

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش الجزائر  
Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger

## THESE

Présentée par : **Arezki MEKLICHE**

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT en Sciences  
Agronomiques**

**Tolérance au déficit hydrique et stabilité du rendement en grain chez le  
blé (*Triticum durum* Desf. et *Triticum aestivum* L.)**

Soutenue le 19/10/2014 devant le jury composé de :

Président	M. Z. BOUZNAD	ENSA	Professeur
Directeur de thèse	M. Ph. MONNEVEUX	CIP, Lima, Pérou	Directeur de recherche
Co-Directeur	M. A. AIDAOU	ENSA	Professeur
Examineur	M. T. HARTANI	ENSA	Professeur
Examineur	M. M. BENLARIBI	U. Mentouri Constantine	Professeur
Examineur	M. A. BENBELKACEM	INRA Algérie	Directeur de recherche

## INTRODUCTION

Les céréales en C3, en particulier, les blés dur et tendre (*Triticum durum* Desf. et *Triticum aestivum* L.) contribuent fortement à la ration alimentaire d'une grande partie de l'humanité. La production mondiale de céréales, toute espèce confondue, avoisine les 700 millions de tonnes par an ; c'est dire l'importance de ces espèces.

Le déficit hydrique dont les effets sur les rendements sont difficilement maîtrisables à cause des difficultés d'irrigation sur des surfaces importantes et la disponibilité limitée des ressources hydriques dans le monde, impose aux chercheurs d'autres voies pour améliorer la production.

Des différences de comportement vis-à-vis du déficit hydrique entre les espèces et les variétés au sein de la même espèce existent. L'amélioration génétique a joué un rôle fondamental dans l'augmentation des rendements depuis de longues années.

La sélection de variétés tolérantes au déficit hydrique est abordée, très souvent, par le biais des expérimentations en plein champ avec des outils de screening longs, coûteux et souvent destructifs.

Le présent travail constitue une partie du programme de recherche du laboratoire de l'INRA-ENSAM de Montpellier et de de l'institut technique des céréales et fourrages et du laboratoire des productions végétales de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'Alger.

L'objectif est de mettre à la disposition du sélectionneur un outil simple, rapide et fiable pour l'aider dans la prise de décision d'une part et d'autre part à sélectionner des génotypes selon leur adaptabilité au milieu.

Dans la première partie de ce travail, le déficit hydrique post floraison est étudié à travers le statut hydrique de la plante (potentiel hydrique foliaire de base et midi solaire ; teneur relative en eau de base et midi solaire), l'évolution de la consommation en eau du sol mesurée par la sonde à neutrons (Solo 40), et la mesure de l'évapotranspiration potentielle. L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a été mesuré sur l'ensemble des variétés et des régimes hydriques en 1991 et 1992 dans le but de déterminer l'importance de la relation entre cet indice, d'une part, le rendement, ses composantes et le LAI, d'autre part, en vue de trouver une variable explicative précoce non destructive pouvant être utilisée en sélection.

Dans la deuxième partie, une analyse de la diversité agro-morphologique et de la stabilité du rendement en grain de différents génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.), à travers trois essais réalisés durant trois années consécutives à l'E.N.S.A d'Alger caractérisées par une répartition pluviométrique irrégulière, a été entreprise dans le but de déterminer le type d'adaptabilité et la sélection des meilleurs.

# **PARTIE I : Tolérance au déficit hydrique chez le blé (*Triticum durum* Desf. et *Triticum aestivum* L.).**

## **BIBLIOGRAPHIE**

### **1. Effet du stress hydrique sur le rendement, ses composantes et les différentes fonctions physiologiques et métaboliques**

La sécheresse est un facteur limitant la productivité du blé à travers le monde en plus des autres stress environnementaux, particulièrement les stress dus aux températures élevées, à la salinité et au froid.

La teneur en eau des feuilles fraîches et des grains de blé est respectivement de 77 et 12 % (Monneveux et Belhassen, 1996). L'eau a un rôle fondamental dans la vie des plantes, dans la mesure où elle conditionne leurs activités physiologiques et métaboliques (Ben Naceur *et al.*, 1999). Si l'eau joue un rôle dans la régulation thermique des couverts végétaux et comme vecteur des éléments nutritifs de la plante c'est dans ses relations avec la photosynthèse et donc la production de matière sèche, que sa carence est déterminante (Riou, 1993).

Un manque d'eau ou déficit hydrique perturbe les différentes fonctions de l'eau. Ce déficit intervient lorsque la quantité d'eau transpirée est supérieure à la quantité d'eau absorbée.

Selon Passioura (1996), il n'y a aucun caractère qui confère une tolérance globale à la sécheresse, et en particulier, des réponses à court terme au stress hydrique au niveau cellulaire et subcellulaire ne peuvent avoir un effet sur le rendement des cultures dans des conditions limitées d'eau. Selon cet auteur, lorsque la sécheresse n'est pas sévère au point de menacer la survie des plantes, leur productivité est mieux analysée en termes d'économie de ressources, le rendement ( $Y$ ) est donc fonction de la quantité d'eau transpirée ( $T$ ), de l'efficacité d'utilisation de l'eau ( $WUE$ ) et de l'indice de récolte ( $IR$ ) :

$$Y = T \times WUE \times IR$$

L'amélioration de la productivité des céréales a été obtenue par une augmentation de l'indice de récolte liée à la réduction de la taille des chaumes ; or cette réduction de la taille des chaumes est fortement corrélée à une réduction du système racinaire, chez le blé (Hurd, 1974 cité par Monneveux, 1991) qui s'est traduit par un accroissement considérable de la sensibilité au déficit hydrique. Une variabilité génétique intraspécifique importante a été trouvée pour le nombre de racines latérales du premier et du deuxième ordre, la profondeur de pénétration maximale et l'angle entre les axes des racines séminales chez le blé (O'Brien, 1979). Cependant, les travaux de Ali Dib et Monneveux (1992) sur les variétés algériennes et syriennes de blé dur montrent que les paramètres morphologiques racinaires sont relativement peu dépendants génétiquement et/ou physiologiquement des principaux caractères agronomiques (tailles, nombre de talles, biomasse aérienne), ils dépendent tant des effets génétiques que de la qualité du sol et aussi de l'interaction génotype  $\times$  environnement (Hajzler *et al.*, 2011). Selon Ali Dib et Monneveux (1992), il apparaît possible de modifier génétiquement le développement des racines séminales et de sélectionner un modèle optimal de développement de racines sans entraîner de modifications corrélatives des caractères agronomiques. Les travaux de Truhlářová *et al.* (2011) montrent que le chevelu racinaire agrandit la surface externe des racines qui aboutit à l'absorption accrue de l'eau et des substances nutritives par la plante. Selon ces auteurs, cette propriété pourrait avoir contribué à la biomasse plus grande observée chez la variété de blé d'hiver Meritto, cette dernière possède un système racinaire plus grand avec un chevelu racinaire plus fin.

Selon Monneveux (1991), les paramètres phénologiques d'adaptation caractérisent le « calage » du cycle vis-à-vis des événements climatiques et d'éviter une baisse du potentiel hydrique ( $\Psi$ ) de la plante, en effet, la précocité à la floraison peut être utilisée pour que la plante puisse finir son cycle avant l'arrivée du stress hydrique. Cependant, la sélection pour ce caractère doit tenir compte des zones dans lesquelles le blé doit être cultivé. En effet, dans les hautes plaines algériennes, non seulement, il y a un stress hydrique terminal mais aussi il peut y avoir des gelées pouvant coïncider avec la floraison et réduire la production (Mekliche *et al.*, 2013).

Le déficit hydrique induit, chez les plantes, des modifications physiologiques et biochimiques complexes défavorables. L'étendue des modifications dépend du cultivar, du stade de croissance, de la durée et de l'intensité du stress (Araus *et al.*, 2002, Mark et Antony, 2005). Des caractères morphophysiologiques d'adaptation au déficit hydrique ont été largement étudiés par différents auteurs (Acevedo, 1988 ; Benlaribi et Monneveux, 1988 ; 1991).

Les principales réponses au stress hydrique sont la fermeture des stomates, la diminution de la croissance cellulaire, de la photosynthèse et de l'activation de la respiration (Aprile *et al.*, 2009). Selon Schulze (1986) cité par Rajala *et al.* (2009), les stomates répondent à un signal de la racine quand le sol se dessèche. Au niveau biochimique beaucoup de plantes accumulent des osmoprotecteurs tels que les sucres (sucrose, raffinose, trehalose), les sucre-alcools (sorbitol, mannitol), les acides aminés (proline), et les amines (glycine bêtaïne et polyamines) (Bartels et Sunkar, 2005 cités par Aprile *et al.*, 2009). Une liste de paramètres phénologiques et morphophysiologiques d'adaptation au déficit hydrique (tableau 1) a été établie par Monneveux (1991).

Selon cet auteur, les paramètres morphophysiologiques d'adaptation permettent de rendre compte des phénomènes de tolérance avec un potentiel hydrique ( $\Psi$ ) élevé, de tolérance avec un faible potentiel hydrique et de résistance (ou tolérance à la déshydratation) :

- la tolérance avec un potentiel hydrique élevé (ou « retard dans la déshydratation ») est liée à la réduction des pertes d'eau (régulation stomatique, adaptations micromorphologiques des tissus foliaires, enroulement des feuilles, glaucescence induisant une augmentation de la réflectance) et/ou à une augmentation des quantités d'eau consommées (importance du système racinaire, mécanismes de transfert prioritaire de l'eau vers les organes en croissance) ;

- la tolérance avec un faible potentiel hydrique est caractérisée par une diminution du potentiel hydrique ( $\Psi$ ), et par un maintien du potentiel de turgescence, l'ajustement du potentiel osmotique pouvant être réalisé par l'accumulation d'ions minéraux dans la

vacuole tels que  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Na^+$  (Morgan, 1984) et de composés organiques (sucres solubles, proline) ;

Tableau 1. Paramètres phénologiques et morphophysologiques d'adaptation au déficit hydrique

Paramètres d'adaptation		Exemples
Paramètres phénologiques		Précocité
Paramètres morphologiques	Paramètres macromorphologiques Paramètres micromorphologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extension du système racinaire</li> <li>- Port et surface des feuilles</li> <li>- Taille du chaume</li> <li>- Longueur des barbes</li> <li>- Enroulement des feuilles</li> <li>- densité du trichome</li> <li>- glaucescence et couleur des feuilles</li> <li>- Présence de cires</li> <li>- Densité et taille des stomates</li> <li>- Compaction du mésophylle</li> <li>- Epaisseur de la cuticule</li> <li>- Nombre et diamètre des vaisseaux du xylème racinaire</li> </ul>
Paramètres physiologiques		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effets stomatiques et non stomatiques du déficit hydrique sur la photosynthèse</li> <li>- Réduction de la transpiration par fermeture des stomates</li> <li>- Maintien d'un potentiel hydrique élevé</li> <li>- Osmorégulation (accumulation d'ions minéraux, de proline, de sucres solubles).</li> </ul>

Source : Monneveux (1991)

- la résistance ou tolérance à la déshydratation est liée à une aptitude plus ou moins grande du génotype à maintenir l'intégrité de ses structures (membranes) et de ses fonctions (photosynthèse).

Le potentiel de l'eau montre une large variabilité génétique, même sous des conditions non stressantes : le potentiel hydrique reste supérieur à - 0,1 MPa chez le blé, le concombre, le haricot et le piment rouge, il peut atteindre - 0,3 MPa chez le caroubier et - 1,1 MPa chez la tomate ; la teneur en eau peut être maintenue dans les cellules et tissus pour permettre l'activité métabolique (Monneveux et Belhassen, 1996). Cependant, selon ces auteurs, la variabilité génétique de cette composante est plutôt limitée.

Les variations du potentiel osmotique chez les plantes sont généralement comprises entre - 0,3 et - 3 MPa (Monneveux et Belhassen, 1996). Selon ces auteurs, la diminution du potentiel osmotique est due à l'accumulation d'osmolytes, ces solutés peuvent être des produits directs de la photosynthèse ou peuvent avoir leur origine dans l'hydrolyse des composés stockés. Ils ajoutent que l'ajustement osmotique est un caractère typiquement inductible, qui pourrait constituer une explication partielle de l'association notée par différents auteurs entre la capacité d'ajustement et la stabilité du rendement.

Selon Bolanos *et al.* (1993) cités par Tardieu (1996), les facteurs qui ont été modifiés dans la sélection à long terme de la résistance à la sécheresse chez le maïs suggèrent que le contrôle de la croissance des feuilles et des racines et le transfert du carbone chez les plantes stressées peuvent jouer un rôle essentiel.

La sécurité du rendement ne peut être améliorée que si à l'avenir, des tentatives d'amélioration seraient basées sur la disposition de nouvelles connaissances du processus déterminant le développement de la plante et sa réponse au stress (Barnabás *et al.*, 2008).

L'amélioration du rendement et de sa stabilité sous des conditions de déficit hydrique du sol nécessite le développement de variétés tolérantes au stress hydrique (Siddique *et al.*, 2000). Rajaram *et al.* (1996) ont suggéré l'évaluation simultanée de germplasm dans des conditions optimales (pour utiliser l'héritabilité élevée et identifier les géotypes à haut potentiel de rendement) et sous des conditions de stress (pour préserver les allèles de tolérance à la sécheresse).

Le rendement en grain dépend du nombre de plantes par unité de surface, du nombre d'épis par plante, du nombre de grains par épi et du poids moyen du grain. Ces

composantes interagissent et les conditions favorisant une composante peuvent agir inversement sur une autre composante, il y a un effet de compensation. En effet, si la densité de semis est élevée, alors le nombre d'épis par plante sera réduit, cela est aussi valable pour les relations qui existent entre le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains qui sont corrélés négativement. Selon Royo *et al.* (2006) cités par Rajala *et al.* (2009), les composantes déterminant le rendement sont inter reliées et augmentent la capacité des cultures à compenser les pertes de n'importe quelle composante causées par des conditions temporaires défavorables. Selon Hanifi-mekliche *et al.* (2011), le nombre de grains et le poids de 1000 grains présentent une corrélation négative et significative ( $p < 0,001$ ) chez l'orge ( $r = -0,54$ ). Le rendement étant un caractère génétiquement (polygénique) et physiologiquement complexe (Demarly, 1977) et pour lequel il y a un effet milieu, il est difficile d'effectuer une sélection directe sur le rendement car c'est un caractère qui présente une faible héritabilité. Une sélection à partir de composantes de rendement serait plus indiquée car ces dernières présentent des héritabilités plus élevées, par exemple chez l'orge, l'héritabilité au sens large du nombre de grains par épi a été de 0,87, 0,64 et 0,63 respectivement chez les haploïdes doublés (HD) au niveau du dispositif et individuel et au niveau des  $F_2$  alors que pour le rendement en grain, elle a été de 0,76, 0,39 et 0,37 respectivement chez les HD au niveau du dispositif et individuel et au niveau des  $F_2$  (Hanifi, 1999). La proportion de la variation expliquée par l'AGC (aptitude générale à la combinaison, qui représente la part additive de la variation transmise à la descendance), par rapport à celle due à l'ASC (aptitude spécifique à la combinaison, qui représente la part de dominance et d'épistasie trans non transmise à la descendance), était 1,5 fois plus élevée que celle due à l'ASC pour le nombre de grains/épi, alors qu'elle n'est que de 0,8 fois pour le rendement en grain chez l'orge (Hanifi – Mekliche et Gallais, 1999). Cette sélection ne peut se faire qu'après la récolte. Une question se pose alors : peut-on utiliser des caractères mesurables à la floraison telle que la matière sèche de différentes parties de la plante correspondant à une surface donnée ou rapportée à une plante (tige, épi, feuille), ou des mesures correspondant à l'état hydrique de la plante (potentiel hydrique foliaire, teneur en eau relative), si oui quel lien y-a-t-il entre ces caractères et le rendement en grain ?

La productivité des céréales dépend non seulement de l'accumulation de la matière sèche, mais aussi de sa répartition effective dans les différentes parties de la plante surtout dans les conditions de stress hydrique. Le stress hydrique durant le remplissage du grain peut induire une sénescence précoce et un raccourcissement de la période de remplissage du grain, cependant, il augmente la remobilisation des assimilats de la paille vers le grain. En effet, le remplissage du grain se fait grâce à la translocation des assimilats des organes verts (feuilles, épis, barbes, col de l'épi), lieu de la photosynthèse, vers les grains mais aussi de la remobilisation des assimilats stockés dans les tiges. Austin *et al.* (1980) montrent que l'assimilation pré-anthèse estimée a contribué à 44 % de la matière sèche en 1976, une année très sèche et chaude, mais seulement 11 % en 1977, une année plus humide et plus froide. Les travaux de Kumar *et al.* (2006) montrent que la répartition de la matière sèche dans la tige est de 47 et 48 % dans deux sites affectés par la sécheresse, tandis que dans les sites plus favorables la répartition est de 38 et 37 %. Selon Yang *et al.* (2001), le stress hydrique accélère le transport du carbone pré-stocké dans les tissus végétatifs pendant le remplissage du grain.

## **1. Méthodes permettant la prédiction du rendement**

### **1.1. Méthodes directes de prédiction**

Différents caractères morphologiques, agronomiques et physiologiques permettent une prédiction précoce des rendements dans différentes conditions environnementales, cependant, ces caractères nécessitent le prélèvement d'échantillons à différents stades de la culture et la détermination de corrélations et d'équations de régression entre le rendement et les caractères mesurés. Plusieurs indices de tolérance à la sécheresse ont été suggérés par différents auteurs. Parmi ces indices, nous pouvons citer l'indice de sensibilité au stress (SSI) (Fischer et Maurer, 1978), l'indice de tolérance (TOL) et la productivité moyenne (MP) (Rosielle et Hamblin, 1981) et l'indice de tolérance au stress (STI) (Fernandez, 1992) (tableau 2).

Tableau 2. Indices de résistance à la sécheresse

Indices	Formule	Auteurs
Indice de sensibilité à la sécheresse (SSI)	$SSI = \frac{1 - \left(\frac{Y_s}{Y_p}\right)}{1 - \left(\frac{\overline{Y_s}}{\overline{Y_p}}\right)}$	Fischer et Maurer (1978)
Indice de Tolérance	$TOL = Y_p - Y_s$	Rosielle et Hamblin (1981)
Moyenne de la productivité	$MP = \frac{(Y_p + Y_s)}{2}$	
Moyenne géométrique de la productivité	$GMP = \sqrt{(Y_s)(Y_p)}$	Fernandez (1992)
Indice de tolérance au stress	$STI = \left(\frac{Y_p}{\overline{Y_p}}\right) \left(\frac{Y_s}{\overline{Y_s}}\right) \left(\frac{\overline{Y_s}}{\overline{Y_p}}\right) = \frac{(Y_p)(Y_s)}{\left(\overline{Y_p}\right)^2}$	

Source : Pourdad (2008)

Où :

$Y_s$  : Rendement d'un génotype donné sous conditions de stress ;

$Y_p$  : Rendement d'un génotype donné sous conditions non stressante ;

$\overline{Y_s}$  : Moyenne du rendement sous conditions de stress ;

$\overline{Y_p}$  : Moyenne du rendement sous conditions non stressante.

Un pourcentage de réduction correspondant à l'indice de tolérance de Rosielle et Hamblin (1981) rapporté à la moyenne du traitement à l'ETM peut être calculé.

Cependant, les méthodes directes consistant à utiliser des organes pour la prédiction du rendement nécessitent la destruction de l'échantillon. Des méthodes non destructives permettant la prédiction du rendement ont été développées telles que la précocité qui est un caractère d'esquive, la température du couvert végétal et la mesure de l'indice foliaire (LAI). En effet, la température du couvert végétal augmente lorsqu'il y a stress hydrique, puisque le rôle de régulation de la température du végétal joué par la transpiration de la plante est affecté à cause de la fermeture plus ou moins complète des

stomates. Un stress hydrique provoque une diminution du transport des éléments minéraux des racines vers les organes aériens, mais aussi de la photosynthèse des substances organiques dont la plante a besoin pour son développement.

## 1.2. Méthodes indirectes de prédiction du rendement

Récemment, des évaluations indirectes des caractères agronomiques et physiologiques peuvent être aussi employées en utilisant des techniques de réflectance spectrales (Araus *et al.*, 2002).

Les indices de réflectance spectraux sont des méthodes non destructives et instantanées d'évaluation du statut physiologique d'une culture ou d'une population au champ (Peñuelas *et al.*, 1993). Ces indices sont calculés à partir de mesures obtenues par la télédétection.

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci (Soudani, 2005). Elle est basée sur les phénomènes de réflexion et d'émission des corps car tout corps dont la température est supérieure à  $-273^{\circ}\text{C}$  émet un rayonnement électromagnétique (Gruber, 1983).

Le soleil émet un rayonnement incident qui arrive sur une surface donnée, entre autres, le sol et les végétaux et il se décompose en différentes fractions électromagnétiques qui sont le rayonnement réfléchi, le rayonnement absorbé et/ou transmis par la surface considérée (figure 1). On obtient alors l'équation suivante (Lillesand et Kiefer, 1987) :

$$E_1(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda)$$

Où :

$E_1(\lambda)$  : Rayonnement incident

$E_R(\lambda)$  : Rayonnement réfléchi

$E_A(\lambda)$  : Rayonnement absorbé

$E_T(\lambda)$  : Rayonnement transmis.

L'équation donnée ci-dessus est souvent présentée sous la forme suivante :

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)]$$

L'énergie réfléchie est égale à l'énergie incidente diminuée de l'énergie absorbée et transmise.

