ; 40 : 191-201.
- \*Stark, J.C., Longley, T.S. 1986. Changes in spring wheat tillering patterns in response to delayed irrigation. *Agron J* ; 78 : 892-6.
- \* StatSoft France. 1997. *STATISTICA pour Windows [Manuel du Programme]* : StatSoft France - 72, quai des Carrières - 94220 Charenton-le-Pont. Tél : 01-45-185-999, fax : 01- 45-185-285.
- \*Statyer, R.O. 1968. The use of soil water balance relationships in agroclimatology. *Méthodes agroclimatologiques. In : Actes du colloque de Reading, UNESCO, Paris* : 73-87.
- \*Stern, R.D., Dennett, M.D., Dale I.C. 1982. Analysing daily rainfall measurements to give agronomically useful results. II. A modelling approach. *Exp. Agr.*, 18 : 137-153.
- \*Subbarao, G.V., Johansen, C, Slinkard, A.E, Nageswara, Rao R.C, Saxena, N.P, Chauhan, Y.S 1995. Strategies for improving drought resistance in grain legume. *Crit Rev Plant Sci* ; 14 : 469-523.

- \*Tambussi, E.A., Bort, J., Araus, J.L. 2007. Water use efficiency in C3 cereals under Mediterranean conditions: a review of physiological aspects. *Ann Appl Biol* 150, pp 307–321
- \*Tanner, C.B., Sinclair, T.R. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor HM, Jordan WR, Sinclair TR, eds. *Limitations to efficient water use in crop production*. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA, 1–27.
- \*Tardieu, F., Dreyer, E. 1997, Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. *In L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. edited by INRA-Éditions. Institut National de Recherche Agronomique. pp. 41-5.*
- \*Thorntwaite, C.W., Mather, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Concerton (New Jersey) : Drexel Institute of technology ; 311 p.
- \*Touazi, M., Laborde, J.P., Bhiry N. 2004. Modelling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in northern Algeria. *Journal of Hydrology*, Volume 296, Issues 1-4, Pages 179-191.
- \*Triboï, E. 1990. Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre. *Agronomie ; 10 : 191-200.*
- \*Triboï, E., Ntonga, J. 1993. Effet de l'azote et du rayonnement sur le développement des feuilles et de l'épi chez le blé d'hiver : mise en place de l'appareil foliaire et de la structure de l'épi. *Agronomie ; 13 : 253-65.*
- \*Turc, L. 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann Agron ; 12 : 13-51.*
- \*Turner, N.C. 1979. Drought resistance and adaptation to water deficits in crops plants. *in : Stress Physiology in Crop Plants, Mussell, H. et Staples, R.C. (éds). Wiley Intersciences, New York, pp. 303-372.*
- \*Turner, N.C. 1986. Adaptation to water deficit: a changing perspective. *Aust J Plant Physiol ; 13 : 175-90.*
- \*Turner, N.C.1997. Further progress in crop water relations. *Advances in Agronomy* 58: 293-338.
- Turner, N.C., Wright GC, Siddique K.H.M. 2001. Adaptation of grain legume to water-limited environments. *Adv Agron ; 71 : 193-231.*
- \*Tuzet, A., Perrier, A. 1998. "Les besoins en eau des cultures : analyse et applications", *in : TIERCELIN JB, TEC & DOC. Traité d'irrigation. Paris, Lavoisier, pp. 147-172.*
- \*Vachaud, G., Vauclin, M., Riou, C., Chabouni, Z. 1985. Evaporation en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes. II: méthodes neutroniques et tensiométriques. *Agronomie* 3: 267-274.
- \*Van de Geijn, S.C., Goudriaan, J. 1997. Changements du climat et production agricole. *Archives de documents de la FAO.*
- \*Van Laere, P.E. 2003. Mémento de l'irrigation. Collection "Manuels Techniques". Manuel réalisé par ISF avec le soutien de la Direction générale de la Coopération internationale (DGCI). © Ingénieurs Assistance Internationale - Ingénieurs sans Frontières. Bruxelles - Belgique. 13 pp.