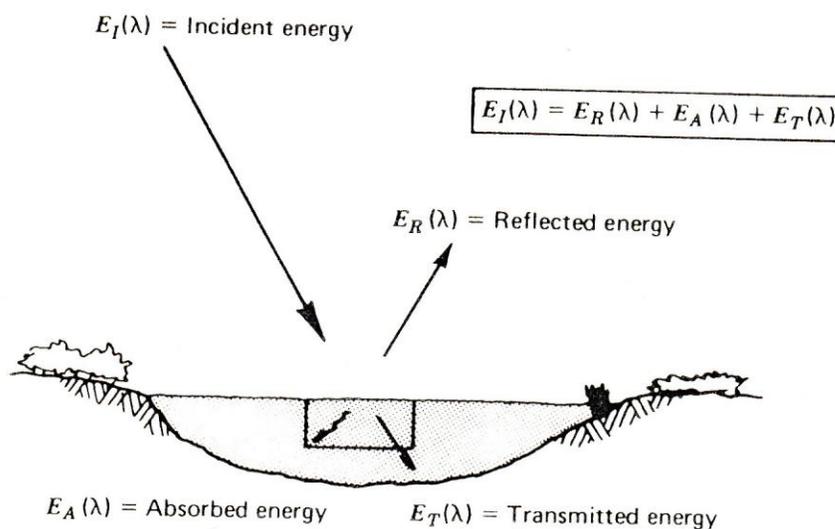


Figure 1. Basic interactions between electromagnetic energy and an earth surface feature.

Source : Lillesand et Kiefer (1987)

La proportion de l'énergie réfléchie, absorbée et transmise dépend des longueurs d'ondes (Lillesand et Kiefer, 1987). La proportion des différentes fractions dépend du type de surface et des conditions atmosphériques. Les facteurs affectant les propriétés optiques des feuilles ci-dessous sont donnés par Guyot (1989).

#### *Structure anatomique des feuilles*

- La réflectance des feuilles, dans le proche infrarouge dépend du nombre d'assises cellulaires, de la dimension des cellules et de l'épaisseur relative du parenchyme lacuneux. Selon cet auteur, les feuilles des dicotylédones sont plus

réfléchissantes que celles des monocotylédones car elles possèdent un parenchyme lacuneux plus développé. De même, les feuilles des plantes adaptées à la sécheresse, qui sont généralement épaisses (olivier, chêne vert...) ont des réflectances très élevées dans le proche infrarouge (70 à 80 %).

- les faces supérieures des feuilles sont généralement moins réfléchissantes (plus de chloroplastes) que les faces inférieures.

- La présence de poils à la surface des feuilles modifie leur réflectance.

*L'âge des feuilles* affecte les propriétés optiques des feuilles. En effet, la disparition des pigments chlorophylliens et leur remplacement par des pigments bruns entraîne un fort accroissement de la réflectance dans le jaune-vert et dans le rouge. Dans le proche infrarouge, la réflectance évolue seulement lorsque la structure interne de la feuille est désorganisée par son dessèchement. Dans l'infrarouge moyen, l'accroissement de la réflectance est lié au dessèchement de la feuille qui intervient relativement tardivement lorsqu'elle est jaune et que les pigments chlorophylliens aient disparu.

#### *Teneur en eau des feuilles*

La teneur en eau des feuilles a une action directe sur leurs propriétés optiques dans l'infrarouge moyen, mais elle agit également de manière indirecte sur la réflectance dans le visible et le proche infrarouge en modifiant la turgescence des feuilles.

#### *Déficiences minérales*

Les déficiences minérales affectent, en premier lieu, la teneur en chlorophylle des feuilles puis leur structure anatomique selon leur sévérité.

#### *Attaques parasitaires*

Les attaques parasitaires peuvent :

- Modifier la teneur en pigment des feuilles,
- Provoquer des nécroses,
- Apporter d'autres pigments qui, selon leur nature, peuvent accroître ou diminuer la réflectance dans divers domaines spectraux,

- Modifier les échanges hydriques des feuilles sans apporter de modifications de leurs propriétés optiques.

La figure 2 représente les spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de blé.

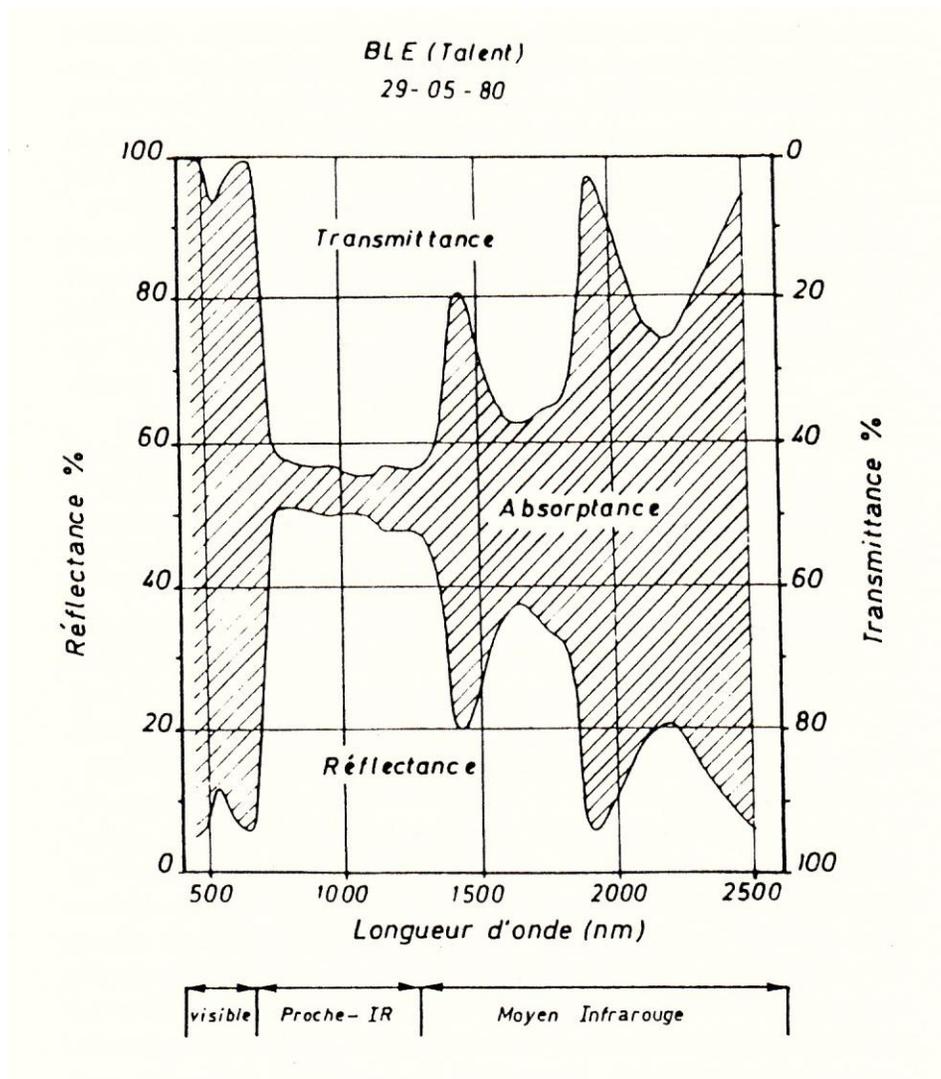


Figure 2. Evolution des propriétés optiques d'une feuille de blé en fonction de la longueur d'onde.

Source : Guyot (1987)

La figure 3 montre, à titre d'exemple, l'évolution de la réflectance d'une feuille de blé, à différents états, en fonction de la longueur d'onde.

Seul le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, de l'anglais Photosynthetically Active Radiation) dont les longueurs d'onde s'étendent de 400 nm à 700 nm est utilisé par les plantes pour leur croissance (<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/principe.html>).

Selon Guyot (1989), les feuilles ont, dans le domaine du visible (400 – 700 nm), une faible réflectance (15 % maximum) et une très faible transmittance. La majeure partie du rayonnement reçu est absorbée par les pigments foliaires (chlorophylle, carotène, xanthophylle, anthocyanes) ; dans le proche infrarouge (700 – 1300 nm), les pigments foliaires ainsi que la cellulose qui constitue les parois cellulaires, sont transparents par conséquent, la quantité de rayonnement absorbée par la feuille est très faible (inférieure ou égale à 10 %). L'absorption augmente donc avec la quantité de matière active. Dans l'infrarouge moyen (1300 à 2500 nm), l'eau contenue dans les végétaux joue un rôle capital. Ces longueurs d'onde correspondent, en effet, à la zone d'absorption de l'eau, dont la teneur détermine donc l'importance relative des trois grandeurs, réflectance, absorptance et transmittance (Gruber, 1983).

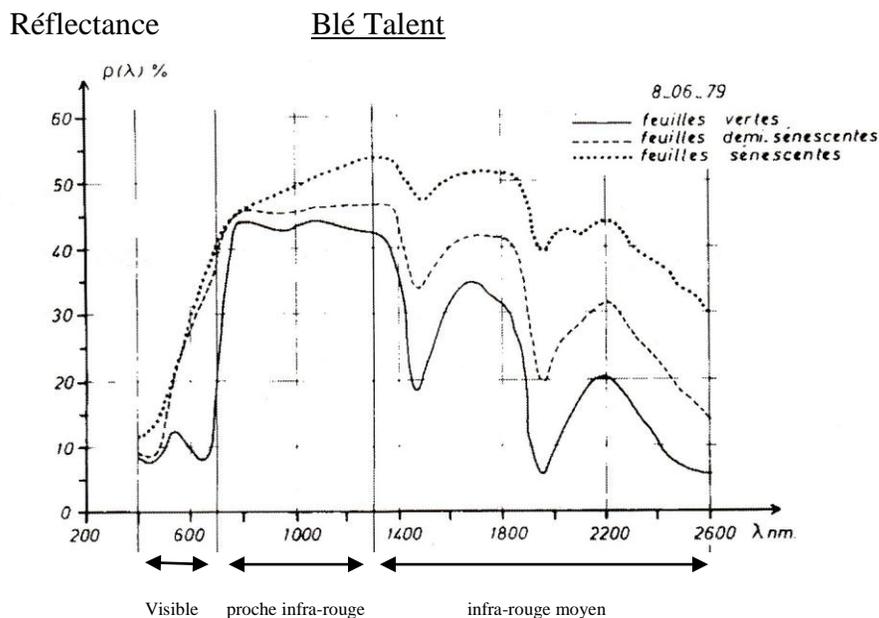


Figure 3. Spectres de réflectance de feuilles de blé déterminés au laboratoire au cours de la phase de sénescence.

Source : Guyot (1984)

La figure 3 montre que la réflectance augmente avec la sénescence des feuilles car les plantes diminuent leur activité photosynthétique, les pigments chlorophylliens disparaissent, les cellules entrent peu à peu en état de plasmolyse, entraînant une destruction des couches cellulaires et une augmentation sensible de la réflectance dans les longueurs d'onde du visible (jaune...rouge) et parallèlement une diminution de la réflectance dans le proche infrarouge (<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/vegetation/indices/principe.html>).

Selon Soudani (2005), le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc. On utilise principalement les différences des propriétés optiques de la végétation dans le rouge et le proche infrarouge, les réflectances dans le proche infrarouge augmentent avec la présence de la végétation (forte réflexion par le parenchyme lacuneux) tandis que celles dans le rouge diminuent (pic d'absorption de la chlorophylle) (<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/vegetation/indices/principe.html>).

La figure 4 montre l'évolution de la réflectance d'un couvert végétal dans le rouge et le proche infrarouge en fonction de l'indice foliaire.

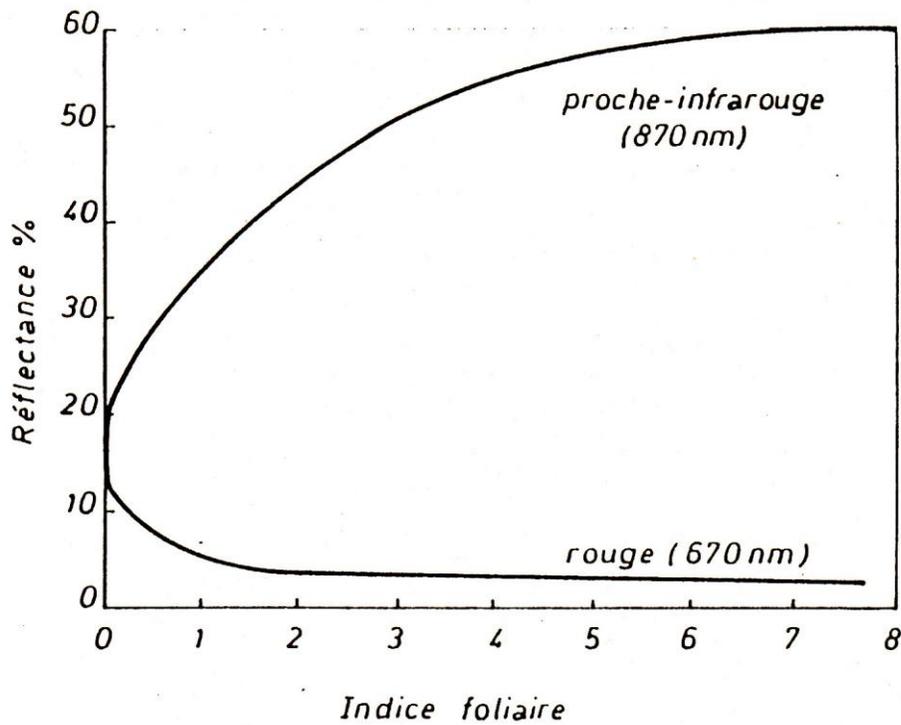


Figure 4. Evolution de la réflectance d'un couvert végétal dans le rouge et le proche infrarouge en fonction de l'indice foliaire (Guyot, 1989)

La télédétection utilise différents satellites parmi lesquels nous pouvons citer les satellites SPOT (Satellite pour l'Observation de la Terre), LANDSAT (Land Satellite) et METEOSAT (Meteorological Satellite) etc.

Plusieurs indices spectraux ont été développés (tableau 3).

Tableau 3. Indices spectraux utilisés au niveau de la végétation

Indices	Abbreviations	Auteurs
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	Rouse J. W. et Haas 1973 (1973)
Ratio Vegetation Index	RVI	Pearson R. L. et Miller L. D. (1972)
Perpendicular Vegetation Index	PVI	Richardson A. J. et Wiegand C. L. (1977)
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	Huete A. R. (1988)
Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	TSAVI	Baret E. et Guyot G. (1991) Baret E., Guyot G., et Major D. J. (1989)
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	MSAVI	Qi J., Chehbouni A., Huete A., Kerr Y., et Sorooshian S. (1994)
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	MSAVI2	
Global Environment Monitoring Index	GEMI	Pinty B. et Verstraete M. M. (1992)
Weighted Difference Vegetation Index	WDVI	Clevers J. (1988) Clevers J. (1991)
Angular Vegetation Index	AVI	S. Plummer, P. North, et S. Brigg (1994)
Atmospherically Resistant Vegetation Index	ARVI	Kaufman Y. J. et Tanré D. (1992)
Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	TSARVI	
Enhanced Vegetation Index	EVI	Huete A. R., Justice C. et Liu H. (1994)
Infrared Percentage Vegetation Index	IPVI	Crippen R. E. (1990)
Transformed NDVI	TNDVI	Deering D.W., Rouse J. W., Haas R. H. et Schell H. H. (1975)

Source: <http://www.orfeo-toolbox.org/SoftwareGuide/SoftwareGuidech12.html>

Parmi ces indices, les plus largement utilisés sont le rapport simple (SR =simple ratio) et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Araus *et al.*, 2001) dont les formules sont données ci-dessous.

$$SR = \frac{R_{NIR}}{R_{Red}}, \text{ avec des valeurs allant de } 0 \text{ à } \infty$$

Où :

$R_{NIR}$  est la réflectance dans le canal proche infra rouge

$R_{Red}$  est la réflectance dans le canal rouge

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})}, \text{ avec des valeurs allant de } -1 \text{ à } 1.$$

Selon Sharma *et al.*, (2011), le NDVI basé sur la chlorophylle de la végétation verte absorbant les radiations solaires dans les bandes spectrales, et émettant dans la région proche infra-rouge est positivement corrélé avec le rendement en grain et pourrait servir de critère de sélection indirect pour améliorer le rendement.

# MATERIEL ET METHODES

Deux expérimentations sont réalisées : l'une en 1990 – 1991 et l'autre en 1991 – 1992.

## 1. Description du site

Les expérimentations sont réalisées à la station agronomique de l'Institut Technique des Céréales et Fourrages (ITCF) du Magneraud (Charente Maritime) en sol argilo-calcaire sur calcaire dur, sous abris mobiles.

## 2. Matériel végétal

Six variétés de blé tendre (Artaban, beauchamp, Festival, Scipion, Soissons, et Thésée) en 1991 et trois variétés de blé tendre (Festival, Soissons et Thésée) et une variété de blé dur (Ambral) en 1992 sont utilisées. Le choix de ces cultivars repose sur l'importance de leur surface cultivée et des paramètres d'obtention de rendement différenciés et surtout, ils présentent une phénologie assez proche.

## 3. Dispositifs expérimentaux

L'expérimentation en 1991 est menée en dispositif factoriel, en blocs aléatoires complets, à quatre répétitions (figure 5). Deux facteurs sont étudiés : l'irrigation et les variétés. L'irrigation comprend deux variantes : irrigation à l'ETM (ETM), et application d'un stress hydrique à partir du stade floraison (R1) (figure 6) ; le facteur variétés comprend six variantes (Artaban (A), Beauchamp (B), Festival (F), Scipion (SC), Soissons (S), et Thésée (T)). La surface de chaque parcelle élémentaire est de 30 m<sup>2</sup>.



Figure 5. Photo représentant le dispositif expérimental et les abris mobiles.



Figure 6. Photo montrant l'état de la culture avant l'application du stress.

En 1992, le dispositif expérimental utilisé est un criss cross avec trois répétitions. Chaque parcelle mesure 30 m<sup>2</sup>. Les régimes hydriques étudiés sont : irrigation à l'ETM, stress modéré (R1) et stress sévère (R2). Le stress modéré est appliqué à partir de la

floraison comme pour l'essai de 1991, tandis que le stress sévère est appliqué de la méiose à la maturité.

Chaque bloc comporte douze parcelles dans lesquelles sont affectés aléatoirement les douze objets. Un abri mobile, dont l'ouverture et la fermeture sont contrôlées automatiquement par l'intermédiaire d'un pluviographe et d'une plaque d'humectation, couvre chaque bloc. Dès que la pluie atteint 0,5 mm, les abris mobiles viennent couvrir la culture ; après l'arrêt des pluies, la plaque d'humectation se desséchant à la vitesse d'une feuille de blé, ils se retirent en position de replis.

#### **4. Itinéraire technique**

Les essais sont réalisés par un technicien très expérimenté. Les outils de grande culture sont utilisés dans toutes les opérations culturales avec, cependant, une très bonne précision, compte tenu, de la qualité du matériel et de la qualification du personnel.

Afin de pouvoir répondre aux intérêts des agriculteurs de la région, les conditions d'implantation sont celles recommandées par les services techniques régionaux.

Pour l'essai réalisé en 1991, la densité de semis a été de 330 grains /m<sup>2</sup>. Le précédent cultural est un pois avec fanes enfouies. Un labour à la charrue à socs a été réalisé le 18 octobre 1990 ; la reprise a été effectuée le 25 octobre à l'aide d'une herse rotative couplée à un rouleau plombeur. Le semis a été réalisé le 5 novembre 1990 à l'aide d'un semoir en lignes de 17,5 cm d'écartement à une profondeur moyenne de 2 cm.

Pour l'essai de 1992, le semis a été effectué le 8 novembre 1991 à une densité de 250 grains/m<sup>2</sup>. Le travail du sol a été réalisé de la même façon et avec les mêmes outils qu'en 1990.

Pour les deux essais, la protection de la culture est assurée au maximum, en évitant toute concurrence avec les mauvaises herbes et une protection fongique optimale. La fertilisation phospho-potassique est apportée avant semis en tenant compte des analyses du sol. La fertilisation azotée est estimée par la méthode du bilan prévisionnel pour un objectif de rendement de 100 q.ha<sup>-1</sup>. L'irrigation est pratiquée par des cadres

couvrant chaque parcelle irriguée. Ces cadres sont munis de tuyaux en pvc portant des buses assurant une irrigation assez homogène (figure 7) ; la dose est contrôlée par des compteurs volumétriques au niveau de chaque cadre.



Figure 7. Photo représentant les abris mobiles et le cadre d'irrigation en PVC.

## **5. Mesure du rendement en grain et de ses composantes**

Les composantes du rendement sont déterminées sur des placettes de 2 mètres linéaires contiguës identifiées dès le stade trois feuilles. Le choix des placettes est déterminant pour assurer l'homogénéité de ces dernières pour l'ensemble des parcelles. Quatre placettes sont identifiées par parcelle élémentaire.

## 6. Mesure de l'état hydrique de la plante

A partir du stade épiaison, l'état hydrique des différentes variétés est suivi par les potentiels hydriques foliaires de base (mesures effectuées avant le lever du soleil), midi solaire couplés aux teneurs relatives en eau.

### 6.1. Potentiel hydrique foliaire

Le potentiel hydrique foliaire est mesuré à l'aide de la chambre à pression de Scholander sur le tiers médian de la dernière feuille dont la ligule est visible. Un minimum de 6 feuilles est prélevé dans chaque parcelle du bloc 2.

### 6.2. Teneur relative en eau

La teneur en eau relative (RWC) est déterminée en même temps que les mesures du potentiel hydrique foliaire ( $\psi$ ) sur 9 feuilles étendards de même âge physiologique. Ces feuilles sont mises en sachets plastiques à fermeture avec glissière dans une glacière contenant de la glace pilée de façon à limiter au maximum les pertes en eau puis transportées immédiatement au laboratoire se trouvant à quelques mètres du champ expérimental. Sur chaque feuille, il est prélevé 4 cm centraux lesquels sont découpés à leur tour en morceaux de 2 cm. Ces parties de feuilles fraîches sont pesées (PF) puis mises dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée jusqu'à poids constant à l'abri de la lumière et à température constante de 23°C. Elles sont pesées après un essuyage soigneux (PT). Le poids sec (PS) est déterminé après passage à l'étuve ventilée pendant 36 heures à 80°C.

La teneur relative en eau (RWC) est estimée par la formule :

$$RWC \% = \frac{PF - PS}{PT - PS} \times 100$$

## 7. Consommation en eau et assèchement du sol

La consommation en eau (ETR) est suivie à l'aide d'une sonde à neutrons (solo 40) (figure 8). Les mesures sont effectuées tous les 20 cm jusqu'à une profondeur de 2,50 m. Pour cela, trois tubes en acier galvanisé sont implantés à intervalle d'un mètre au centre de chaque parcelle et ce, depuis 1987.



Figure 8 : Photo montrant la sonde à neutrons

La figure 9 montre la photo représentant les tensiomètres Nardeux utilisés pour le suivi de la disponibilité de l'eau dans le sol dans la parcelle Thésée conduite à l'ETM.



Figure 9. Photo montrant l'emplacement des tensiomètres.

### **8. Sénescence de la feuille étendard, de la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> feuille se trouvant en dessous**

La sénescence de la feuille étendard est notée visuellement suivant l'échelle de Darles. Pour minimiser l'influence de l'observateur, deux personnes apprécient le pourcentage de feuille desséchée sur plusieurs plantes réparties sur l'ensemble de chaque parcelle élémentaire.

### **9. Indice foliaire (LAI) et durée de vie des feuilles (LAD)**

Au stade floraison, 3 placettes de 2 x 1 mètre linéaire sont prélevées à ras du sol dans chaque parcelle et pesées. Un échantillon est utilisé pour déterminer le poids sec des parties aériennes. Cinq séries de 10 plantes sont prélevées pour estimer le rapport matière sèche (M.S.) des parties aériennes sur matière sèche des feuilles. On utilise 5 plantes par parcelle pour établir le rapport M.S. des feuilles sur la surface foliaire. Les surfaces foliaires (longueurs et largeurs) sont calculées en tenant compte des différents étages

foliaires et des pourcentages de surface verte et sénescence. On ne tient pas compte des surfaces lorsque la feuille est complètement sénescence.

Le LAI a été mesuré et le calcul du LAD (Leaf Area Duration ou durée de vie de la feuille) a été déterminé selon la formule donnée par Power *et al.* (1967) comme suit :

$$LAD = \sum \frac{(LAI_0 + LAI_1)}{2}(t_1 - t_0) \dots \frac{(LAI_5 + LAI_6)}{2}(t_6 - t_5)$$

Où

LAD : durée de vie de la surface de la feuille (LAI jours)

$LAI_0$  : Indice foliaire au temps  $t_0$

$LAI_1$  : Indice foliaire au temps  $t_1$

## 10. Indice de susceptibilité à la sécheresse

L'indice de susceptibilité à la sécheresse et/ou le pourcentage de réduction par rapport au régime conduit à l'ETM a été calculé comme suit :

$$\% \text{ Réduction} = \frac{(Y_p - Y_s)}{Y_p} * 100$$

Où

$Y_p$  : rendement d'un génotype donné sous conditions non stressante ;  $Y_s$  : rendement d'un génotype donné sous conditions de stress ;

$$SSI = \frac{1 - \left( \frac{Y_s}{Y_p} \right)}{1 - \left( \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p} \right)} \text{ (Fischer et Maurer, 1978)}$$

## 11. Radiométrie du couvert végétal

La réflectance des parcelles élémentaires est mesurée dès le stade floraison de la culture par radiométrie, en faisant la lecture 3 fois par parcelle. L'appareil est fixé sur une

potence de 3 mètres de haut. Les mesures sont effectuées en projetant l'appareil sur les zones où sont délimitées les placettes destinées à déterminer les composantes du rendement.

Avant toutes séries de mesures, l'appareil est étalonné sur plaque de couleur blanche et sur sol nu humide et sec. Les mesures sont effectuées toujours au même moment de la journée, au zénith, en temps clair.

Un radiomètre de simulation SPOT type CIMEL (Guyot *et al.*, 1983) a été utilisé pour mesurer les valeurs NIR et RED. Cet instrument donne la réflectance correspondant aux canaux spectraux du satellite SPOT (Dembele, 1989) :

- Canal 1 :  $\lambda$  environ 500 – 600 nm (vert),
- Canal 2 :  $\lambda$  environ 610 – 680 nm (rouge)
- Canal 3 :  $\lambda$  environ 790 – 890 nm (proche infrarouge).

Seuls deux canaux, rouge (RED) et proche infrarouge (NIR) ont été utilisés pour calculer l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Royo et Villegas, 2011) comme suit (Araus *et al.*, 2002) :

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

Où

NIR : valeur de réflectance dans le proche infrarouge, RED : valeur de réflectance dans le rouge.

La moyenne de NDVI était calculée à partir de 12 mesures (1991) et 14 mesures (1992) du 4 juin au 9 juillet et du 3 juin au 15 juillet respectivement. La formule du calcul du LAD a été aussi utilisée pour le calcul de la surface sous la courbe de NDVI.

$$Surface = \sum \frac{(NDVI_0 + NDVI_1)}{2} (t_1 - t_0) \dots \frac{(NDVI_5 + NDVI_6)}{2} (t_6 - t_5) \quad \text{Où}$$

Surface : Aire sous la courbe de NDVI

$NDVI_0$  : NDVI à la  $\Sigma$  température  $t_0$

$NDVI_1$  : NDVI à la  $\Sigma$  température  $t_1$

La figure 10 montre la photo du radiomètre utilisé pour le suivi de NDVI de la culture.



Figure 10. Photo montrant le radiomètre.

## 12. Traitement statistique des données

Les données du rendement en grain et de ses composantes ont fait l'objet d'une analyse de la variance à trois critères de classification : irrigation, variétés et blocs. Le logiciel STATITCF est utilisé pour la réalisation des calculs ; le test de Newman et Keuls est utilisé pour classer les moyennes quand l'analyse de la variance révèle un effet significatif du facteur.

Les autres mesures indiquant l'état hydrique de la feuille sont comparées par l'analyse de la variance à deux critères de classification à plusieurs observations (Dagnélie, 1970).

Les pourcentages de variation sont calculés selon les formules suivantes.

Pour les effets variétés :

$$\% \text{ variation} = \left( \frac{SCE_{\text{variété}}}{SCE_{\text{total}}} \right) * 100$$

Pour les effets régimes hydriques :

$$\% \text{ variation} = \left( \frac{SCE_{\text{régime}}}{SCE_{\text{total}}} \right) * 100$$

Pour les effets de l'interaction variété × régime hydrique

$$\% \text{ variation} = \left( \frac{SCE_{\text{interaction}}}{SCE_{\text{total}}} \right) * 100$$

# RESULTATS

## I. ESSAI REALISE EN 1991

### 1. Effet du stress hydrique sur le rendement en grain, les composantes de rendement, la biomasse et l'indice de récolte

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 1) montre des effets variétés très hautement significatifs ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) pour l'ensemble des caractères étudiés. L'effet régimes hydriques est significatif pour la majorité des caractères ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) à l'exception du nombre de pieds/m<sup>2</sup>, de l'indice de récolte et du poids de 1000 grains. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est non significative pour la majorité des caractères à l'exception du rendement en grain ( $p < 0,05$ ) et de l'indice de récolte ( $p < 0,001$ ). Les coefficients de variations sont inférieurs à 10 % pour la majorité des caractères.

La figure 11 montre une photo représentant une vue d'ensemble de l'effet du stress hydrique sur les différentes variétés utilisées dans l'essai.

La figure 12 (p. 37) montre l'effet du stress hydrique sur le rendement en grain, les composantes de rendement, la matière sèche provenant de la tige et celle provenant de la photosynthèse nette et l'indice de récolte.

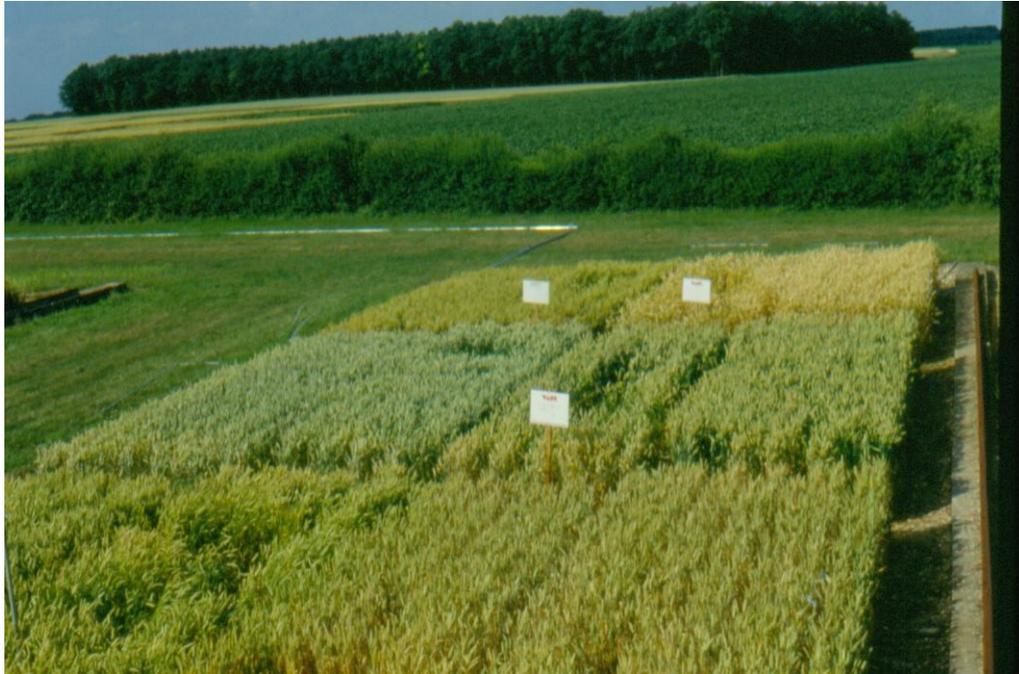


Figure 11. Photo montrant une vue d'ensemble de l'effet du stress hydrique sur les différentes variétés utilisées dans l'essai.

#### Rendement en grain

Le pourcentage de la variation expliqué par les effets génétiques représente 54,83 %, les effets régime hydrique expliquent 17,19 %, tandis que les effets de l'interaction variété  $\times$  régime hydrique expliquent 7,21 % (annexe 1, tableau 1).

La moyenne du rendement en grain (tableau 4) varie de 101,12 q.ha<sup>-1</sup> (Soissons) à 83,17 q.ha<sup>-1</sup> (Festival) dans le traitement à l'ETM. Dans les conditions de stress à partir du stade floraison (R1), la variété Scipion donne le plus fort rendement en grain avec 96,12 q.ha<sup>-1</sup> tandis que le plus faible rendement est donné par la variété Artaban avec 76,94 q.ha<sup>-1</sup>.

Le pourcentage de réduction moyen de toutes les variétés est de 7,01 %. La variété Artaban donne le pourcentage de réduction (tableau 4) par rapport à l'ETM le plus élevé avec 12,98 % suivie de la variété Soissons avec 11,84 %. Les variétés Beauchamp et Thésée présentent des pourcentages de réduction moyens avec respectivement 7,53 % et 6,16 %, tandis que la variété Scipion donne le plus faible pourcentage. La variété Festival ne semble pas être affectée par le stress hydrique.

### Biomasse aérienne

Les effets génétiques, régimes hydriques et interaction variétés × régimes hydriques (annexe 1, tableau 1) expliquent respectivement 25,48 %, 18,89 % et 8,32 %.

La moyenne de la biomasse aérienne varie de 639,59 g/0,35 m<sup>2</sup> (Soissons) à 588,61 g/0,35 m<sup>2</sup> (Artaban) (tableau 4). Le pourcentage moyen de réduction est de 5,29 %.

### Indice de récolte

Les effets génétiques, régimes hydriques et interaction variétés × régimes hydriques (annexe 1, tableau 1) expliquent respectivement 41,27 %, 0,48 % et 46,82 %.

Les moyennes (tableau 4) de l'indice de récolte varie de 0,43 (Festival) à 0,49 (Scipion) au niveau du régime conduit à l'ETM et de 0,51 (Soissons) à 0,39 (Artaban) au niveau du régime R1.

L'indice de récolte moyen n'est pas influencé par le stress hydrique. Le pourcentage de réduction (tableau 4) est variable selon les variétés, les variétés Artaban, Scipion et Beauchamp montrent une réduction respectivement de 11,36 %, 10,20 % et 4,35 %, par contre les variétés Thésée, Festival et Soissons présentent une augmentation de l'indice de récolte sous stress hydrique respectivement de 4,26 %, 13,95 % et 15,91 %.

### Nombre de pieds/m<sup>2</sup>

Les effets génétiques expliquent 61,37 % de la variation, les effets régimes hydriques 0,77 % et les effets d'interaction variétés × régimes hydriques 6,49 % (annexe 1, tableau 1).

La moyenne du nombre de pieds/m<sup>2</sup> varie de 353,69 (Scipion) à 268,33 (Artaban) (tableau 4).

Les variétés se comportent de la même façon dans les deux régimes hydriques et ne sont pas affectées par le stress hydrique.

### Nombre d'épis/plante

Les effets génétiques, régimes hydriques et interaction variétés × régimes hydriques expliquent respectivement 82,12 %, 2,01 % et 2,74 % (annexe 1, tableau 1).

La moyenne du nombre d'épis/plante (tableau 4) varie de 2,50 (Soissons) à 1,63 (Thésée). Les variétés se comportent de la même façon dans les deux régimes hydriques.

Le pourcentage de réduction moyen de toutes les variétés est de 4,29 %.

#### Nombre d'épis/m<sup>2</sup>

Les effets génétiques, régimes hydriques et interaction variétés × régimes hydriques expliquent respectivement 89,88 %, 1,89 % et 0,59 % (annexe 1, tableau 1).

Comme pour le nombre d'épis/plante, les variétés se comportent de façon identique dans les deux régimes hydriques. La variété Festival donne le plus grand nombre d'épis/m<sup>2</sup> tandis que la variété Artaban donne le plus petit nombre d'épis/m<sup>2</sup> avec respectivement 612,25 et 418,45 (tableau 4).

Le pourcentage moyen de réduction est de 4,28 %.

#### Nombre de grains/épi

Les effets génétiques, régimes hydriques et interaction variétés × régimes hydriques expliquent respectivement 85,93 %, 2,48 % et 2,60 % (annexe 1, tableau 1).

La moyenne du nombre de grains/épi varie de 42,20 (Thésée) à 33,24 (Festival) (tableau 4). Le stress hydrique a un effet identique sur toutes les variétés.

Le pourcentage moyen de réduction est de 2,73 %.

#### Nombre de grains/m<sup>2</sup>

Les effets génétiques, régimes hydriques et interaction variétés × régimes hydriques expliquent respectivement 87,01 %, 5,20 % et 0,22 % (annexe 1, tableau 1).

Le nombre de grains/m<sup>2</sup> moyen varie de 23 090 (Soissons) à 14 166 (Artaban) (tableau 4). Le stress hydrique a un effet identique sur toutes les variétés.

Le pourcentage moyen de réduction est de 6,75 %.

#### Poids de 1000 grains

Les effets génétiques, les effets régimes hydriques et les effets d'interaction variétés × régimes hydriques expliquent respectivement de 94,35 %, 0,01 % et 0,34 % (annexe 1, tableau 1).

Le poids de 1000 grains moyen varie de 58,34 g (Artaban) à 40,61 g (Soissons) (tableau 4).

## **2. Effet du stress hydrique sur la production de matière sèche de différents organes de la plante à la floraison et à la récolte**

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 2) montre un effet variétés significatif ( $p < 0.05$  à  $p < 0.001$ ) pour la majorité des caractères à l'exception de la matière sèche des feuilles à la floraison, un effet régimes hydriques significatif ( $p < 0.05$  à  $p < 0.001$ ) pour la matière sèche de la tige à la floraison ( $p < 0,001$ ), matière sèche de l'épi à la récolte ( $p < 0,001$ ), matière sèche des tiges à la récolte ( $p < 0,05$ ) et matière sèche de la biomasse à la récolte ( $p < 0,001$ ). L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est non significative pour tous les caractères. Les coefficients de variations sont inférieurs à 6,5 % à l'exception des caractères indice foliaire (13,8 %) et matière sèche des feuilles/0,35 m<sup>2</sup> (14,12 %). La distribution de la matière sèche à la floraison et à la récolte est présentée dans le tableau 5.

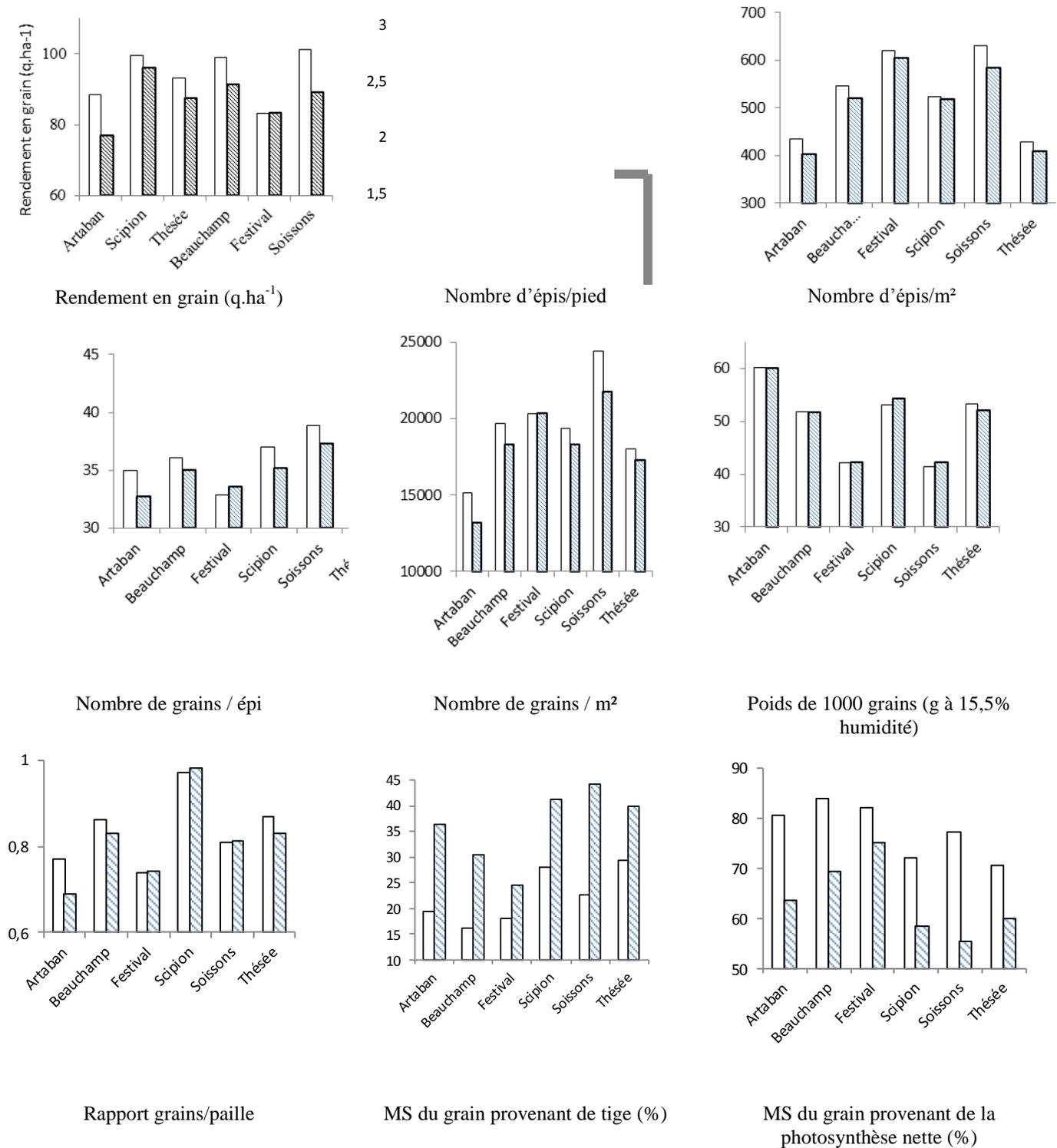
Une grande portion de la somme des carrés des écarts est due aux effets génétiques allant de 96,39 % pour la matière sèche d'une tige à la floraison à 16,82 % pour la matière sèche des feuilles à la floraison et de 32,72 % pour la matière sèche des feuilles à 100 % pour la matière sèche d'un épi à la récolte (annexe 1, tableau 2). L'effet régimes hydriques présente pour tous les caractères une portion de la somme des carrés des écarts plus petite que les effets génétiques allant de 0,04 % pour la matière sèche de la biomasse à la floraison à 5,98 % pour la matière sèche d'une tige à la récolte (annexe 1, tableau 1) et de 0 % pour la matière sèche d'un épi à 4,42 % pour la matière sèche des tiges à la récolte.