- \* Vavilov, N.I. 1951. The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. Selected writings. New-York, Ronald Press, 364 p. (Chronica Botanica).
- \*Venekamp, J.H., Lampe, J.E.M., Koot, J.T.M. 1989. Organic acids as sources for drought-induced proline synthesis in field bean plants, *Vicia faba* L. *Plant Physiol.* 133 : 654 - 9.
- \*Villegas, D., Aparicio, N., Blanco, R., Royo, C. 2001. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under Mediterranean conditions. *Annals Bot.* 88, 617–627.
- \*Voltas J., Romagosa, I., Lafarga, A., Armesto, A.P., Sombrero, A., Araus, J.L. 1999. Genotype by environment interaction for grain yield and carbon isotope discrimination of barley in Mediterranean Spain. *Australian Journal of Agricultural Research* 50, 1263–1271.
- \*Waddington, S.R., Osmanzai, M., Yoshida, M., Ransom, J.K. 1987. The yield of durum wheats released in Mexico between 1960 and 1984. *J Agric Sci Camb* 108: 469–477.
- \*Wartinger, A., Heilmeier, H., Hartung, W., Schultze E.D. 1990. Daily and seasonal courses of leaf conductance and abscisic acid in the sylem sap of almond trees (*Prunus dulcis* M.) under desert conditions. *New Phytol.* 116 : 581-587.
- \*Watts, D., El Mourid, M. 1988. Rainfall patterns and probabilities in the semi-arid cereal production region of Morocco. USAID Project No. 608-0136. Settat : Aridoculture Center INRA.
- \*Wheeler, J.H., Kostbade, J.T. 1990. World regional geography. 744p., Saunders College Pub., Philadelphia, Chicago, San Francisco, Tokyo.
- \*Wiegand, C. L., Nixon, P. R., Jackson, R. D. 1983. Drought detection and quantification by reflectance and thermal responses. *Agricultural Water Management* Vol. 7, No. 1-3, pp. 303-321.
- \*Yagoubi, S. 1993. Irrigation d'appoint et efficience de l'utilisation de l'eau. Cas de la pomme de terre. Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes, Bari (Italie).
- \*Young, F.W. 2001. ViSta : The Visual Statistics System. Copyright © 1991-2007. Version 6.4.3436-EWU. web: [www.visualstats.org](http://www.visualstats.org).
- \*Yuan, G., Luo, Y., Sun, X., Tang, D. 2004. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the north china plain. *Agricultural Water Management* , Vol. 64, No. 1, pp. 29-40.
- \*Zohary, D., Hopf , M. 1994. Domestication of plants in the Old World. Oxford, Clarendon Press.

### Annexe .1. Description du matériel végétal

<b>N°</b>	<b>Nom</b>	<b>Source</b>
1	<b>Waha</b>	Lignée CIMMYT/ICARDA (Cham1) lancée en Algérie en 1986
2	<b>Oued Zenati</b>	Variété locale
3	<b>Polonicum</b>	Variété locale
4	<b>Mexicali</b>	Variété CIMMYT lancée en 1975
5	<b>Altar</b>	Variété CIMMYT lancée en 1984
6	<b>Sooty</b>	Variété CIMMYT lancée en 2000
7	<b>Dukem</b>	Variété CIMMYT lancée en 2000
8	<b>Kucuk</b>	Variété CIMMYT lancée en 1984

**Annexe 2a. Paramètres climatiques décadaires de la campagne 2006/2007**

<b>Mois</b>	<b>Décade</b>	<b>Pluie (mm)</b>	<b>T max (°C)</b>	<b>T min (°C)</b>	<b>T moy (°C)</b>
<b>Novembre</b>	<b>1</b>	5,20	20,08	4,97	12,53
	<b>2</b>	0,00	22,81	1,98	12,40
	<b>3</b>	1,70	21,90	1,85	11,88
<b>Décembre</b>	<b>1</b>	19,80	16,38	1,41	8,90
	<b>2</b>	30,50	13,15	2,16	7,66
	<b>3</b>	11,50	15,36	-1,33	7,02
<b>Janvier</b>	<b>1</b>	0,00	12,63	2,15	7,39
	<b>2</b>	0,00	16,33	3,91	10,12
	<b>3</b>	9,50	11,68	4,01	7,85
<b>Février</b>	<b>1</b>	22,20	9,99	3,19	6,59
	<b>2</b>	0,00	14,89	4,91	9,90
	<b>3</b>	1,00	12,66	2,98	7,82
<b>Mars</b>	<b>1</b>	38,50	16,12	6,46	11,29
	<b>2</b>	30,80	11,07	3,38	7,23
	<b>3</b>	39,30	10,20	1,38	5,79
<b>Avril</b>	<b>1</b>	24,30	15,79	6,49	11,14
	<b>2</b>	64,90	15,54	8,67	12,11
	<b>3</b>	6,40	17,92	9,86	13,89
<b>Mai</b>	<b>1</b>	26,50	17,30	7,16	12,23
	<b>2</b>	0,30	23,85	12,01	17,93
	<b>3</b>	1,00	25,70	13,33	19,52
<b>Juin</b>	<b>1</b>	1,00	24,24	11,41	17,83
	<b>2</b>	16,20	33,25	18,35	25,80
	<b>3</b>	0,00	34,85	21,48	28,17