Tableau 4 : Moyennes et pourcentages de réduction du rendement, de ses composantes, de la biomasse et de l'indice de récolte

Variétés et moyennes des régimes	Rendement en grain (q.ha <sup>-1</sup> )				Pieds/m <sup>2</sup>	épis/plante	Epis/m <sup>2</sup>	Grains/épi	Grains/m <sup>2</sup>	biomasse	Poids de 1000 grains (g)	Indice de récolte			
	Moyenne des variétés	ETM	R1	% réduc.								Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	<b>82,67 c</b>	88,41 cde	<b>76,94 f</b>	<b>12,98</b>	<b>268,33 b</b>	1,75 c	<b>418,45 c</b>	33,86 d	<b>14166,25 e</b>	<b>588,61 c</b>	<b>58,34 a</b>	0,41 c	0,44 d	0,39 e	11,36
Scipion	<b>97,78 a</b>	99,45 ab	<b>96,12 abc</b>	<b>3,35</b>	<b>353,69 a</b>	2,02 b	521,00 b	36,11 c	18802,63 c	604,05 bc	52,15 b	0,46 b	0,49 b	0,44 d	10,20
Thésée	90,26 b	93,14 bcd	87,4 de	6,16	333,81 a	<b>1,63 c</b>	418,63 c	<b>42,20 a</b>	17655,75 d	599,07 bc	51,15 b	<b>0,48 a</b>	0,47 bc	0,49 b	-4,26
Beauchamp	95,24 a	98,97 ab	91,52 cd	7,53	343,39 a	2,07 b	533,38 b	35,55 c	18969,13 c	632,18 ab	50,24 b	0,45 b	0,46 bc	0,44 cd	4,35
Festival	83,26 c	<b>83,17 ef</b>	83,35 ef	-0,22	349,64 a	2,36 a	<b>612,25 a</b>	<b>33,24 d</b>	20303,88 b	594,58 bc	41,01 c	0,46 b	0,43 d	0,49 b	-13,95
Soissons	95,14 a	<b>101,12 a</b>	89,15 cde	11,84	335,95 a	<b>2,50 a</b>	606,88 a	38,08 b	<b>23090,00 a</b>	<b>639,59 a</b>	<b>40,61 c</b>	0,48 a	0,44 cd	<b>0,51 a</b>	<b>-15,91</b>
Moy ETM	<b>94,05 a</b>				334,03	<b>2,10 a</b>	<b>529,77 a</b>	<b>37,01 a</b>	<b>19489,29 a</b>	<b>626,24 a</b>	48,85	0,45			
Moy R1	87,41 b				327,58	2,01 b	507,08 b	36,00 b	18173,25 b	593,13 b	48,98	0,46			
% réduc.	7,06					4,29	4,28	2,73	6,75	5,29 %					

NB: réduc. = réduction ; ART = Artaban.

Le rendement et le poids de 1000 grains ont été calculés sur la base de 15 % d'humidité.



□ ETM    ▨ R1

Figure 12. Rendement et ses composantes (épis/pied ; épis/m<sup>2</sup> ; grains/épi ; grains/m<sup>2</sup> ; pmg : poids de 1000 grains) ; grain/paille ; MS du grain provenant de la tige (%) et provenant de la photosynthèse nette (%) par variétés et régime hydrique ETM et stressé à partir de la floraison R1.

A la floraison (tableau 5), la matière sèche des feuilles varie de 81,44 g/0,35 m<sup>2</sup> (Beauchamp) à 98,46 g (Scipion). Artaban donne la plus faible matière sèche des épis (45,68 g), tandis que Soissons donne la plus grande valeur (62,81 g). La matière sèche de la tige la plus élevée est donnée par Artaban (1,95 g) et la plus faible est donnée par Festival (1,23 g). La moyenne de la biomasse varie de 470,88 g/0,35 m<sup>2</sup> (Soissons) à 405,02 g (Festival). Concernant les régimes hydriques, le traitement à l'ETM donne les moyennes les plus élevées pour la matière sèche des épis/0,35 m<sup>2</sup> (55,52 g) et la matière sèche de la tige (1,68 g).

A la récolte (tableau 5), Artaban donne la plus forte matière sèche de l'épi (0,29 g) et Festival la plus faible (0,22g). Concernant la matière sèche de la tige et des feuilles/0,35 m<sup>2</sup>, Artaban donne les plus fortes valeurs avec 1,47 g et 77,42 g respectivement, les valeurs les plus faibles sont données par Festival (0,98 g) pour la matière sèche de la tige, Scipion pour la matière sèche des feuilles (65,37 g). Les valeurs moyennes de la matière sèche des tiges/0,35 m<sup>2</sup> varient de 231,15 g (Beauchamp) à 192,77 g (Scipion). Concernant les régimes hydriques, c'est le traitement à l'ETM qui donne les moyennes les plus élevées pour la matière sèche de l'épi (0,26 g) et la matière sèche des tiges (218,58 g).

L'application d'un stress hydrique modéré (R1) provoque une réduction de la matière sèche des épis/0,35 m<sup>2</sup> (3,93 %) et d'une tige à la floraison et à la récolte (12,50 % et 8,20 % respectivement), et la matière sèche d'un épi (3,85 %) et des tiges (3,12 %) à la récolte (tableau 5).

Tableau 5. Moyennes et pourcentages de réduction de l'indice foliaire et de la matière sèche à la floraison et à la récolte

Variétés et moyennes des traitements	Indice foliaire LAI	Matière sèche à la floraison				Matière sèche à la récolte			
		feuilles/0,35 m <sup>2</sup> (g)	épis/0,35 m <sup>2</sup> (g)	Biomasse/0,35 m <sup>2</sup> (g)	1 Tige (g)	1 épi	1 Tige (g)	tiges/0,35 m <sup>2</sup>	Feuilles/0,35 m <sup>2</sup>
Artaban	4,16 b	87,45	<b>45,68 d</b>	407,67 c	<b>1,95 a</b>	<b>0,29 a</b>	<b>1,47 a</b>	223,81 a	<b>77,42 a</b>
Scipion	<b>5,59 a</b>	<b>98,46</b>	63,16 a	461,27 ab	1,59 b	0,27 b	1,01 d	<b>192,77 c</b>	<b>65,37 b</b>
Thésée	3,89 b	94,45	50,73 c	441,15 abc	2,01 a	0,28 a	1,36 b	203,79 b	73,21 ab
Beauchamp	<b>3,36 b</b>	<b>81,44</b>	54,49 b	427,15 bc	1,54 bc	0,24 c	1,18 c	<b>231,15 a</b>	65,91 b
Festival	4,00 b	90,61	49,21 c	<b>405,02 c</b>	<b>1,23 d</b>	<b>0,22 d</b>	<b>0,98 c</b>	219,50 a	74,54 ab
Soissons	3,67 b	93,10	<b>62,81 a</b>	<b>470,88 a</b>	1,47 c	0,24 c	1,01 d	220,00 a	75,94 ab
Moy ETM	3,96	90,19	55,52 a	434,77	1,68 a	0,26 a	1,22 a	218,58 a	72,56
Moy R1	4,26	91,65	53,34 b	436,27	1,47 b	0,25 b	1,12 b	211,76 b	71,68
% réduction par rapport à l'ETM			3,93		12,50	3,85	8,20	3,12	

### 3. Effet du stress hydrique sur la translocation et la remobilisation de la matière sèche

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 3) montre des différences significatives ( $p < 0,001$ ) entre les variétés et entre les régimes hydriques et une interaction variétés  $\times$  régimes hydriques non significative pour les deux caractères. Les coefficients de variation des assimilats provenant de la tige (remobilisation) et provenant de la photosynthèse (translocation) sont élevés (18,6 % et 20,1 % respectivement).

L'effet régimes hydriques explique plus la variabilité détectée au niveau de ces caractères soit 39,79 % (effet régimes hydriques) contre 37,70 % (effets génétiques) pour la remobilisation et 44,50 % (effet régimes hydriques) contre 27,05 % pour la translocation (Annexe 1, tableau 3).

La moyenne des assimilats des grains (tableau 6) provenant de la tige varie de 34,75 % (Thésée) à 21,32 % (Festival), tandis que la photosynthèse nette varie de 65,25 % (Thésée) à 78,68 % (Festival). Le régime R1 donne des valeurs supérieures au régime conduit à l'ETM au niveau de la tige, par contre la photosynthèse présente des valeurs supérieures dans le régime à l'ETM. Le stress hydrique provoque une réduction de la

translocation de 21,96 % et une augmentation de la remobilisation de 38,62 %. La diminution de la translocation s'est faite au profit de la remobilisation.

Tableau 6. Moyennes et pourcentages de réduction des assimilats remobilisés (remobilisation) à partir de la tige et provenant de la photosynthèse (translocation)

Variétés, moyennes des traitements et % de réduction	Remobilisation	Translocation
Artaban	27,84 ab	72,16 ab
Scipion	34,72 a	65,28 b
Thésée	<b>34,75 a</b>	<b>65,25 b</b>
Beauchamp	23,32 b	76,68 a
Festival	<b>21,32 b</b>	<b>78,68 a</b>
Soissons	33,56 a	66,45 b
Moy ETM	22,25 b	<b>77,75 a</b>
Moy R1	<b>36,25 a</b>	63,75 b
% réduction par rapport à l'ETM	-38,62	21,96

#### 4. Indice foliaire (LAI) au stade floraison

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 2) de ce caractère mesuré à la floraison montre des différences significatives ( $p < 0,001$ ) entre les variétés, et non significative pour les régimes hydriques étudiés et les effets interaction variétés  $\times$  régimes hydriques. Les effets variétés expliquent 61,13 % de la variabilité, tandis que les effets régime hydrique et interaction variétés  $\times$  régimes hydriques expliquent respectivement 2,72 et 9,75 % de la variabilité. Le coefficient de variation est de 13,8 %.

La moyenne de l'indice foliaire (tableau 5) varie de 3,36 (Beauchamp) à 5,59 (Scipion).

#### 5. Evolution de la sénescence des feuilles

##### 5.1. Sénescence de la feuille étendard

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 4) montre des différences entre variétés et entre les régimes hydriques significatives ( $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception du 14 Juin pour les régimes hydriques. L'interaction est significative ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception des 14 et 18 Juin.

L'effet régimes hydriques (annexe 1, tableau 4) explique plus la variabilité du caractère que l'effet variété allant de 78,24 % (29 Juin) à 50,85 % (3 Juillet) à l'exception du 18 Juin où l'effet variété est supérieur à l'effet régime hydrique (77,82 % et 59,51 % respectivement).

Les coefficients de variation (annexe 1, tableau 4) varient de 2,61 % (14 Juin) à 55,82 % (3 Juillet). Ces valeurs montrent que l'hétérogénéité augmente régulièrement de la première à la dernière date de mesure.

Le pourcentage de réduction moyen (tableaux 7 et 8) par rapport à l'ETM augmente avec l'âge de la feuille allant de 1,37 % (14 Juin) à 96,03 % (3 Juillet). La variété Artaban est celle qui présente la plus forte réduction quelle que soit la date de mesure à l'exception du 3 Juillet où toutes les variétés ont présenté 100 % de réduction et seule la variété Beauchamp présente encore une surface verte et montre la plus faible réduction avec 87,76 %.

## 5.2. Sénescence de la deuxième feuille

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 5) montre des différences significatives ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) entre les variétés, les régimes hydriques et l'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques à l'exception du 14 Juin pour l'effet variétés et du 18 Juin pour l'interaction.

Comme pour la feuille étendard, l'effet régimes hydriques explique plus la variabilité du caractère que l'effet variétés (annexe 1, tableau 5) avec des pourcentages allant de 29,26 % (3 Juillet) à 82,22 % (25 Juin) pour les régimes hydriques et de 7,42 % (25 Juin) à 20,60 % (3 Juillet) pour l'effet variétés.

Le pourcentage de réduction moyen (tableaux 9 et 10) par rapport à l'ETM varie de 9,14 % (14 Juin) à 100 % (3 Juillet.). La variété Scipion présente la plus forte réduction avec 80 % (23 Juin) et 89,66 % (25 Juin). Pour le 29 Juin, les réductions sont à peu près identiques allant de 80,35 % (Beauchamp) à 97,83 % (Festival). Pour le 1 Juillet, toutes les variétés présentent au niveau du régime R1 un pourcentage de surface verte identique statistiquement et égal à zéro. Au 3 Juillet, la deuxième feuille de toutes les variétés est sénescence au niveau du régime R1.

### 5.3. Sénescence de la troisième feuille

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 6) montre des différences significatives entre les variétés ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) et entre les régimes hydriques ( $p < 0,001$ ). L'interaction est significative uniquement pour le 23 Juin ( $p < 0,05$ ) et le 25 Juin ( $p < 0,001$ )/

Comme pour les deux précédentes feuilles, l'effet régimes hydriques explique plus la variabilité du pourcentage de surface verte que l'effet variétés avec des valeurs allant de 7,98 % (23 Juin à 17,36 % (14 Juin) et de 39,22 % (14 Juin) à 67,71 % (23 Juin) respectivement (annexe 1, tableau 6).

Les coefficients de variation (annexe 1, tableau 6) sont élevés allant de 24,04 % (14 Juin) à 58,04 % (23 Juin).

Le pourcentage de réduction varie de 34,84 % (14 Juin) à 100 % (25 Juin) (tableau 11). Au 25 Juin, toutes les variétés présentent un pourcentage de surface verte égale à zéro et donc un pourcentage de réduction de 100 %.

### 5.4. Durée de vie de la feuille étendard

La comparaison des surfaces vertes des courbes de la feuille étendard dans les deux régimes (tableau 12) montre qu'au niveau du régime conduit à l'ETM, la variété Soissons présente la plus grande surface ( $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^\circ\text{j}$ ) et la variété Scipion la plus petite surface de la courbe. Ces mesures montrent que Soissons est la plus tardive et Scipion la plus précoce au niveau de ce caractère. Au niveau du régime R1, la variété Thésée présente la plus grande surface verte tandis que la variété Festival la plus petite surface verte.

Le pourcentage de réduction de la surface de la courbe (tableau 12) montre que la variété Scipion est celle qui est la moins touchée par le stress hydrique (13,61 %) suivie de Thésée (15,26 %) et de Beauchamp (16,07 %), tandis que la variété Soissons (23,08 %) est la plus affectée par le stress hydrique suivie des variétés Artaban (22,33 %) et Festival (22,99 %).

Le classement des moyennes de la surface des courbes ( $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^\circ\text{j}$ ) des variétés et de l'importance de la réduction par rapport au régime conduit à l'ETM est le suivant :

ETM : Soissons > Artaban > Thésée > Beauchamp > Festival > Scipion

R1 : Thésée > Beauchamp > Soissons > Scipion > Artaban > Festival

Réduction (%) : Soissons > Festival = Artaban > Beauchamp > Thésée > Scipion

Les figures 13 et 14 montrent l'évolution de la sénescence du feuillage par étage foliaire et régime hydrique pour chaque variété en fonction de la somme des températures depuis l'épiaison.

La sénescence semble être liée à l'âge de la feuille, les feuilles apparues les premières sont les premières à vieillir. Pour une somme de température égale, Artaban et Soissons gardent leur troisième étage foliaire vert plus longtemps à l'ETM ; en R1 la variété Artaban suivie de la variété Festival semblent se détacher des autres variétés pour la feuille étendard.

Le fléchissement prononcé des courbes est atteint à des sommes de températures depuis l'épiaison plus faibles (environ 100 °j en moins) en régime restrictif.

La figure 15 compare la sénescence de la feuille étendard pour les deux régimes hydriques par variété. Le régime R1 a bien induit une réduction de la surface verte de la feuille étendard.

Tableau 7. Moyennes et pourcentages de réduction de la surface verte de la feuille étendard (en %)

Variétés et moyennes des traitements	dates												
	14 Juin	18 Juin				23 Juin				25 Juin			
	Moy. Var.	Moy. Var.	Moy. ETM.	Moy. R1	% réduc.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.
Artaban	87,50 cd	85,63 ab	88,75 ab	82,50 bc	7,04	67,50 d	88,75 a	46,25 d	<b>47,89</b>	53,13 c	80,00 a	26,25 d	<b>67,19</b>
Scipion	90,00 bcd	86,88 ab	88,75 ab	85,00 abc	4,23	70,00 cd	87,50 a	52,50 d	40,00	64,38 abc	81,25 a	47,50 c	41,54
Thésée	95,00 a	91,88 a	93,75 a	90,00 ab	4,00	80,63 ab	91,25 a	70,00 bc	23,29	73,75 ab	87,50 a	60,00 bc	31,43
Beauchamp	91,25 abc	89,38 a	90,00 ab	88,75 ab	<b>1,39</b>	85,00 a	90,00 a	80,00 ab	<b>11,11</b>	78,13 a	85,00 a	71,25 ab	<b>16,18</b>
Festival	86,88 d	82,50 b	87,50 ab	77,50 c	<b>11,43</b>	64,38 d	81,25 ab	47,50 d	41,54	60,00 bc	77,50 ab	42,50 c	45,16
Soissoisn	91,88 ab	90,00 a	93,75 a	86,25 ab	8,00	76,25 bc	90,00 a	62,50 c	30,56	67,50 ab	86,25 a	48,75 c	43,48
Moy ETM	91,04	90,42 a				88,13				82,92 a			
Moy R1	89,79	85,00 b				59,79				49,38 b			
% réduction par rapport à l'ETM	1,37	5,99				32,16				40,45			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 8. Moyennes et pourcentages de réduction de la surface verte de la feuille étendard (en %) (suite)

Variétés et moyennes des traitements	dates											
	29 Juin				1 Juillet				3 Juillet			
	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.
Artaban	39,38 bc	73,75 ab	5,00 d	<b>93,22</b>	24,38 b	47,50 bc	1,25 e	<b>97,37</b>	12,50 bc	25,00 c	0,00 d	100
Scipion	34,38 c	61,25 bc	7,50 d	87,76	16,88 b	30,00 cd	3,75 e	87,50	5,00 c	10,00 cd	0,00 d	100
Thésée	48,13 b	78,75 a	17,50 d	77,78	26,88 b	48,75 bc	5,00 e	89,74	12,50 bc	25,00 c	0,00 d	100
Beauchamp	66,88 a	85,00 a	48,75 c	<b>42,65</b>	43,75 a	65,00 a	22,50 de	<b>65,38</b>	34,38 a	61,25 a	7,50 cd	<b>87,76</b>
Festival	33,13 c	60,00 bc	6,25 d	89,58	15,63 b	30,00 cd	1,25 e	95,83	10,00 c	20,00 cd	0,00 d	100
Soissons	45,00 bc	83,75 a	6,25 d	92,54	31,25 b	60,00 ab	2,50 e	95,83	23,75 b	47,50 b	0,00 d	100
Moy ETM	73,75 a				46,88 a				31,46 a			
Moy R1	15,21 b				6,04 b				1,25 b			
% réduction par rapport à l'ETM	79,38				87,12				96,03			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 9. Moyennes et pourcentages de réduction de la surface verte de la deuxième feuille (en %)

Variétés et moyennes des traitements	dates													
	14 Juin	18 Juin	23 Juin				25 Juin				29 Juin			
	Moy. Var.	Moy. Var.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.
Artaban	82,50	76,88	54,38 bc	82,50 a	26,25 c	68,18	43,13 b	77,50 a	8,75 d	88,71	40,00 a	76,25 a	3,75 c	95,08
Scipion	86,25	77,50	45,00 c	75,00 a	15,00 c	<b>80,00</b>	40,00 b	72,50 a	7,50 d	<b>89,66</b>	16,25 b	31,25 b	1,25 c	96,00
Thésée	86,25	83,13	66,25 ab	85,00 a	47,50 b	44,12	56,88 a	80,00 a	33,75 bc	57,81	36,25 a	65,00 a	7,50 c	88,46
Beauchamp	86,25	83,13	70,63 a	83,75 a	57,50 b	<b>31,34</b>	61,88 a	78,75 a	45,00 b	42,86	41,88 a	70,00 a	13,75 c	<b>80,35</b>
Festival	81,25	71,88	51,88 c	80,00 a	23,75 c	70,31	40,63 b	68,75 a	12,50 d	<b>34,55</b>	29,38 a	57,50 a	1,25 c	<b>97,83</b>
Soissons	86,88	81,88	66,25 ab	87,50 a	45,00 b	48,57	49,37 ab	80,00 a	18,75 cd	76,56	38,38 a	73,75 a	3,00 c	95,93
Moy ETM	88,96 a	87,71 a	82,29 a				76,25 a				62,29 a			
Moy R1	80,83 b	70,42 b	35,83 b				21,04 b				5,08 b			
% réduction par rapport à l'ETM	9,14	19,71	56,46				72,41				91,84			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 10. Moyennes et pourcentages de réduction de la surface verte (en %) de la deuxième feuille (suite)

Variétés et moyennes des traitements	dates							
	1 Juillet				3 Juillet			
	Moy. Var.	Moy. ETM.	Moy. R1	% réduc.	Moy. Var.	Moy. ETM	Moy. R1	% réduc.
Artaban	23,75 ab	47,50 a	0,00 c	<b>100</b>	6,25 b	12,50 b	0,00 b	100
Scipion	1,88 d	3,75 c	0,00 c	100	0,63 b	1,25 b	0,00 b	100
Thésée	16,88 bc	30,00 b	3,75 c	<b>87,50</b>	4,38 b	8,75 b	0,00 b	100
Beauchamp	33,13 a	60,00 a	6,25 c	89,58	20,00 a	40,00 a	0,00 b	100
Festival	9,38 cd	18,75 bc	0,00 c	100	3,13 b	6,25 b	0,00 b	100
Soissons	22,50 ab	45,00 a	0,00 c	100	14,38 ab	28,75 a	0,00 b	100
Moy ETM	34,17 a				16,25 a			
Moy R1	1,67 b				0,00 b			
% réduction par rapport à l'ETM	95,11				100			

NB: % réduc. = % de réduction

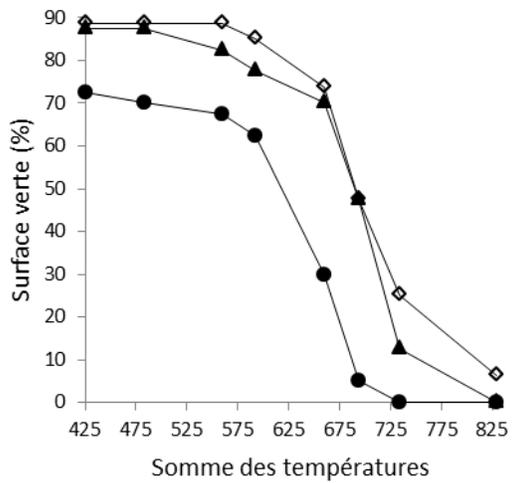
Tableau 11. Moyennes et pourcentages de réduction de la surface verte de la troisième feuille (en %)

Variétés et moyennes des régimes	dates									
	14 Juin	18 Juin	23 Juin				25 Juin			
	Moyenne des variétés	Moyenne des variétés	Moyenne des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moyenne des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	60,63 a	48,13 a	33,75 ab	67,50 a	0,00 c	100	31,25 a	62,50 ab	0,00 d	100
Scipion	47,50 ab	18,13 b	15,00 b	30,00 bc	0,00 c	100	5,00 b	10,00 d	0,00 d	100
Thésée	46,88 ab	41,25 ab	20,63 ab	40,00 b	1,25 c	96,88	22,50 ab	45,00 abc	0,00 d	100
Beauchamp	38,13 b	30,00 ab	15,63 ab	31,25 bc	0,00 c	100	12,50 b	25,00 cd	0,00 d	100
Festival	48,75 ab	26,88 ab	21,25 ab	42,50 b	0,00 c	100	20,00 ab	40,00 bc	0,00 d	100
Soissons	54,38 a	41,88 ab	35,00 a	70,00 a	0,00 c	100	33,75 a	67,50 a	0,00 d	100
Moy ETM	59,79 a	52,71 a	46,88 a				41,67 a			
Moy R1	38,96 b	16,04 b	0,21 b				0,00 b			
% réduction	34,84	69,57	99,55				100			

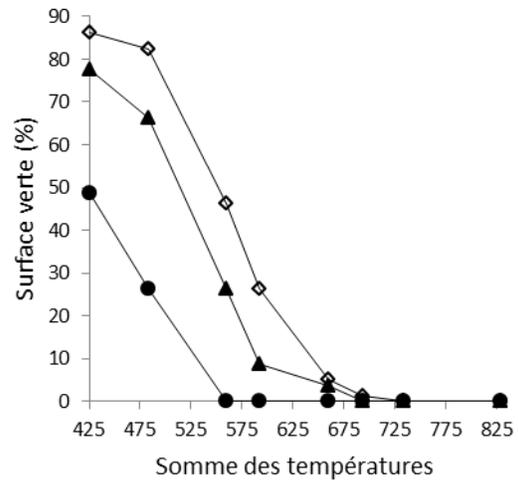
NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 12. Surface des courbes et pourcentages de réduction de la feuille étendard

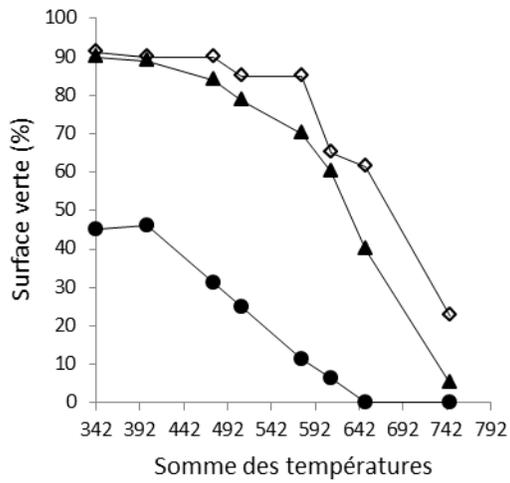
Variétés	Feuille étendard (cm <sup>2</sup> .d°j)		% de réduction
	ETM	R1	
Soissons	65482,84	50370,38	23,08
Artaban	62855,60	48821,34	22,33
Thésée	62207,63	52711,94	15,26
Beauchamp	60975,27	51179,28	16,07
Festival	58404,38	44978,34	22,99
Scipion	57605,00	49765,91	13,61



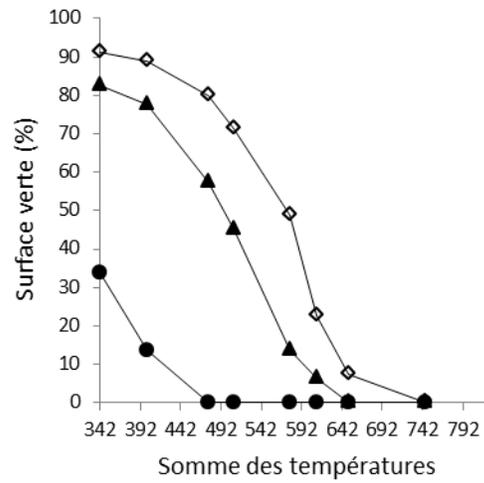
Artaban ETM



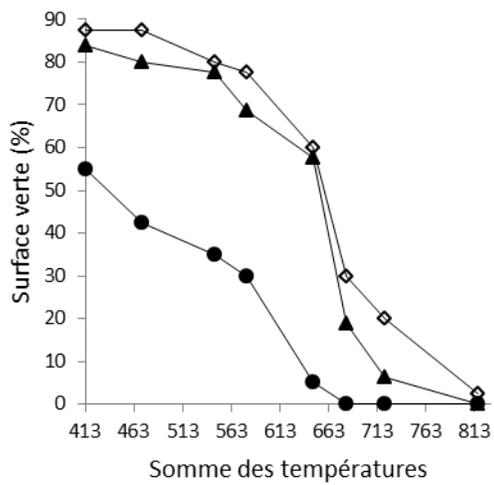
Artaban R1



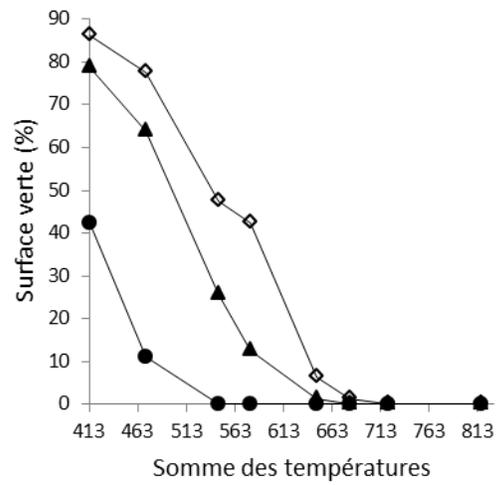
Beauchamp ETM



Beauchamp R1



Festival ETM



Festival R1

Figure 13. Evolution de la surface verte (%) en fonction de la somme des températures depuis l'épaison selon les régimes hydriques et les variétés (Artaban, Beauchamp et Festival). □ feuille étendard, ▲ 1ère feuille en dessous, ● 2ème feuille en dessous.

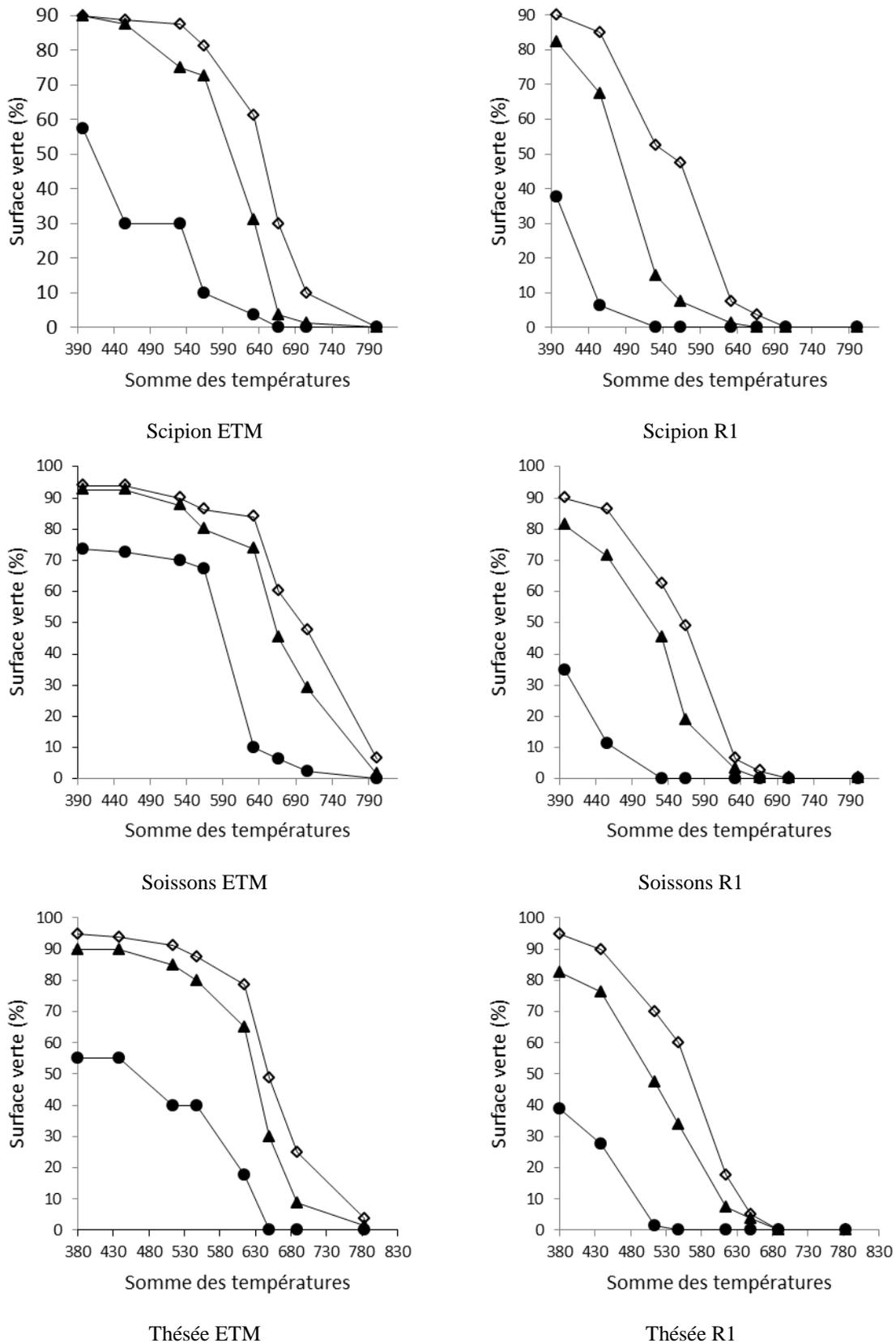
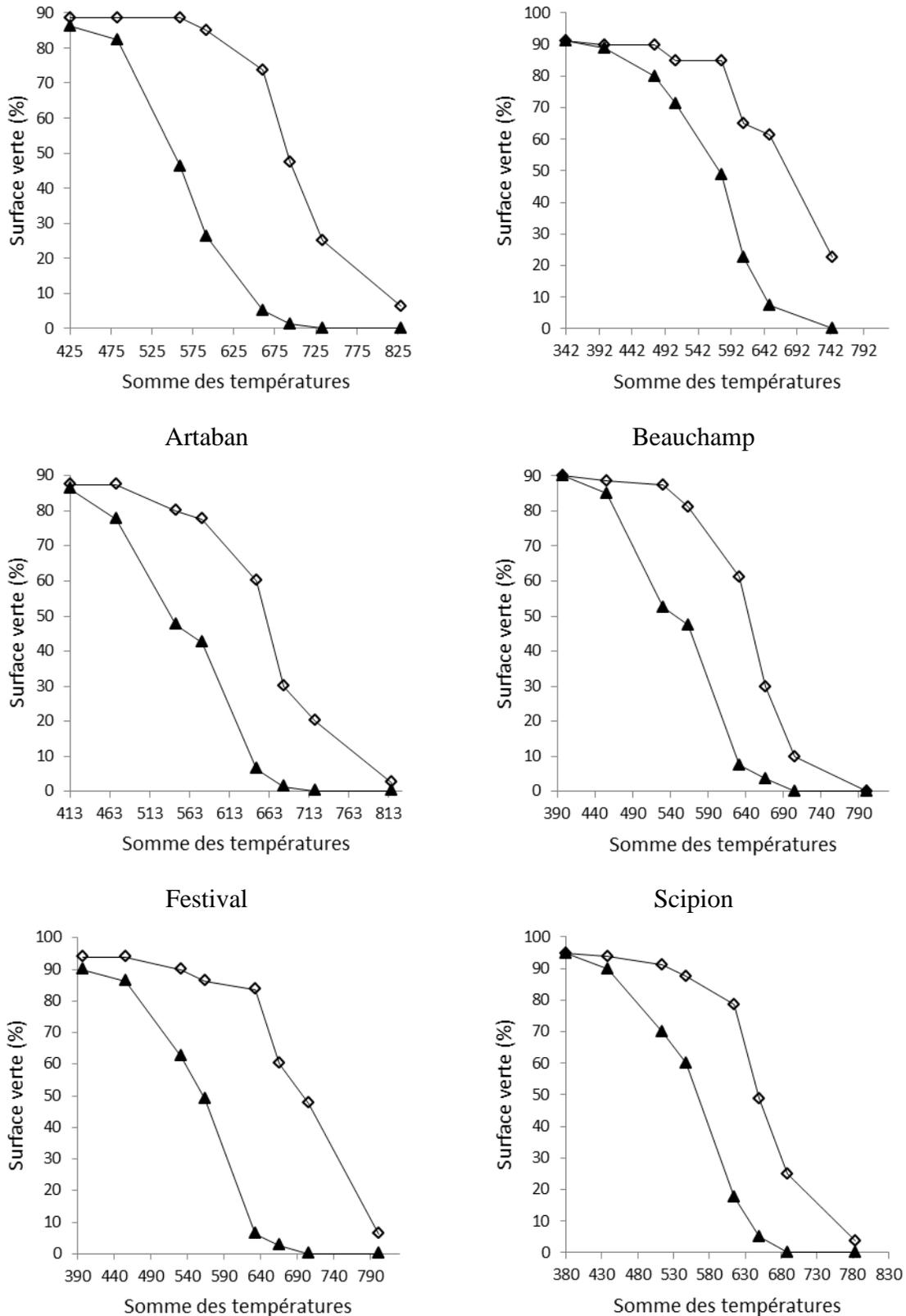


Figure 14. Evolution de la surface verte (%) en fonction de la somme des températures depuis l'épaison selon les régimes hydriques et les variétés (Scipion, Soissons et Thésée). □ feuille étandard, ▲ 1ère feuille en dessous, ● 2ème feuille en dessous.



Soissons

Thésée

Figure 15. Comparaison des régimes ETM et R1 au niveau de la feuille étendard de chaque variété. □ ETM, ▲ R1

## **6. Effet du stress hydrique sur la consommation en eau de la culture (ETR)**

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 7) montre des différences significatives entre les variétés ( $p < 0,001$ ) pour les périodes Avril - Mai et Mai - Juillet, et les effets régimes hydriques significatifs ( $p < 0,001$ ) pour les périodes Mai - Juillet et Avril - Juillet. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques n'est significative ( $p < 0,001$ ) que pour la période Mai - Juillet. Les coefficients de variation (annexe 1, tableau 7) sont faibles allant de 6,42 % (Avril - Juillet) à 10,92 % (Avril - Mai).

Pour la période Avril - Mai les effets génétiques expliquent 69,56 % de la variabilité détectée et ils sont de loin supérieurs à ceux des effets régimes hydriques et interaction variétés  $\times$  régimes hydriques (annexe 1, tableau 7).

Pour les périodes Mai - Juillet et Avril - Juillet l'effet régimes hydriques explique respectivement 92,68 % et 90,92 % de la variabilité observée.

Les moyennes de l'ETR (tableau 13) pour la période allant d'avril à mai varient de 76,58 mm (Beauchamp) à 54,61 mm (Artaban). Les deux régimes présentent des ETR statistiquement équivalents.

Pour la période allant de mai à juillet (tableau 13), à l'ETM, la variété Festival donne la valeur la plus élevée (204,08 mm), tandis que la variété Beauchamp la valeur la plus faible (186,21 mm). Au niveau du régime R1, la variété Soissons donne la plus faible valeur (125,25 mm) et Beauchamp la plus forte valeur (186,21 mm). L'ETR dans le régime conduit à l'ETM représente environ deux fois la valeur de l'ETR dans le régime R1 soit 197,30 mm et 105,79 mm respectivement soit une réduction de 46,38 %. La plus forte réduction pour cette période est enregistrée par Artaban (52,19 %) et la plus faible réduction est enregistrée par Soissons (37,06 %).

Pour la période allant d'avril à juillet (tableau 13), les valeurs de l'ETR au niveau du régime ETM varient de 263,08 mm (Thésée) à 244,25 mm (Artaban). Au niveau du régime R1, les moyennes varient de 179 mm (Soissons) à 159,08 (Artaban). Le pourcentage de réduction par rapport à l'ETM pour cette période est de 33,54 %. La variété Soissons présente la plus faible réduction (29,41 %), tandis que Thésée la plus forte réduction (39,28 %).

Tableau 13. Moyennes et pourcentages de réduction de la consommation en eau (ETR) pour les différentes périodes

Variétés et moyennes des régimes	avril-mai	Mai-Juillet				Avril Juillet			
	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	<b>54,61 c</b>	147,75 b	199,92 a	95,58 d	<b>52,19</b>	<b>201,67 b</b>	<b>244,25 b</b>	<b>159,08 c</b>	34,58
Scipion	59,39 bc	151,71 ab	197,25 a	106,17 cd	46,17	209,71 ab	248,50 ab	170,92 bc	31,22
Thésée	64,37 b	147,04 b	197,33 a	96,75 d	50,97	211,42 ab	<b>263,08 a</b>	159,75 c	<b>39,28</b>
Beauchamp	<b>76,58 a</b>	<b>139,02 b</b>	<b>186,21 a</b>	<b>91,83 d</b>	50,68	210,79 ab	251,92 ab	169,67 bc	32,65
Festival	48,36 d	161,63 a	<b>204,08 a</b>	119,17 bc	41,60	208,83 ab	251,00 ab	166,67 bc	33,60
Soissons	52,93 cd	<b>162,13 a</b>	199,00 a	<b>125,25 b</b>	<b>37,06</b>	<b>216,29 a</b>	253,58 ab	<b>179,00 b</b>	<b>29,41</b>
Moy ETM	58,38	<b>197,30 a</b>				252,06 a			
Moy R1	60,37	105,79 b				167,51 b			
% réduc.		46,38				33,54			

NB: % réduc. = % de réduction

## 7. Effet du stress hydrique sur le potentiel hydrique foliaire ( $\psi$ )

### 7.1. Potentiel hydrique foliaire de base

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 8) montre des différences significatives entre les deux régimes hydriques ( $p < 0,001$ ) pour toutes les dates, et entre les variétés ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception des mesures réalisées le 5 juin. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques (annexe 1, tableau 8) est significative ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception des mesures réalisées le 5 et le 19 juin. Le potentiel hydrique foliaire présente des coefficients de variations (annexe 1, tableau 8) allant de 8,56 % (12 juin) à 24,97 % (5 juin). L'analyse de la variance des moyennes (Annexe 1, tableau 8) du potentiel hydrique ( $\bar{\psi}$ ) (dates confondues) montre des différences significatives ( $p < 0,001$ ) entre les régimes, les variétés et l'interaction variété  $\times$  régime. Le coefficient de variation est de 6,77 %.

L'effet régimes hydriques (annexe 1, tableau 8) explique plus la variabilité observée avec des valeurs allant de 65,91 % (5 Juin) à 87,89 % (17 Juin) que les effets variétés et l'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques ; au niveau du potentiel hydrique foliaire de base moyen l'effet régimes hydriques explique 90,94 % (annexe 1, tableau 8).

Les moyennes du potentiel hydrique foliaire de base des différentes dates de mesure sont données dans les tableaux 14, 15 et 16. Les moyennes du  $\bar{\psi}$  de base varient de 0,38 (Thésée) à 0,48 MPa (-1) (Soissons) au niveau du régime ETM et de 1,03 (Thésée) à 1,32 MPa (-1) (Soissons) au niveau du régime R1 (tableau 15). La moyenne du régime conduit à l'ETM est inférieure à celle du traitement R1 (figure 16). Le stress hydrique a provoqué une augmentation du potentiel foliaire hydrique foliaire de base allant de 93,77 % (10 Juin) à 227,94 % (21 Juin). En moyenne le stress hydrique a provoqué une augmentation du potentiel hydrique foliaire de base de 172,58 %.