## Annexe 2b. Paramètres climatiques journaliers de la campagne 2006/2007.

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-nov.		28,3	7,5	17,9
2-nov.		25,8	7	16,4
3-nov.		14,7	8,2	11,45
4-nov.	5,2	14,7	9,6	12,15
5-nov.		15,2	8,1	11,65
6-nov.		18,5	7,7	13,1
7-nov.		19,8	2,1	10,95
8-nov.		19	1,5	10,25
9-nov.		21,1	-0,5	10,3
10-nov.		23,7	-1,5	11,1
11-nov.		25,7	1,3	13,5
12-nov.		23,5	0,8	12,15
13-nov.		18	3,5	10,75
14-nov.		22,3	2	12,15
15-nov.		22,2	2,2	12,2
16-nov.		22	1	11,5
17-nov.		23,1	1,5	12,3
18-nov.		22,5	2	12,25
19-nov.		24,2	2,6	13,4
20-nov.		24,6	2,9	13,75
21-nov.		20,2	1,2	10,7
22-nov.	1,7	19,1	1,4	10,25
23-nov.		21,4	2,5	11,95
24-nov.		22,6	1,8	12,2
25-nov.		25,5	2,5	14
26-nov.		26,1	3,9	15
27-nov.		21,8	3,4	12,6
28-nov.		22,2	1,3	11,75
29-nov.		20,5	1	10,75
30-nov.		19,6	-0,5	9,55

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-déc.		21,6	5,2	13,4
2-déc.		21,3	0,2	10,75
3-déc.		12,8	3	7,9
4-déc.		21,2	1,8	11,5
5-déc.		21,4	0,5	10,95
6-déc.		16,7	2,6	9,65
7-déc.	19,8	11	3,4	7,2
8-déc.		13,1	-2,2	5,45
9-déc.		16,4	-0,6	7,9
10-déc.		8,3	0,2	4,25
11-déc.		18,8	2,8	10,8
12-déc.		14,8	2,6	8,7
13-déc.		8,7	3,6	6,15
14-déc.	16,0	8,2	3,1	5,65
15-déc.	5,7	17,1	0,6	8,85
16-déc.		11	1	6
17-déc.	8,8	9,3	2,6	5,95
18-déc.		17	2,7	9,85
19-déc.		16,4	1	8,7
20-déc.		10,2	1,6	5,9
21-déc.	3,5	12,5	-2,2	5,15
22-déc.		17,3	-2,1	7,6
23-déc.		11,1	0,6	5,85
24-déc.		13	0,3	6,65
25-déc.	8,0	14,9	2,6	8,75
26-déc.		16,6	-2,8	6,9
27-déc.		16,6	-1,6	7,5
28-déc.		15,8	-2	6,9
29-déc.		15,6	-1,7	6,95
30-déc.		17,6	-3,4	7,1
31-déc.		18	-2,3	7,85