Tableau 14. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire de base ( $\psi$ ) en MPa (-1) du 5, 7, 12 et 14 juin

Variétés et moyennes des régimes	5-juin	7-juin				12-juin				14 juin			
	Moy. des variétés	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	0,621	0,462 c	<b>0,214 e</b>	0,709 b	<b>-231,31</b>	<b>0,428 c</b>	<b>0,257 e</b>	<b>0,60 c</b>	-133,07	0,803 bc	0,49d	<b>1,128 c</b>	<b>-136,48</b>
Thésée	<b>0,573</b>	<b>0,423 d</b>	0,231 e	<b>0,615 c</b>	-166,23	0,504 b	0,314 de	0,69b	<b>-120,70</b>	<b>0,744 c</b>	<b>0,35 e</b>	1,142 c	<b>-231,01</b>
Festival	0,607	0,508 b	0,286 d	0,730 b	<b>-155,24</b>	<b>0,590 a</b>	<b>0,350 d</b>	0,83 a	-137,14	0,845 b	0,42 de	<b>1,262 b</b>	-195,55
Soissons	<b>0,635</b>	<b>0,555 a</b>	0,308 d	<b>0,802 a</b>	-160,04	0,497 b	0,258 e	<b>0,74 b</b>	<b>-185,27</b>	<b>0,971 a</b>	5,29 d	1,412 a	-166,92
Moy ETM	0,394 b	0,260 b				0,295 b				0,445 b			
Moy R1	<b>0,824 a</b>	0,714 a				<b>0,715 a</b>				<b>1,236 a</b>			
% réduc.	<b>-109,14</b>	-174,62				<b>-142,37</b>				<b>-177,75</b>			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 15. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire de base ( $\psi$ ) en MPa (-1) du 17, 19, 21, juin

Variétés et moyennes des traitements	17 juin				19-juin				21- juin			
	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	<b>0,616 b</b>	<b>0,298 c</b>	<b>0,933 b</b>	-213,09	<b>0,803 b</b>	<b>0,44 c</b>	<b>1,170 b</b>	-168,35	0,828 bc	<b>0,34 d</b>	1,321 b	<b>-294,33</b>
Thésée	0,666 b	0,378 c	0,953 b	<b>-152,12</b>	0,830 b	0,45 c	1,212 b	-170,54	<b>0,730 c</b>	0,41 d	<b>1,047 c</b>	<b>-154,13</b>
Festival	<b>0,758 a</b>	<b>0,407 c</b>	1,109 a	-172,48	0,984 a	<b>0,55 c</b>	1,418 a	-157,82	0,884 b	0,39 d	1,373 b	-248,48
Soissons	0,733 a	0,348 c	<b>1,118 a</b>	<b>-221,26</b>	<b>1,011 a</b>	0,54 c	<b>1,486 a</b>	<b>-177,76</b>	<b>1,050 a</b>	<b>0,49 d</b>	1,610 a	-229,24
Moy ETM	0,358 b				0,492 b				0,408 b			
Moy R1	<b>1,028 a</b>				<b>1,322 a</b>				<b>1,338 a</b>			
% réduction	<b>-187,15</b>				<b>-168,70</b>				<b>-227,94</b>			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 16. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire de base ( $\psi$ ) en MPa (-1) du 24, 27 juin et  $\bar{\psi}$

Variétés et moyennes des traitements	24 juin				27 juin	Moyenne potentiel hydrique foliaire de base ( $\bar{\psi}$ )			
	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	0,760 c	0,380 d	1,140 c	-200,00	1,276 b	0,733 b	0,390 f	1,076 c	-175,90
Thésée	<b>0,658 c</b>	<b>0,336 d</b>	<b>0,980 c</b>	<b>-191,67</b>	1,219 b	0,705 b	<b>0,384 f</b>	1,026 d	<b>-167,19</b>
Festival	0,923 b	0,394 d	1,452 b	-268,53	1,233 b	0,814 a	0,338ef	1,191 b	<b>-252,37</b>
Soissons	<b>1,166 a</b>	0,418 d	<b>1,914 a</b>	<b>-357,89</b>	<b>1,477 a</b>	<b>0,899 a</b>	<b>0,480 e</b>	<b>1,318 a</b>	-174,58
Moy ETM	0,382 b				0,774 b	0,423 b			
Moy R1	<b>1,372 a</b>				<b>1,828 a</b>	<b>1,153 a</b>			
% réduc.	<b>-259,16</b>				<b>-136,18</b>	<b>-172,58</b>			

NB: % réduc. = % de réduction

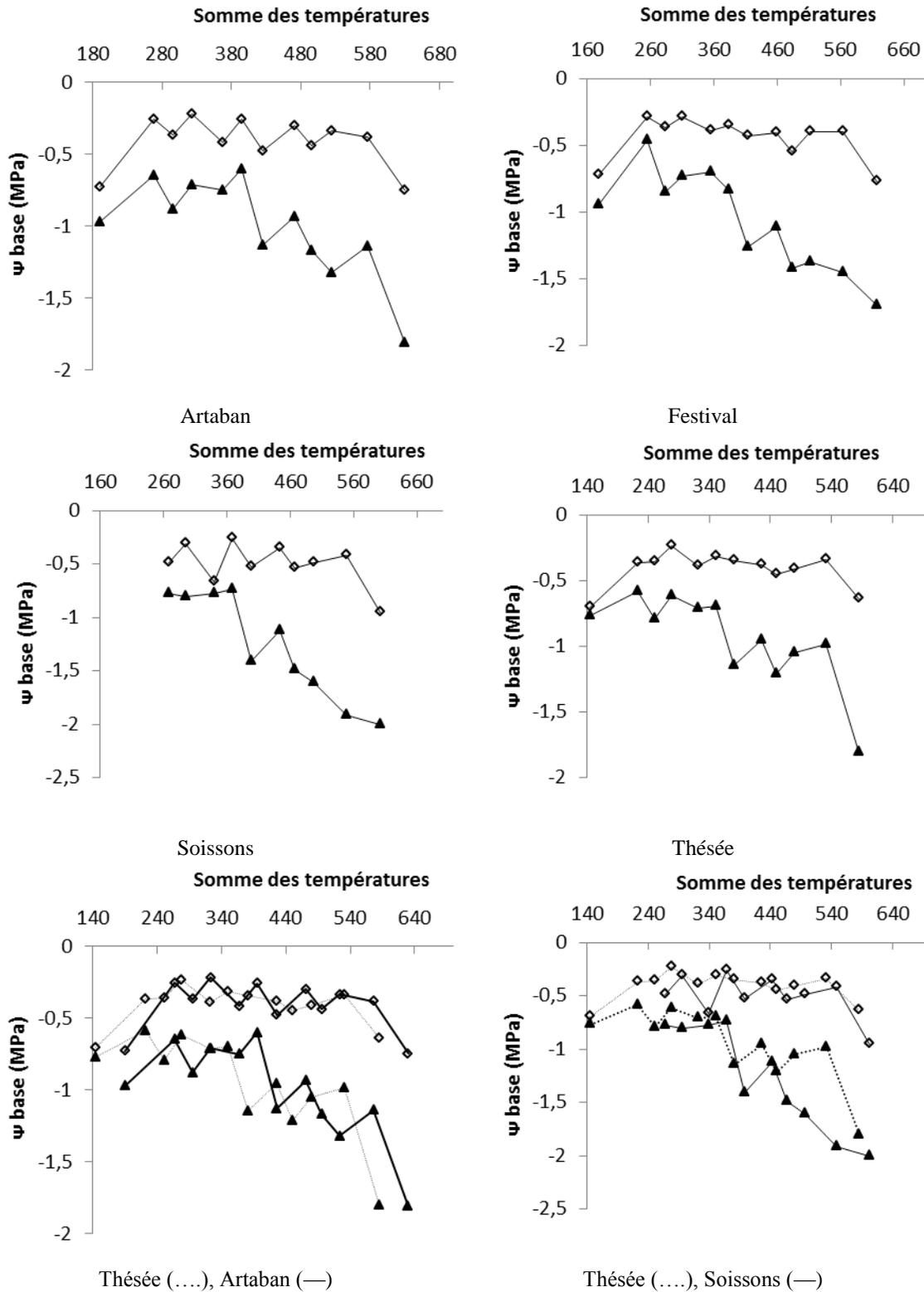


Figure 16. Evolution des  $\psi$  de base en fonction des sommes de température (base 0°C) depuis l'épiaison pour les variétés Artaban, Festival, Soissons et Thésée selon les régimes hydriques  $\square$  ETM,  $\blacktriangle$  R1 ; Artaban (...), Festival et Thésée (—) dans les deux derniers graphiques.

## 7.2. Potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\bar{\psi}$ ms)

L'analyse de la variance du potentiel hydrique foliaire midi solaire (annexe 1, tableau 9) montre des différences significatives ( $p < 0,001$ ) entre les régimes hydriques pour l'ensemble des dates de mesure, l'effet variétés est significatif pour la majorité des dates à l'exception du 30 mai et du 1<sup>er</sup> juin. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est significative ( $p < 0,001$ ) uniquement pour le 1er et le 3 juin. Concernant la moyenne générale, l'analyse de la variance montre des différences significatives ( $p < 0,001$ ) entre les régimes hydriques et les variétés. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est aussi significative ( $p < 0,001$ ).

A l'exception du 27 mai, toutes les dates montrent un effet régimes hydriques plus important que les effets génétiques avec des valeurs allant de 18,75 % pour le 30 Mai à 67,14 % pour le 27 juin (annexe 1, tableau 9). A partir de cette date, le pourcentage de la variation du caractère expliqué par l'effet régimes hydriques augmente régulièrement. Au niveau du potentiel hydrique foliaire midi solaire moyen là aussi l'effet régimes hydriques explique 83,21 % de la variation du caractère.

Les moyennes pour les différentes dates sont données dans les tableaux 17 et 18. A l'ETM, les variétés Thésée (1,857 MPa-1), Festival (1,911 MPa-1) et Soissons (1,882 MPa-1) présentent des valeurs de  $\bar{\psi}$  ms équivalentes et supérieures à Artaban (1,755 MPa-1). Au niveau du régime R1, les variétés Artaban, Thésée et Festival montrent un potentiel hydrique foliaire midi solaire équivalents, la variété Soissons se détache de ce lot avec une valeur supérieure (2,444 MPa-1). Le stress hydrique modéré a provoqué une augmentation générale des valeurs de  $\bar{\psi}$  ms avec des pourcentages par rapport à l'ETM allant de 29,86 % (Soissons) à 17,11 (Festival) (figure 17). Le pourcentage moyen d'augmentation est de 23,82 % par rapport à l'ETM.

Tableau 17. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi$  ms) en MPa -1 du 27 et 30 mai et du 1, 3 et 12 juin

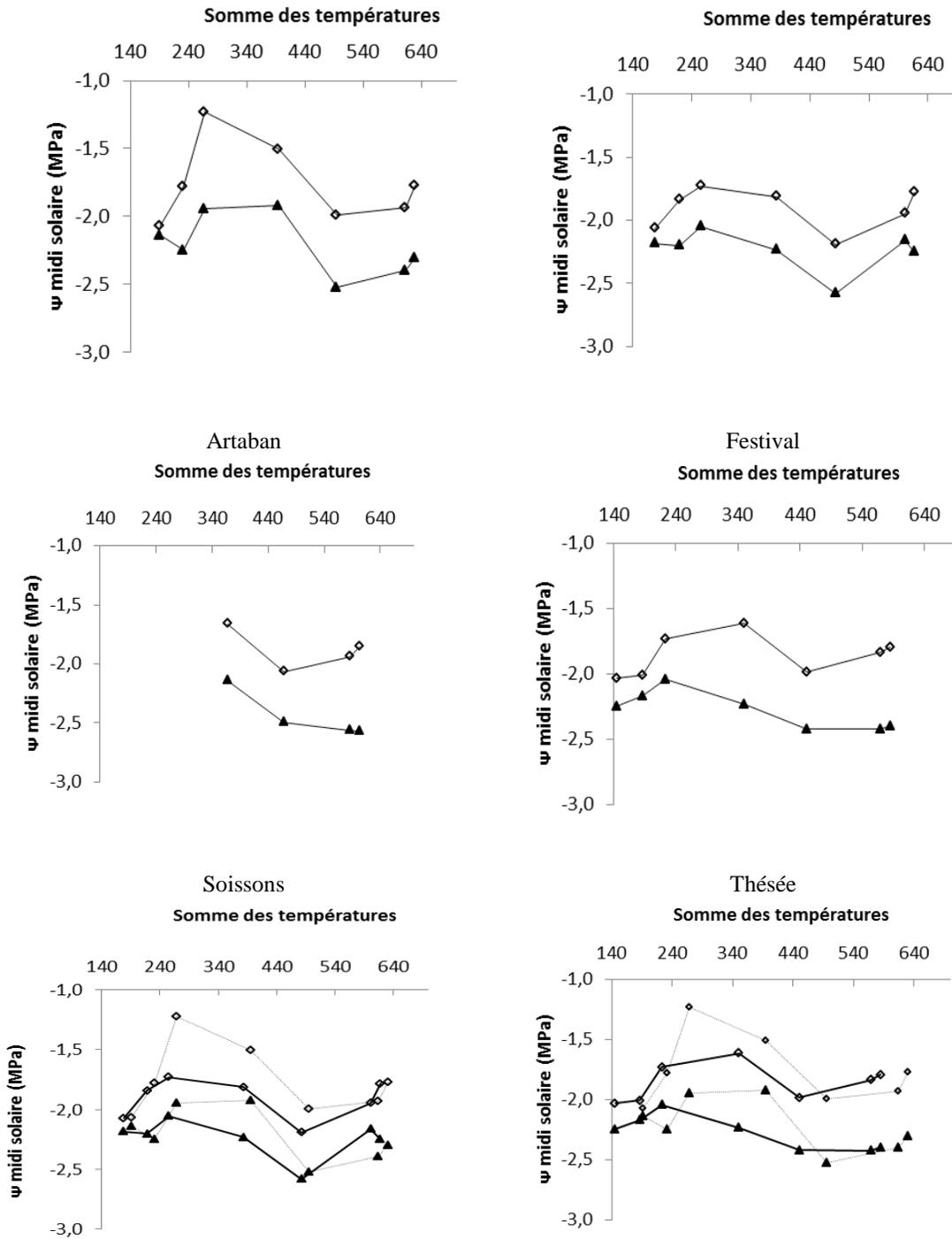
Variétés et moyennes des traitements	27 mai	30 mai	1 juin				3 juin				12 juin			
	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	2,069 a	2,104	2,014	<b>1,78 c</b>	<b>2,25 a</b>	<b>-26,40</b>	1,585 b	<b>1,228 c</b>	<b>1,942 a</b>	<b>-58,14</b>	<b>1,714 b</b>	<b>1,508 d</b>	<b>1,920 b</b>	-27,32
Thésée	<b>1,889 b</b>	2,130	<b>2,007</b>	<b>2,01 b</b>	2,01 b	<b>0,00</b>	1,886 a	1,728 b	2,043 a	<b>-18,23</b>	1,925 a	1,616 cd	2,233 a	<b>-38,18</b>
Festival	1,812 b	2,127	2,024	1,84 c	2,20 a	-19,57	<b>1,893 a</b>	<b>1,732 b</b>	2,053 a	-18,53	<b>2,023 a</b>	<b>1,812 bc</b>	<b>2,233 a</b>	<b>-23,23</b>
Beauchamp	1,616 c													
Soissons				,							<b>1,904 a</b>	1,666 cd	2,141 a	
Moy ETM	<b>1,679 b</b>	<b>2,057 b</b>	1,878 b				1,563 b				<b>1,651 b</b>			
Moy R1	1,987 a	2,190 a	2,152 a				2,013 a				2,132 a			
% réduction	18,34	6,47	14,59				28,79				29,13			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 18. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi$  ms) en MPa-1 du 19, 26, 27 juin et moyennes ( $\bar{\psi}$  ms)

génotypes et moyennes des régimes	19 Juin				26 juin				27 juin				$\bar{\psi}$ ms)			
	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc. par rapport à l'ETM
Artaban	2,258 ab	1,992 b	2,523 a	<b>-26,66</b>	2,164 ab	<b>1,933 bc</b>	<b>2,395 a</b>	-23,90	2,035 b	1,770 c	<b>2,300 b</b>	-29,94	<b>1,982 c</b>	<b>1,755 d</b>	<b>2,209 b</b>	-25,87
Thésée	<b>2,201 b</b>	1,983 b	2,419 a	-21,99	<b>2,132 ab</b>	<b>1,837 c</b>	2,426 a	-32,06	2,096 ab	1,794 c	<b>2,398 a</b>	-33,67	2,067 b	1,857 c	2,277 b	-22,62
Festival	<b>2,385 a</b>	2,191 b	2,579 a	<b>-17,71</b>	2,054 b	1,946 bc	2,162 b	<b>-11,10</b>	<b>2,017 b</b>	1,784 c	2,250 b	<b>-26,12</b>	2,071 b	<b>1,911 c</b>	2,238 b	<b>-17,11</b>
Soissons	<b>2,279 ab</b>	2,063 b	2,495 a	-20,94	<b>2,254 a</b>	1,940 bc	2,568 a	<b>-32,37</b>	<b>2,215 a</b>	1,857 c	2,572 a	<b>-38,50</b>	2,163 q	1,882 c	<b>2,444 a</b>	<b>-29,86</b>
Moy ETM	<b>2,057 b</b>				<b>1,914 b</b>				<b>1,801 b</b>				<b>1,851 b</b>			
Moy R1	2,504 a				2,388 a				2,380 a				2,292 a			
% réduc. par rapport à l'ETM	21,73				-24,76				-32,15				-23,82			

NB: % réduc. = % de réduction



Artaban (.....), Festival (—)

Artaban (.....), Thésée (—)

Figure 17. Evolution des  $\psi$  midi solaire en fonction des sommes de température (base 0°C) depuis l'épiaison pour les variétés Artaban, Festival, Soissons et Thésée selon les régimes hydriques  $\square$  ETM,  $\blacktriangle$  R1 ; Artaban (.....), Festival et Thésée (—) dans les deux derniers graphiques.

## 8. Effet du stress hydrique sur la teneur en eau relative (RWC)

### 8.1. Teneur en eau relative de base (RWC)

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 10) de la teneur en eau relative montre des différences significatives ( $p < 0,001$ ) pour les régimes hydriques au niveau de toutes les dates et pour la moyenne (toutes dates confondues). L'effet variétés est significatif ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates et pour la moyenne (toutes dates confondues) à l'exception des mesures réalisées le 30 mai. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est significative ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates et pour la teneur en eau moyenne à l'exception des mesures réalisées le 5 et le 17 juin.

A l'exception du 10 juin, l'effet régimes hydriques (annexe 1, tableau 10) explique plus la variabilité détectée au niveau de ce caractère que les effets génétiques, allant de 16,48 % (30 Mai) à 68,63 % (21 Juin). La teneur en eau relative de base moyenne confirme cette supériorité avec 84,25 % d'explication.

Les moyennes des différentes variétés et régimes hydriques sont données dans les tableaux 19 à 22. Le régime R1 présente une réduction de  $\overline{RWC}$  par rapport au régime conduit à l'ETM de 5,54 %. Au niveau du régime ETM, toutes les variétés sont statistiquement identiques et les valeurs des teneurs relatives moyennes ( $\overline{RWC}$ ) des variétés varient de 94,77 % (Soissons) à 93,49 % (Festival). Par contre au niveau du régime R1, les variétés présentent des moyennes statistiquement différentes, ces dernières varient de 83,19 % (Soissons) à 91,61 % (Thésée). La variété Soissons est celle qui montre la réduction la plus élevée avec 12,22 % et donc la plus sensible, suivie par Artaban (4,14 %) et de Festival (3,48 %), la variété Thésée est la moins sensible (1,12 % de réduction).

La figure 18 montre l'évolution de la teneur relative en eau de base (% de matière sèche) en fonction des sommes de température depuis l'épiaison en degrés  $\times$  jours (base 0°C) pour chaque variété et les régimes hydriques ETM et R1. La variété Thésée semble montrer une teneur relative en eau très proche entre le traitement à l'ETM et le traitement conduit en régime restrictif (R1) sur 50 % des mesures alors qu'Artaban et Soissons sur une date et Festival deux dates. Thésée retient l'eau plus longtemps en présence de stress.

Tableau 19. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (en % de MS) du 30 mai, du 3 et 5 juin

Variétés et moyennes des traitements	30 mai				3 juin				5-juin			
	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.
ART	91,34	<b>94,08 a</b>	<b>88,61 c</b>	<b>5,81</b>	92,22 a	93,69 a	90,74 b	3,15	91,37 ab	<b>92,50 ab</b>	90,24 cd	2,44
THE	<b>90,44</b>	92,06 b	88,81 c	3,53	<b>92,53 a</b>	92,53 ab	92,52 ab	<b>0,01</b>	<b>92,47 a</b>	93,53 a	<b>91,40 bc</b>	<b>2,28</b>
FES	<b>90,75</b>	<b>91,14 b</b>	<b>90,37 bc</b>	<b>0,84</b>	<b>90,49 b</b>	92,81 ab	88,18 c	<b>4,99</b>	<b>91,14 b</b>	92,74 ab	<b>89,55 d</b>	3,44
SOI	-								92,21 ab	<b>93,88 a</b>	90,54 cd	<b>3,56</b>
Moy ETM	<b>92,43 a</b>				93,01 a				<b>93,16 a</b>			
Moy R1	89,26 b				90,48 b				90,43 b			
% réduction	3,43				2,72				2,93			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 20. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (en % de MS) du 7, 10 et 12 juin

Variétés et moyennes des traitements	7 juin				10 juin				12 Juin			
	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.
ART	94,79 a	<b>95,90 a</b>	<b>93,67 cd</b>	2,33	91,42 b	<b>93,51 a</b>	<b>89,34 b</b>	<b>4,46</b>	96,33 a	<b>95,91 a</b>	94,75 b	<b>1,21</b>
THE	<b>93,69 b</b>	<b>94,26 c</b>	93,12 de	<b>1,21</b>	92,42 a	93,08 a	91,76 a	1,42	<b>97,04 a</b>	<b>98,72 a</b>	95,36 b	3,40
FES	93,75 b	94,61 bc	92,89 de	1,82	<b>89,68 c</b>	<b>89,26 b</b>	90,10 b	-0,94	<b>95,11 b</b>	97,94 a	<b>92,29 c</b>	<b>5,77</b>
SOI	93,81 b	95,38 ab	<b>92,24 e</b>	<b>3,29</b>	<b>92,84 a</b>	93,22 a	<b>92,47 a</b>	<b>0,80</b>	96,18 a	98,22 a	94,15 b	4,14
Moy ETM	<b>95,04 a</b>				<b>92,26 a</b>				<b>98,20 a</b>			
Moy R1	92,98 b				90,92 b				94,14 b			
% réduction	2,17				1,45				4,13			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 21. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (en % de MS) du 14, 17 et 19 juin

Variétés et moyennes des traitements	14 Juin				17 juin				19 juin			
	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.
ART	89,67 bc	91,25 b	88,09 c	3,46	92,56 b	95,19 ab	89,91 d	5,55	91,85 ab	<b>95,19 a</b>	<b>88,50 b</b>	<b>7,03</b>
THE	90,77 b	<b>91,22 b</b>	90,33 b	<b>0,98</b>	92,47 b	<b>95,21 a</b>	<b>89,53 d</b>	<b>5,97</b>	92,75 a	95,21 a	90,29 b	5,17
FES	<b>89,14 c</b>	91,34 b	<b>86,94 c</b>	<b>4,82</b>	<b>91,80 b</b>	93,89 b	89,70 d	4,46	<b>91,20 b</b>	<b>93,08 a</b>	89,33 b	<b>4,03</b>
SOI	<b>92,21 a</b>	93,65 a	<b>90,77 b</b>	3,08	94,28 a	95,05 ab	<b>92,14 c</b>	<b>3,06</b>	<b>92,91 a</b>	95,05 a	<b>90,78 b</b>	4,49
Moy ETM	<b>91,87 a</b>				<b>95,23 a</b>				<b>94,63 a</b>			
Moy R1	89,03 b				90,32 b				89,73 b			
% réduction	3,09				5,16				5,18			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 22. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (en % de MS) du 21, 24, 27 juin et  $\overline{RWC}$

Variétés et moyennes des régimes	21 juin				24 juin				27 Juin				$\overline{RWC}$			
	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.
ART	95,51 a	96,49 bc	<b>94,53 d</b>	<b>2,03</b>	<b>92,50 a</b>	<b>94,96 a</b>	<b>90,04 b</b>	5,18	90,82 a	93,62 a	88,03 b	<b>5,98</b>	92,53 b	94,53 b	90,54 d	4,22
THE	<b>94,72 b</b>	<b>96,12 c</b>	93,32 e	2,91	91,68 ab	<b>93,99 a</b>	89,38 b	<b>4,90</b>	87,80 a	94,47 a	81,14 d	<b>14,11</b>	92,40 b	94,22 b	90,58 d	3,86
FES	95,01 ab	97,55 a	<b>92,47 e</b>	<b>5,21</b>	91,09 ab	94,07 a	88,10 b	6,35	89,84 a	93,89 a	85,79 bc	8,63	91,58 c	93,53 c	89,64 e	4,16
SOI	95,21 ab	97,08 ab	<b>93,35 e</b>	3,84	<b>90,53 b</b>	95,05 a	<b>86,01 c</b>	<b>9,51</b>	89,81 a	95,75 a	83,87 cd	12,41	93,00 a	95,37 a	90,63 d	4,97
Moy ETM	<b>96,81 a</b>				<b>94,52 a</b>				94,43 a				94,41 b			
Moy R1	93,42 b				88,38 b				84,71 b				90,35 a			
% réduc.	3,50				6,50				10,29				4,30			

NB: % réduc. = % de réduction

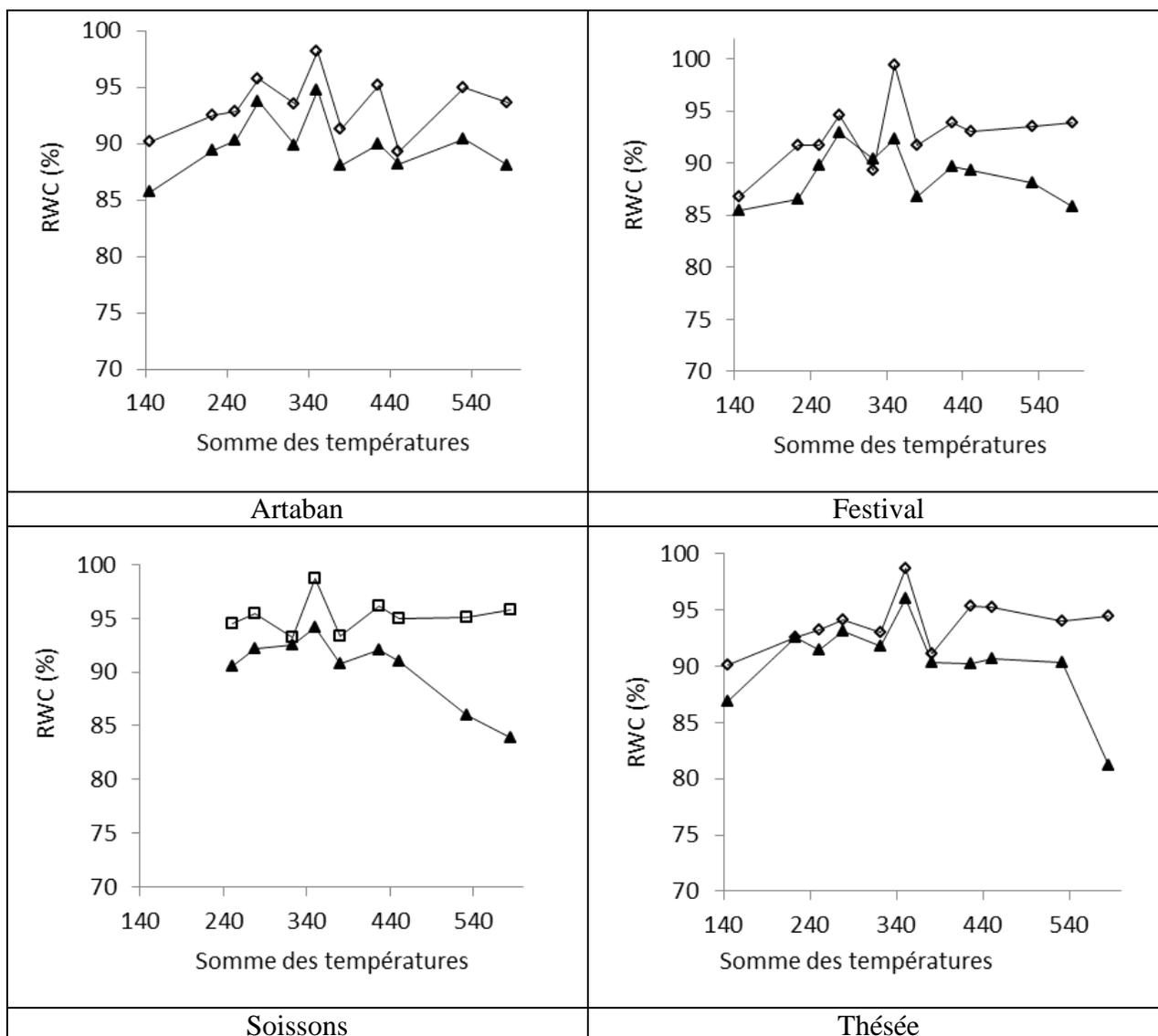


Figure 18. Evolution du RWC de base en fonction des sommes de températures (base zéro en °C) depuis l'épiaison pour les variétés Artaban, Festival, Soissons et Thésée selon les régimes hydriques □ ETM et ▲ R1.

### 8.2. Teneur en eau relative midi solaire (RWCms)

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 11) montre des différences significatives ( $p < 0,001$ ) entre les régimes hydriques pour toutes les dates et entre les variétés ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception du 30 mai et du 19 juin. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est non significative pour la majorité des

dates à l'exception du 3 et du 26 juin. Les coefficients de variation varient de 1,59 % (3 juin) à 4,71 (26 juin), le coefficient de variation de  $\overline{RWC}_{ms}$  est de 1,69 %.

L'effet régimes hydriques explique plus la variabilité détectée avec des valeurs allant de 39,12 % (3 Juin) à 76,45 % (19 Juin) (annexe 1, tableau 11) ; la moyenne de la teneur en eau relative midi solaire confirme cette supériorité avec 71,01 %.

Les moyennes par date de mesure sont données dans les tableaux 23 et 24. La figure 19 illustre l'effet du stress hydrique sur la teneur relative en eau midi solaire.

Les moyennes de  $\overline{RWC}_{ms}$  varient de 84,4 mm (Thésée) à 86,8 % (Soissons). Le régime à l'ETM donne une moyenne supérieure à celle du régime R1 (89,2 % et 82 % respectivement). Le pourcentage de réduction pour  $\overline{RWC}_{ms}$  est de 8,07 %.

Les pourcentages de réduction (tableaux 23 et 24), au niveau des différentes dates, varient de 4,08 (3 juin) à 14,27 (26 juin).

Tableau 23. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative midi solaire (*RWCms*) (en % de MS) du 29 et 30 mai et du 3, 12, 19 et 26 juin

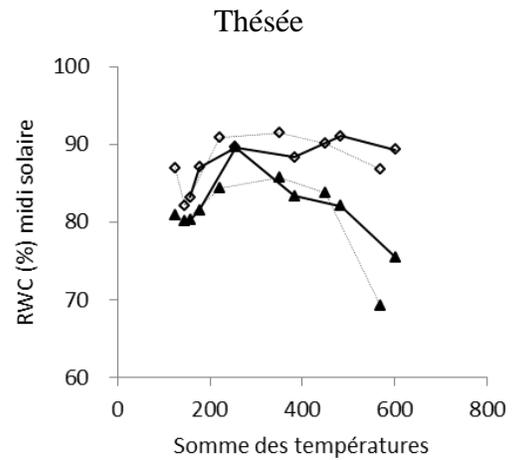
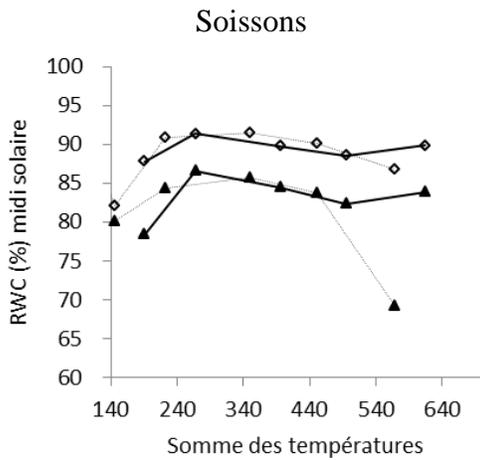
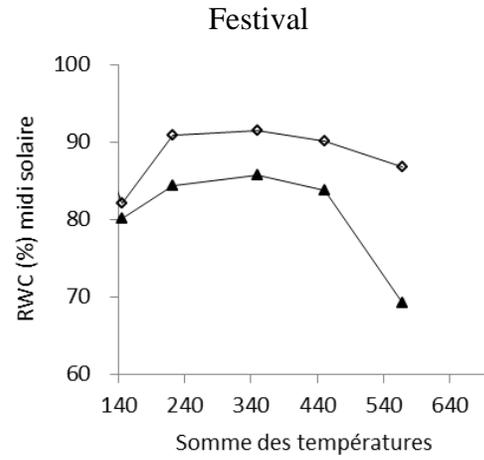
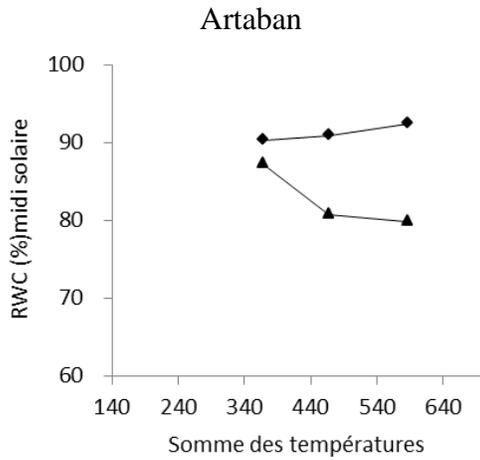
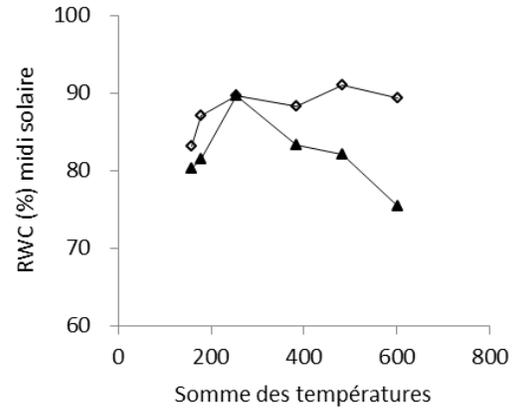
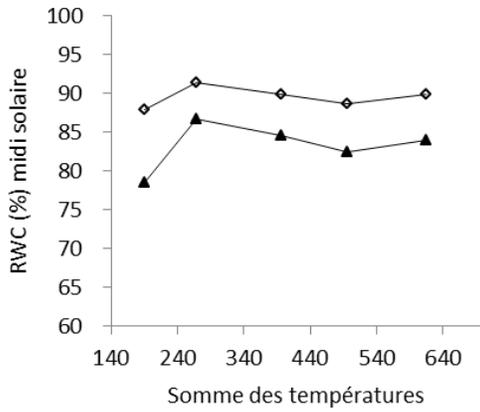
Variétés et moyennes des Régimes	29 Mai				30 Mai				3 Juin			
	M var	ETM	R1	% réduc.	M var	ETM	R1	% réduc.	M var	ETM	R1	% réduc.
ART					83,1	87,8a	78,4c	<b>10,71</b>	89,0a	91,3a	86,0b	5,81
FES	81,7b	83,2b	80,3c	<b>1,84</b>	84,2	86,8ab	81,5bc	6,11	89,6a	89,6a	89,0a	<b>0,67</b>
THE	83,9a	86,9a	81,0bc	<b>3,46</b>	81,1	82,1bc	80,1c	<b>2,44</b>	87,6b	90,8a	84,4c	<b>7,05</b>
Moy ETM	85,0a				85,6a				90,6a			
Moy R1	80,6b				80,0b				86,9b			
% réduc.	5,18				6,54				4,08			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 24. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative midi solaire (*RWCms*) du 12, 19 et 26 juin et  $\overline{RWC}$

Variétés et moyennes des régimes	12 Juin				19 Juin				26 Juin				$\overline{RWCms}$
	M var	ETM	R1	% réduc	M var	ETM	R1	% réduc.	M var	ETM	R1	% réduc.	M var
ART	87ab	89,8ab	84,5de	5,90	85,5	88,5a	82,4b	<b>6,89</b>	87,0a	90,2ab	83,8d	<b>7,10</b>	86,3 a
FES	86bc	88,3b	83,3e	5,66	86,6	91,1a	82,0b	9,99	82,4b	89,3bc	75,5d	15,45	85,0 b
SOI	89a	90,3ab	87,2bcd	<b>3,43</b>	85,8	90,9a	80,7a	<b>11,22</b>	85,7a	92,4a	79,0d	14,50	<b>86,8 a</b>
THE	89a	91,5a	85,8cde	<b>6,23</b>	86,9	90,1a	83,8b	6,99	78,0c	86,9cd	69,2e	<b>20,37</b>	<b>84 4 b</b>
Moy ETM	90a				<b>90.1a</b>				89,7a				<b>89,2 a</b>
Moy R1	85,2b				82,2b				76,9b				82,0 b
% réduction	5,33				8,77				14,27				8,07

NB: % réduc. = % de réduction



Thésée (....), Artaban (—)

Thésée (....), Festival (—)

Figure 19. Evolution des RWC midi solaire en fonction des sommes de température (base 0°C) depuis l'épiaison pour les variétés Artaban, Festival, Soissons et Thésée selon les régimes hydriques ▲ ETM, ◊ R1 ; Thésée (....), Artaban et Festival (—) dans les deux derniers graphiques.

## **9. Mesures tensiométriques**

Les figures 20 et 21 montrent l'évolution des mesures tensiométriques en centibars du sol à différentes profondeurs 30, 60 et 90 cm. Pour le traitement conduit à l'ETM, les valeurs sont maintenues dans la fourchette 15 - 90 centibars, exceptée pour la profondeur 30 cm où ces valeurs ont parfois dépassé 90 cbars. On peut donc supposer que la culture n'a pas souffert de stress hydrique pour ce traitement. En revanche, pour le traitement R1, l'arrêt de l'irrigation 4 jours avant l'épiaison a induit un stress hydrique de plus en plus important à partir de la floraison. Les rapports ETR/ETP durant les périodes de mesure confirment les résultats tensiométriques.

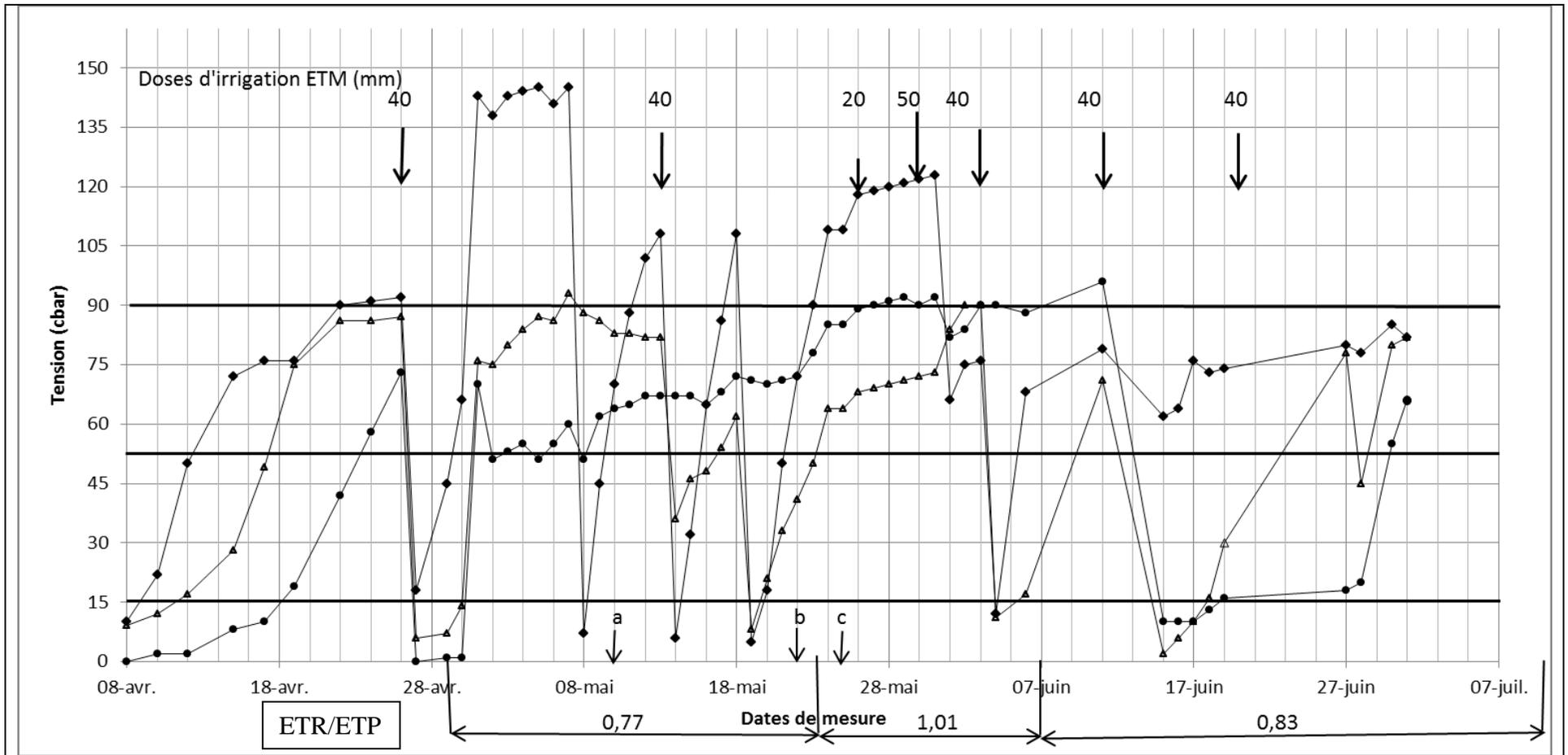


Figure 20. Mesures tensiométriques en centibars (tensiomètre watermark) à différentes profondeurs du sol (■ : 30 cm, ▲ : 60 cm, ● : 90 cm) du traitement ETM. a : stade méiose, b : épiaison, c : floraison. Les lignes horizontales indiquent les limites remarquables de l'utilisation de l'eau. 10- 15 centibars : sol ressuyé, 15- 50 centibars : confort hydrique, plus de 90 centibars : la réserve du sol a diminué de façon significative.

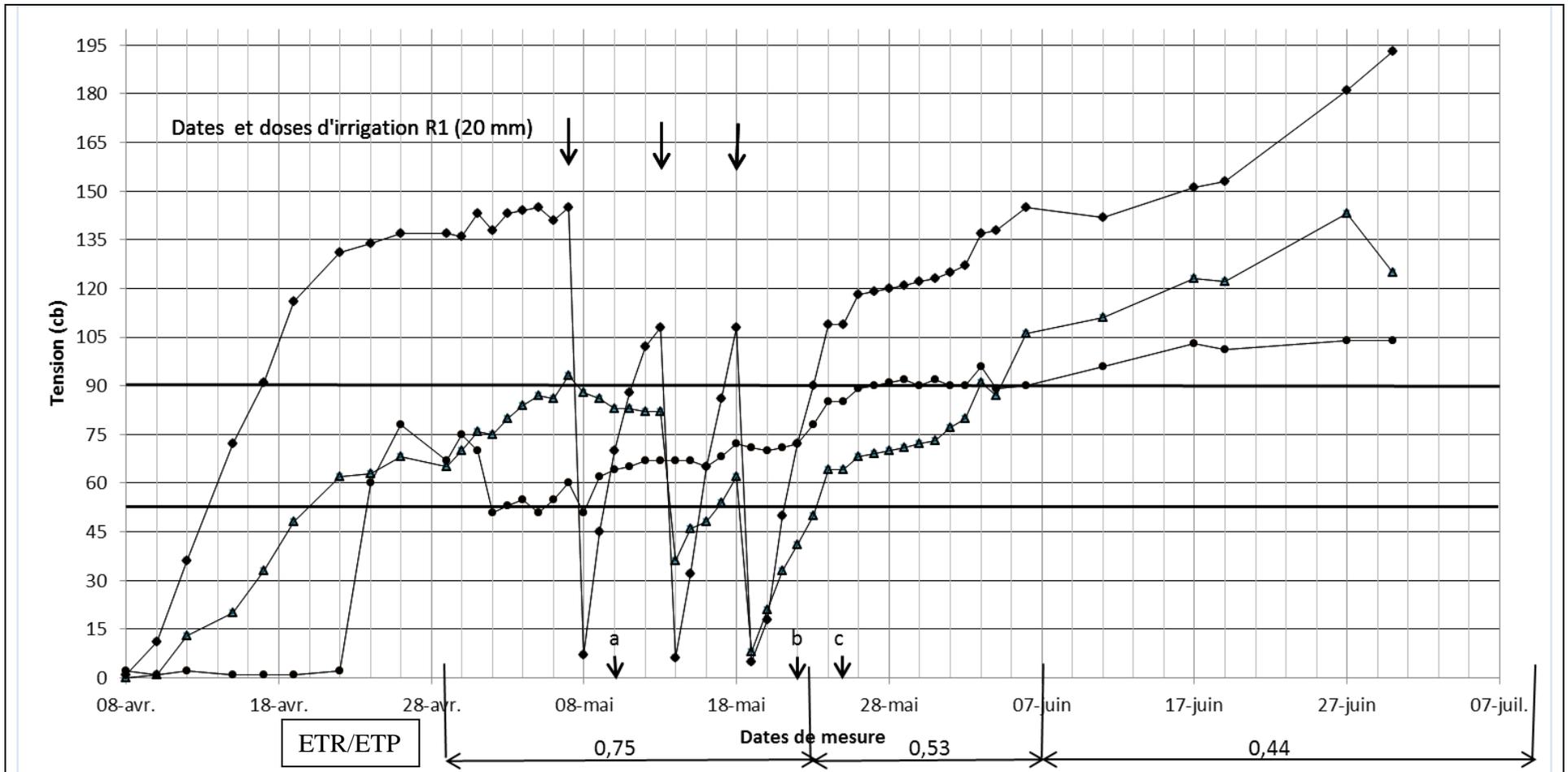


Figure 21. Mesures tensiométriques en centibars (tensiomètre watermark) à différentes profondeurs du sol (■ : 30 cm, ▲ : 60 cm, ● : 90 cm) du traitement R1 (B) en 1991. a : stade méiose, b : épiaison, c : floraison. Les lignes horizontales indiquent les limites remarquables de l'utilisation de l'eau. 10- 15 centibars : sol ressuyé, 15- 50 centibars : confort hydrique, plus de 90 centibars : la réserve du sol s'est beaucoup vidée.