N B

T max = température maximale

T min = température minimale

T moy = température moyenne

**Annexe 2b. Paramètres climatiques journaliers de la campagne 2006/2007 (Suite)**

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-janv.		12	1,5	6,75
2-janv.		11,7	2,9	7,3
3-janv.		8,9	2,4	5,65
4-janv.		12	-0,6	5,7
5-janv.		12,2	2,8	7,5
6-janv.		13,1	2	7,55
7-janv.		12,5	2,2	7,35
8-janv.		12,6	1,8	7,2
9-janv.		15	1,9	8,45
10-janv.		16,3	4,6	10,45
11-janv.		15,5	4,8	10,15
12-janv.		13,3	2,4	7,85
13-janv.		17,2	2,9	10,05
14-janv.		19	4,9	11,95
15-janv.		17,3	4,6	10,95
16-janv.		14,4	4,1	9,25
17-janv.		15,5	4,5	10
18-janv.		13,3	2,9	8,1
19-janv.		16,8	2,3	9,55
20-janv.		21	5,7	13,35
21-janv.		20,2	8,3	14,25
22-janv.		15,7	9,8	12,75
23-janv.		9,7	3,6	6,65
24-janv.		7,8	-1,2	3,3
25-janv.		6,5	0	3,25
26-janv.		9,9	0,1	5
27-janv.		10,3	0,7	5,5
28-janv.		10,8	3,2	7
29-janv.		11,4	3,2	7,3
30-janv.	7,5	13	8,3	10,65
31-janv.	2,0	13,2	8,1	10,65

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-févr.	2,0	7,7	3,8	5,75
2-févr.		11,6	1,8	6,7
3-févr.		11,6	3,1	7,35
4-févr.	0,7	8,7	5,9	7,3
5-févr.		7,9	4,3	6,1
6-févr.	1,5	5,3	3,2	4,25
7-févr.		9,5	2,5	6
8-févr.		12,6	1,1	6,85
9-févr.	18,0	12,3	3,8	8,05
10-févr.		12,7	2,4	7,55
11-févr.		12,6	6	9,3
12-févr.		16,5	4,2	10,35
13-févr.		15,4	6,3	10,85
14-févr.		18,3	5,6	11,95
15-févr.		15	7,1	11,05
16-févr.		18,9	3,3	11,1
17-févr.		18,4	5,4	11,9
18-févr.		12,7	4,3	8,5
19-févr.		9	5,1	7,05
20-févr.		12,1	1,8	6,95
21-févr.		12,6	4,3	8,45
22-févr.		11	3,3	7,15
23-févr.		11,8	3,7	7,75
24-févr.		12,2	4,2	8,2
25-févr.		14,7	2,5	8,6
26-févr.		10,7	3,7	7,2
27-févr.		10,4	1,1	5,75
28-févr.	1,0	17,9	1	9,45

## Annexe 2b. Paramètres climatiques journaliers de la campagne 2006/2007 (Suite)

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-mars		19,3	6,1	12,7
2-mars		20	7,3	13,65
3-mars		23,2	6,4	14,8
4-mars		23,7	11	17,35
5-mars		21,7	12	16,85
6-mars		17,1	5,7	11,4
7-mars		14,8	8,3	11,55
8-mars	10,5	7,3	1,8	4,55
9-mars	19,0	8,5	5,9	7,2
10-mars	9,0	5,6	0,1	2,85
11-mars	13,0	7,5	0	3,75
12-mars	4,7	7,7	4,4	6,05
13-mars	4,5	10,9	3,9	7,4
14-mars		13,5	3,8	8,65
15-mars		14	5,3	9,65
16-mars		15,3	6,4	10,85
17-mars	8,6	10,1	5,8	7,95
18-mars		12,8	1,7	7,25
19-mars		15,2	2,8	9
20-mars		3,7	-0,3	1,7
21-mars	2 N	2,7	-2,7	0
22-mars	3 N	3	-3	0
23-mars		7,5	-3,4	2,05
24-mars		12,6	0,4	6,5
25-mars		13,5	0,9	7,2
26-mars		14	4,9	9,45
27-mars		14	4	9
28-mars	16,0	10,6	4,4	7,5
29-mars	5,3	8,5	3,2	5,85
30-mars	13,0	10,6	3,8	7,2
31-mars		15,2	2,7	8,95

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-avr.		17,3	7,4	12,35
2-avr.		17,8	8,8	13,3
3-avr.	8,6	12,5	6,2	9,35
4-avr.		12,7	1	6,85
5-avr.	3,2	11,3	2,4	6,85
6-avr.		14,2	4,4	9,3
7-avr.		16,9	7	11,95
8-avr.	12,5	17,8	7,2	12,5
9-avr.		19,1	8,8	13,95
10-avr.		18,3	11,7	15
11-avr.		21,8	9,8	15,8
12-avr.	4,0	20,2	13,1	16,65
13-avr.	13,5	11,5	7	9,25
14-avr.	6,0	12,9	6,3	9,6
15-avr.	5,0	10,3	6,7	8,5
16-avr.	18,7	14,5	8,3	11,4
17-avr.		16,8	6,8	11,8
18-avr.		17,1	10	13,55
19-avr.	17,7	14,8	9,4	12,1
20-avr.		15,5	9,3	12,4
21-avr.		18,2	6,6	12,4
22-avr.		20	10,3	15,15
23-avr.		21,3	12,6	16,95
24-avr.	1,0	16,4	9,9	13,15
25-avr.		16,2	10,4	13,3
26-avr.		16,7	10,8	13,75
27-avr.	4,0	18,6	10,3	14,45
28-avr.	0,7	18,5	9,5	14
29-avr.	0,7	17	11,6	14,3
30-avr.		16,3	6,6	11,45

**NB : N = neige.**

## Annexe 2b. Paramètres climatiques journaliers de la campagne 2006/2007 (Suite)

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-mai		17,3	7,3	12,3
02-mai	19,0	14,3	9,5	11,9
03-mai		18,9	9,7	14,3
04-mai		15,2	5,1	10,15
05-mai	3,5	15,5	4,8	10,15
06-mai	3,5	15,7	5,2	10,45
07-mai	0,5	15,1	5,9	10,5
08-mai		16,7	6,8	11,75
09-mai		21,1	8	14,55
10-mai		23,2	9,3	16,25
11-mai		24,9	12,1	18,5
12-mai		25,8	13,7	19,75
13-mai		26,3	14,2	20,25
14-mai		27	16,7	21,85
15-mai		20,3	10	15,15
16-mai	0,3	19,6	10	14,8
17-mai		18,3	6,3	12,3
18-mai		21,3	10,8	16,05
19-mai		26	10,7	18,35
20-mai		29	15,6	22,3
21-mai		29	17,8	23,4
22-mai		30,2	17,8	24
23-mai		27,9	15,8	21,85
24-mai		29,8	19	24,4
25-mai		31,4	19	25,2
26-mai		28,2	13	20,6
27-mai	1,0	19,5	11,6	15,55
28-mai		18,1	8,7	13,4
29-mai		20,6	7,1	13,85
30-mai		24,4	8,4	16,4
31-mai		26,9	12,9	19,9

Date	Pluie (mm)	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)
1-juin		27,1	4,5	15,8
02-juin		17,4	12	14,7
03-juin		15,7	7,7	11,7
04-juin	1,0	17	7	12
05-juin		26,2	8,8	17,5
06-juin		26,2	17,6	21,9
07-juin		26,8	16	21,4
08-juin		26	11,5	18,75
09-juin		29,3	11,8	20,55
10-juin		30,7	17,2	23,95
11-juin		29,5	18	23,75
12-juin	12,5	29,7	15,2	22,45
13-juin	2,7	32,1	16,2	24,15
14-juin	1,0	31,7	16,7	24,2
15-juin		30,2	16,7	23,45
16-juin		30,8	17,1	23,95
17-juin		35,3	19,3	27,3
18-juin		38,2	21,5	29,85
19-juin		37,9	23,9	30,9
20-juin		37,1	18,9	28
21-juin		37,1	18,1	27,6
22-juin		37	24,8	30,9
23-juin		37,8	25,8	31,8
24-juin		37,4	25,6	31,5
25-juin		36,7	25,5	31,1
26-juin		31,5	25,1	28,3
27-juin		32,1	15,5	23,8
28-juin		32,1	18,5	25,3
29-juin		33,1	18	25,55
30-juin		33,7	17,9	25,8

### Annexe 3. Evolution du taux d'épiaison.

Date	Oued Zenati	Polonicum	Altar	Sooty	Waha	Dukem	Mexicali	Kucuk
08-mai	0%	0%	1,59%	0%	0%	0%	3,23%	0%
09-mai	0%	0%	2,87%	0%	0%	0%	6,85%	0%
10-mai	0%	0%	7,64%	0%	0%	0%	24,19%	0%
11-mai	0%	0%	22,93%	0%	1,60%	0%	48,79%	0%
12-mai	0%	0%	40,45%	3,96%	5,20%	0%	70,56%	0,36%
13-mai	0%	0%	60,83%	17,63%	17,60%	1,38%	83,06%	2,90%
14-mai	0,78%	0%	80,25%	36,69%	37,20%	1,83%	85,89%	9,06%
15-mai	3,13%	0%	88,85%	42,09%	51,20%	4,13%	89,92%	15,94%
16-mai	7,81%	1,92%	94,59%	71,22%	70,40%	15,14%	96,37%	34,78%
17-mai	13,28%	3,85%	95,22%	75,54%	76,80%	18,81%	97,18%	44,93%
18-mai	17,58%	8,65%	98,73%	85,61%	90,80%	41,28%	97,98%	64,86%
19-mai	29,69%	16,83%	100%	90,65%	94,80%	60,09%	100%	83,33%
20-mai	46,88%	31,73%		94,96%	100%	84,86%		93,84%
21-mai	60,94%	51,92%		97,84%		94,50%		98,91%
22-mai	77,73%	71,15%		98,92%		97,71%		100%
23-mai	91,41%	87,02%		100%		100%		
24-mai	96,88%	92,79%						
25-mai	98,83%	97,12%						
26-mai	100%	98,56%						
27-mai		100%						

#### Annexe 4. Matrice de corrélation des paramètres étudiés.

Variables	NP/m <sup>2</sup>	DEP1	DEP2	HT	NE/m <sup>2</sup>	Bio	PMG	NG/E	TEP	Δ <sup>13</sup> C	HI	Rdt	NG/m <sup>2</sup>	K's3	K's4	K's5	K's	EUE Rdt	EUE Bio	W Rdt	W Bio	
<b>NP/m<sup>2</sup></b>	1																					
<b>DEP1</b>	0,53	1																				
<b>DEP2</b>	0,53	0,92*	1																			
<b>HT</b>	0,82*	0,81*	0,90*	1																		
<b>NE/m<sup>2</sup></b>	-0,76*	-0,61	-0,71*	-0,78*	1																	
<b>BIO</b>	0,52	0,61	0,63	0,73*	-0,21	1																
<b>PMG</b>	0,80*	0,22	0,31	0,56	-0,70	0,23	1															
<b>NG/E</b>	-0,84*	-0,57	-0,65	-0,82*	0,69	-0,57	-0,87*	1														
<b>TEP</b>	-0,86*	0,60	-0,68	-0,82*	0,99*	-0,28	-0,77*	0,77*	1													
<b>Δ<sup>13</sup>C</b>	-0,69	-0,58	-0,76*	-0,83*	0,94*	-0,34	-0,58	0,64	0,92*	1												
<b>HI</b>	-0,64	-0,91*	-0,97*	-0,96*	0,68	-0,75*	-0,35	0,71*	0,68	0,75*	1											
<b>Rdt</b>	-0,62	-0,91*	-0,98*	-0,93*	0,78*	-0,56	-0,37	0,69	0,76*	0,81*	0,97*	1										
<b>NG/M<sup>2</sup></b>	-0,88*	-0,61	-0,71*	-0,86*	0,88*	-0,45	-0,88*	0,95*	0,92*	0,82*	0,74*	0,77*	1									
<b>K's3</b>	-0,22	-0,85*	-0,81*	-0,61	0,46	-0,50	0,17	0,15	0,39	0,52	0,75*	0,74*	0,27	1								
<b>K's4</b>	-0,43	-0,94*	-0,93*	-0,78*	0,65	-0,57	-0,13	0,43	0,60	0,67	0,87*	0,88*	0,54	0,95*	1							
<b>K's5</b>	-0,21	-0,88*	-0,83*	-0,62	0,45	-0,47	0,18	0,17	0,39	0,51	0,78*	0,79*	0,28	0,99*	0,94*	1						
<b>K's</b>	-0,16	-0,82*	-0,78*	-0,56	0,43	-0,45	0,20	0,09	0,36	0,49	0,70	0,70	0,22	1*	0,94*	0,98*	1					
<b>EUE Rdt</b>	-0,60	-0,91*	-0,98*	-0,92*	0,77*	-0,55	-0,35	0,67	0,76*	0,80*	0,97*	1*	0,75*	0,76*	0,89*	0,81*	0,72*	1				
<b>EUE Bio</b>	0,54	0,55	0,57	0,71*	-0,17	0,99*	0,27	-0,58	-0,25	-0,30	-0,70	-0,50	-0,45	-0,41	-0,49	-0,38	-0,36	-0,50	1			
<b>W Rdt</b>	-0,61	-0,90*	-0,98*	-0,92*	0,78*	-0,55	-0,38	0,69	0,76*	0,81*	0,96*	1*	0,77*	0,74*	0,88*	0,78*	0,70	1*	-0,49	1		
<b>W Bio</b>	0,51	0,57	0,56	0,69	-0,15	1*	0,19	-0,51	-0,23	-0,29	-0,69	-0,49	-0,39	-0,47	-0,52	-0,43	-0,42	-0,49	0,99*	0,48	1	

\* = Corrélation significative (P < 0,05).

## Annexe 5. Analyse de variance des variables mesurées.

<b>Discrimination isotopique du carbone.</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	9.01	7	1.29	255.68	<0.0001	0.99
<b>Bloc</b>	0.00	2	0.00	0.40	0.6789	0.00
<b>All Sources</b>	9.08	9	1.00	198.95	<0.0001	0.99
<b>Error</b>	0.07	14	0.01			
<b>Total</b>	9.01	23				

<b>Biomasse aérienne.</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	14.07	7	1.20	1.68	0.1938	0.22
<b>Bloc</b>	32.79	2	16.40	13.70	0.0005	0.52
<b>All Sources</b>	46.86	9	5.21	4.35	0.0072	0.74
<b>Error</b>	63.62	14	2.01			
<b>Total</b>	16.76	23				

<b>Hauteur.</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	6473.79	7	924.83	204.49	<.0001	0.98
<b>Bloc</b>	56.72	2	28.36	6.27	0.0114	0.01
<b>All Sources</b>	6593.83	9	725.61	160.44	<.0001	0.99
<b>Error</b>	63.32	14	4.52			
<b>Total</b>	6530.52	23				

<b>Nombre d'épis par mètre carré.</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	61825.53	7	8832.22	4.86	0.0058	0.63
<b>Bloc</b>	10702.16	2	5351.08	2.94	0.0857	0.11
<b>All Sources</b>	72527.70	9	8058.63	4.43	0.0066	0.74
<b>Error</b>	25445.77	14	1817.55			
<b>Total</b>	97973.46	23				

<b>Poids de mille grains.</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	787.99	7	112.57	23.99	<.0001	0.92
<b>Bloc</b>	3.50	2	1.75	0.37	0.6952	0.00
<b>All Sources</b>	791.49	9	87.94	18.74	<.0001	0.92
<b>Error</b>	65.69	14	4.69			
<b>Total</b>	857.18	23				

**Annexe 5. Analyse de variance des variables mesurées (suite).**

<b>Nombre de grains par épi.</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	576.62	7	576.62	82.37	<.0001	0.84
<b>Bloc</b>	22.77	2	22.77	11.39	0.1984	0.03
<b>All Sources</b>	599.39	9	599.39	66.60	<.0001	0.87
<b>Error</b>	87.61	14	87.61	6.26		
<b>Total</b>	687.00	23				

<b>Rendement grains.</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	5.94	7	2.28	6.56	0.0014	0.76
<b>Bloc</b>	0.11	2	0.05	0.15	0.8588	0.01
<b>All Sources</b>	16.04	9	1.78	5.14	0.0034	0.77
<b>Error</b>	4.86	14	0.35			
<b>Total</b>	20.90	23				

<b>Indice de récolte</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	0.07	7	0.01	39.40	<.0001	0.92
<b>Bloc</b>	0.00	2	0.00	4.31	0.0349	0.03
<b>All Sources</b>	0.07	9	0.01	31.60	<.0001	0.95
<b>Error</b>	0.00	14	0.00			
<b>Total</b>	0.07	23				

<b>Nombre de talles herbacées</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	0.73	7	0.10	8.38	0.0004	0.80
<b>Bloc</b>	0.01	2	0.01	0.53	0.6010	0.01
<b>All Sources</b>	0.74	9	0.08	6.64	0.0010	0.81
<b>Error</b>	0.17	14	0.01			
<b>Total</b>	0.91	23				

<b>Nombre de plants par mètre carré</b>						
<b>Source</b>	<b>Sum-of-Squares</b>	<b>dII</b>	<b>Mean-Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Value</b>	<b>R-Square</b>
<b>Variety</b>	4640.47	7	662.92	3.08	0.0346	0.46
<b>Bloc</b>	2461.17	2	1230.58	5.73	0.0152	0.24
<b>All Sources</b>	7101.63	9	789.07	3.67	0.0147	0.70
<b>Error</b>	3008.82	14	214.92			
<b>Total</b>	10110.45	23				