## 10. Evolution de la température maximale

La figure 22 montre les températures maximales supérieures à 25 °C susceptibles de provoquer l'échaudage du grain. En 1991, les risques de voir les dimensions du grain réduites par les températures maximales sont fortement limités au début et à la fin de la formation du grain ; les diminutions observées en régime R1 pourraient s'expliquer par le stress hydrique.

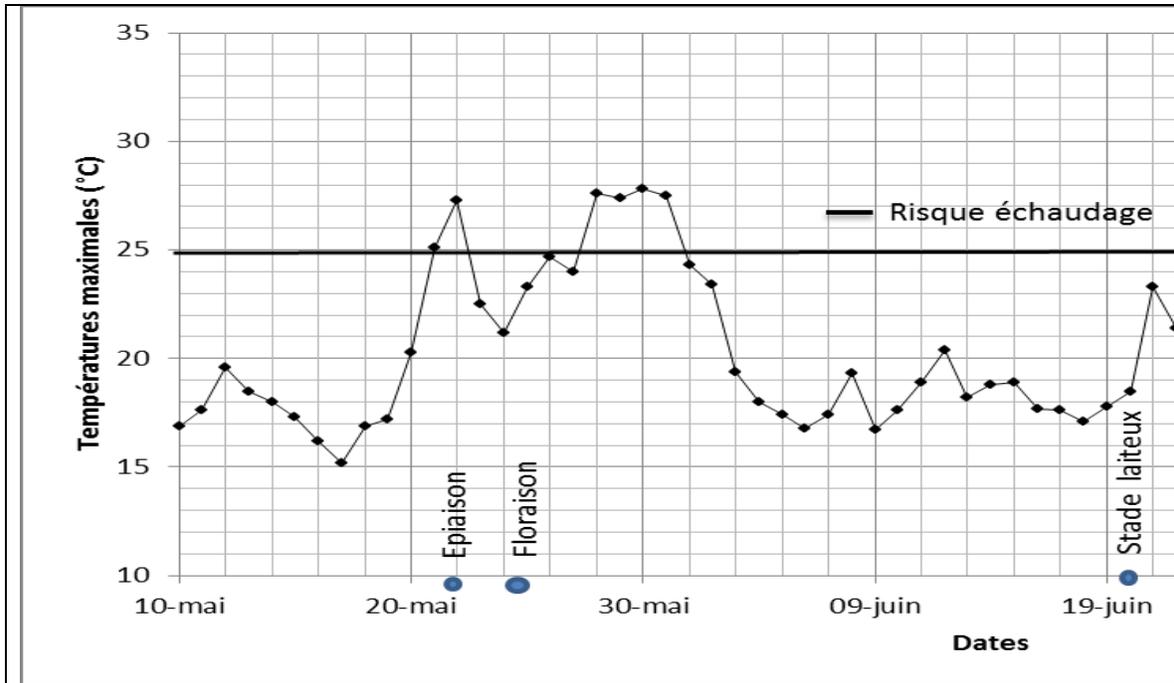


Figure 22. Températures maximales durant la période de formation du grain. La ligne horizontale indique le risque d'échaudage.

## 11. Effet du stress hydrique sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Les analyses de variance des différentes dates de mesures et de  $\overline{NDVI}$  (annexe 1, tableau 12) montrent des effets significatifs pour les variétés ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) et les régimes hydriques ( $p < 0,001$ ) pour toutes les dates et pour  $\overline{NDVI}$  et une interaction significative ( $p < 0,05$  à  $p < 0,01$ ) pour la majorité des dates à l'exception des 3, 11, 18 juin, 7 et 9 juillet et  $\overline{NDVI}$ . Les coefficients de variation des différentes dates sont faibles et varient de 1,23 % (11 juin) à 10,56 % (7 juillet), le coefficient de variation de  $\overline{NDVI}$  et aussi faible (3,26 %).

Jusqu'au 18 Juin les effets génétiques (annexe 1, tableau 12) expliquent plus la variabilité détectée, avec des valeurs allant de 34,80 % (3 Juin) à 70,49 % (11 Juin), que les effets régimes hydriques. A partir du 23 juin il y a une inversion, l'effet régimes hydriques devient de plus en plus important et supérieur aux effets génétiques avec des valeurs allant de 69,83 % (23 Juin) à 74,53 % (3 Juillet). La moyenne de NDVI montre la supériorité de l'effet régime hydrique avec 78,02 %.

La figure 23 montre l'évolution de NDVI par variété et par régime hydrique. Cette figure montre que quelle que soit la variété, le stress hydrique accélère la diminution de NDVI. Les moyennes des NDVI et de  $\overline{NDVI}$  sont données dans les tableaux 25 à 28. Les moyennes de  $\overline{NDVI}$  varient de 0,649 (Soissons) à 0,580 (Artaban). Les variétés Beauchamp, Scipion et Soissons présentent des valeurs de  $\overline{NDVI}$  égales statistiquement et supérieures à Artaban, Festival et Thésée. Le régime à l'ETM (0,666) présente une valeur moyenne supérieure au régime R1 (0,562). Le pourcentage de réduction (tableau 29) du régime R1 par rapport au régime conduit à l'ETM est de 15,62 %.

Les surfaces des courbes (NDVI en fonction de la somme des températures) (tableau 29) montrent qu'à l'ETM les valeurs varient de 633,68 (Soissons) à 558,62 (Beauchamp), au régime hydrique R1 ces valeurs varient de 567,12 (Soissons) à 511,28 (Beauchamp). Les pourcentages de réductions montrent que la variété Scipion est la moins affectée par le stress hydrique R1 (6,44 %) tandis que la variété Artaban (11,30 %) est la plus affectée (tableau 29).

Des corrélations (tableau 30) positives et significatives entre NDVI d'une part et d'autre part le rendement en grain, la matière sèche de la biomasse à la récolte, la matière sèche des tiges à la récolte/0,35 m<sup>2</sup>, le nombre de grains/m<sup>2</sup> à la récolte (p<0,001), la matière sèche des épis/0,35 m<sup>2</sup> à la floraison, le nombre d'épis/m<sup>2</sup> à la floraison, le nombre d'épis/m<sup>2</sup> à la récolte, le nombre d'épis/pied à la récolte (p<0,01), la matière sèche de la biomasse à la floraison, la matière sèche des balles à la récolte (p<0,05) sont obtenues ; tandis que la matière sèche des feuilles à la récolte et la matière sèche d'une tige à la floraison sont corrélées avec NDVI de façon négative et significative (p<0,001 et p<0,05 respectivement).

Tableau 25. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 4 au 23 Juin

Variétés et moyennes des régimes	4 juin	11 Juin	13 Juin				18 Juin	23 Juin			
	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	0,833 a	0,819 b	0,804 b	0,819 abc	0,788 cde	3,79	0,787 b	<b>0,677 b</b>	0,758 a	<b>0,597 d</b>	<b>21,24</b>
Thésée	0,820 ab	0,800 c	0,797 b	0,813 abcd	0,781 de	3,94	0,784 b	0,721 a	0,777 a	0,665 c	14,41
Festival	0,822 ab	0,810 b	0,795 b	0,800 bcde	0,789 cde	1,38	<b>0,773 b</b>	0,709 ab	0,768 a	0,650c	15,36
Beauchamp	<b>0,808 b</b>	<b>0,789 d</b>	<b>0,785 b</b>	0,795 bcde	<b>0,774 e</b>	2,64	0,777 b	<b>0,757 a</b>	0,774 a	0,739 ab	<b>4,52</b>
Scipion	0,837 a	0,817 b	0,788 b	<b>0,781 de</b>	0,795 bcde	1,79	0,791 b	0,733 a	0,795 a	<b>0,671 c</b>	15,60
Soissons	<b>0,841 a</b>	<b>0,846 a</b>	<b>0,828 a</b>	<b>0,834 a</b>	<b>0,822 ab</b>	1,44	<b>0,826 a</b>	0,755 a	0,812 a	0,698 bc	14,04
Moy ETM	<b>0,829</b>	<b>0,823 a</b>	<b>0,807 a</b>				<b>0,804 a</b>	<b>0,781 a</b>			
Moy R1	0,825	0,804 b	0,791 b				0,775 b	0,670 b			
% réduction		2,31	1,98				3,61	14,21			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 26. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 25, 29 et 30 Juin

Variétés et moyennes des régimes	25 Juin				29 Juin				30 juin			
	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	<b>0,626 c</b>	0,736 a	<b>0,515 d</b>	<b>30,03</b>	<b>0,506 c</b>	<b>0,644 b</b>	<b>0,368 e</b>	42,86	<b>0,484 c</b>	0,621 bc	0,348 f	<b>43,96</b>
Thésée	0,662 bc	0,737 a	0,588 c	20,22	0,560 b	0,666 b	0,455 d	31,68	0,522 bc	0,623 bc	0,421 e	32,42
Festival	0,659 bc	0,728 a	0,591 c	18,82	0,554 b	0,652 b	0,457 d	29,91	0,514 bc	0,611 c	<b>0,417 e</b>	31,75
Beauchamp	<b>0,704 a</b>	0,738 a	<b>0,669 b</b>	<b>9,35</b>	<b>0,624 a</b>	0,702 ab	<b>0,546 c</b>	<b>22,22</b>	0,594 a	0,686 ab	<b>0,502 d</b>	26,82
Scipion	0,689 ab	0,765 a	0,613 c	19,87	0,593 ab	0,673 b	0,513 cd	23,77	0,554 ab	0,634 bc	0,474 de	<b>25,24</b>
Soissons	0,700ab	0,778 a	0,621 c	20,18	0,616 a	<b>0,753 a</b>	0,480 d	<b>36,25</b>	0,594 a	<b>0,736 a</b>	0,452 de	38,59
Moy ETM	0,747 a				0,775 b				0,652 a			
Moy R1	0,600 b				0,682 a				0,436 b			
% réduction	19,68				12,00				33,13			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 27. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 1 et 3 Juillet

Variétés et moyennes des régimes	1 Juillet				3 Juillet			
	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.
Artaban	<b>0,447 c</b>	0,569 bc	<b>0,324 e</b>	<b>43,05</b>	<b>0,395 c</b>	0,489 b	<b>0,302 d</b>	<b>38,24</b>
Thésée	0,472 bc	<b>0,559 bc</b>	0,384 de	31,31	0,420 bc	0,487 b	0,352 cd	27,72
Festival	0,470 bc	0,561 bc	0,379 de	32,44	0,417 bc	<b>0,495 b</b>	0,339 cd	31,52
Beauchamp	<b>0,545 a</b>	0,643 ab	0,448 d	30,33	0,490 a	0,595 a	0,386 c	35,13
Scipion	0,519 ab	0,569 bc	<b>0,468 cd</b>	<b>17,75</b>	0,451 ab	0,496 b	<b>0,407 c</b>	<b>17,94</b>
Soissons	0,543 a	<b>0,691 a</b>	0,396 de	42,69	<b>0,491 a</b>	<b>0,607 a</b>	0,376 c	38,06
Moy ETM	0,599 a				0,528 a			
Moy R1	0,310 b				0,360 b			
% réduction	48,25				31,82			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 28. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 7 et 9 juillet et  $\overline{NDVI}$ 

Variétés et moyennes des régimes	7 Juillet				9 Juillet				$\overline{NDVI}$
	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	% réduc.	Moy. des variétés
Artaban	<b>0,293 c</b>	<b>0,326 cd</b>	<b>0,260 d</b>	20,24	<b>0,289 c</b>	<b>0,315 de</b>	<b>0,263 f</b>	16,51	<b>0,580 b</b>
Thésée	0,330 bc	0,359 bc	0,301 cd	16,16	0,330 b	0,350 bcde	0,309 de	11,71	0,601 b
Festival	0,319 bc	0,355 bc	0,283 cd	20,28	0,315 b	0,342 bcd	0,288 ef	15,79	0,596 b
Beauchamp	0,367 ab	0,422 ab	0,312 cd	<b>26,07</b>	0,350 a	0,387 ab	0,313 de	<b>19,12</b>	0,632 a
Scipion	0,359 ab	0,365 bc	<b>0,352 bc</b>	<b>3,56</b>	<b>0,369 a</b>	0,380 abc	<b>0,359 abcd</b>	<b>5,53</b>	0,625 a
Soissons	<b>0,382 a</b>	<b>0,434 a</b>	0,329 cd	24,19	0,366 a	<b>0,396 a</b>	0,336 cd	15,15	<b>0,649 a</b>
Moy ETM	0,377 a				0,362 a				0,666 a
Moy R1	0,306 b				0,311 b				0,562 b
% réduction	18,83				14,09				15,62

NB: % réduc. = % de réduction

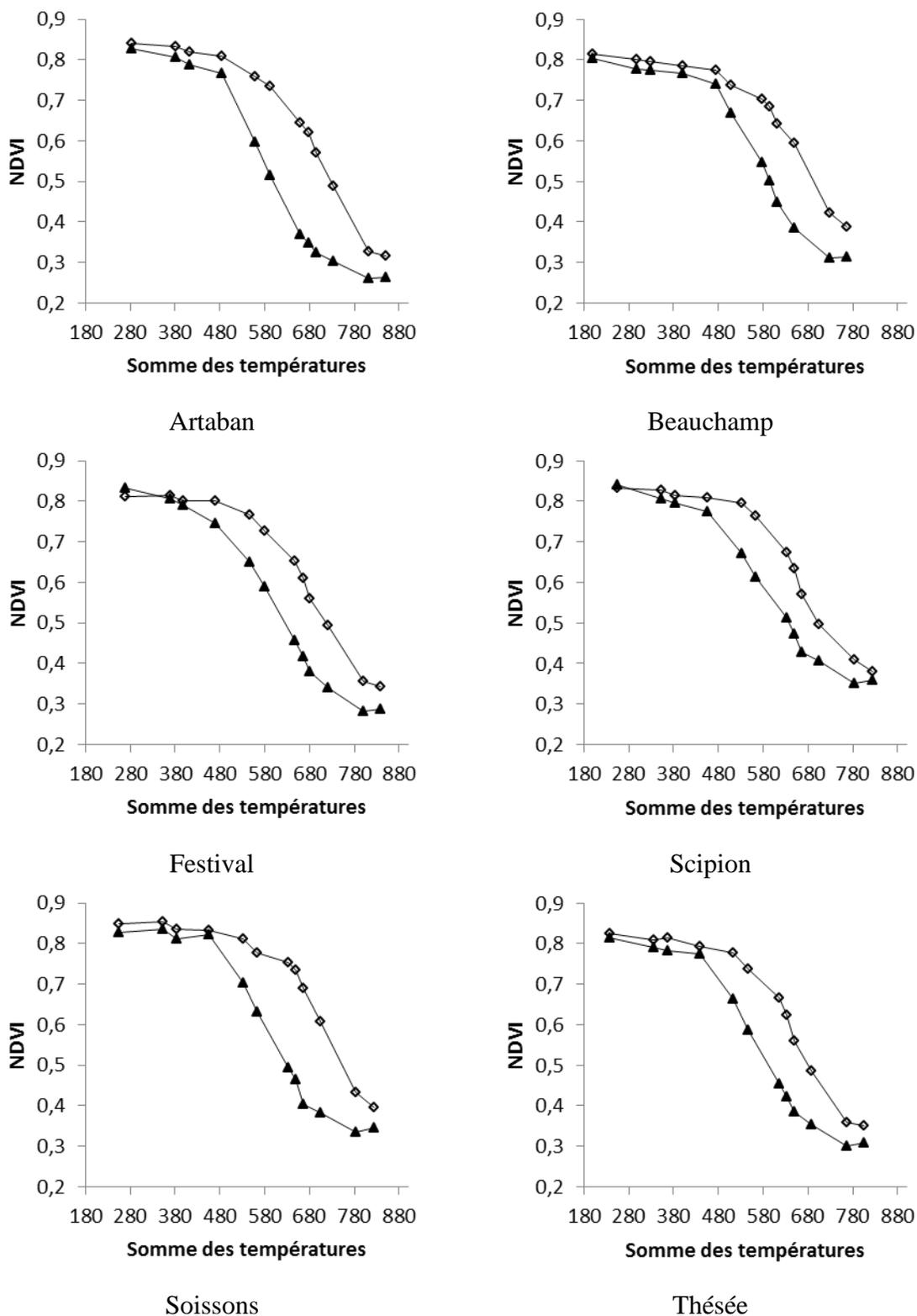


Figure 23. Evolution des NDVI par variété et par régime hydrique. (□ ETM ▲ R1) en fonction des sommes de températures depuis l'épiaison.

Tableau 29. Moyennes et pourcentages de réduction de la surface des courbes des NDVI en fonction de la somme des températures (°C)

Variétés	ETM	R1	% de Réduction
Artaban	620,61	550,51	<b>11,30</b>
Beauchamp	558,62	<b>511,28</b>	8,47
Festival	601,25	557,53	7,27
Scipion	605,80	566,81	<b>6,44</b>
Soissons	<b>633,68</b>	<b>567,12</b>	10,50
Thésée	<b>580,00</b>	529,11	8,77

## 12. Principales corrélations entre le rendement en grain, ses composantes et NDVI selon le régime hydrique

Dans ce qui suit nous ne présenterons que les corrélations directes et indirectes les plus importantes.

Certaines corrélations sont communes aux deux régimes hydriques. Le stress hydrique modifie les liaisons entre les caractères et provoque des ruptures de corrélations, c'est le cas des corrélations significatives uniquement au niveau du régime hydrique ETM (voir ci-dessous), et établissement de nouvelles corrélations au niveau du régime hydrique R1 (tableau 30).

### Corrélations significatives communes aux deux régimes hydriques

#### *Corrélations positives*

Les corrélations suivantes sont positives et significatives au niveau des deux régimes (tableau 30) :

- entre le rendement en grain d'une part et d'autre part
  - le nombre de grains/m<sup>2</sup> à la récolte,
  - la matière sèche de la biomasse aérienne à la récolte,
  - la matière sèche des épis/0,35 m<sup>2</sup> à la floraison
  - NDVI,
- entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> d'une part et d'autre part
  - la matière sèche des épis à la floraison,
  - la matière sèche des tiges à la floraison
  - la matière sèche d'une tige à la floraison,
  - la matière sèche de la biomasse à la floraison
  - le nombre d'épis/pied à la floraison
  - la biomasse à la récolte,
  - le nombre d'épis/m<sup>2</sup>,
  - NDVI,

- entre d'une part le poids de 1000 grains et d'autre part
  - le nombre d'épis/pied à la récolte
  - le nombre d'épis/m<sup>2</sup>
  - la matière sèche d'une tige à la floraison,
  - la matière sèche d'une tige à la récolte
- entre la biomasse à la récolte et NDVI

*Corrélations négatives*

Les corrélations suivantes (tableau 30) sont négatives et significatives :

- Le poids de 1000 grains d'une part et d'autre part
  - le nombre d'épis/pied à la récolte et à la floraison,
  - le nombre d'épis/m<sup>2</sup> à la récolte et à la floraison,
  - le nombre de grains/m<sup>2</sup>
- entre d'une part le nombre de grains/m<sup>2</sup> et d'autre part
  - la matière sèche d'une tige à la floraison
  - le nombre d'épis/m<sup>2</sup>
  - le nombre d'épis/pied.

Corrélations significatives uniquement au niveau du régime hydrique ETM

*Corrélations positives*

Les corrélations suivantes sont positives et significatives uniquement dans le régime hydrique ETM (tableau 30) :

- Entre le rendement en grain d'une part et d'autre part
  - l'indice de récolte,
  - le nombre de grains/épi,
  - la matière sèche des tiges/0,35 m<sup>2</sup> à la floraison,
  - la matière sèche d'une tige à la floraison,
  - la matière sèche des feuilles/0,35 m<sup>2</sup> à la floraison,
  - la matière sèche de la biomasse à la floraison,
- Entre le nombre de grains/épi d'une part et d'autre part
  - la matière sèche d'une tige à la floraison,
  - la matière sèche de la biomasse à la récolte,

### *Corrélation négative*

- le poids de 1000 grains et NDVI sont dans ce cas (tableau 30).

### Corrélation au niveau du régime hydrique R1

#### *Corrélations positives*

Les corrélations entre d'une part le rendement en grain et d'autre part le nombre de pieds/m<sup>2</sup>, la matière sèche des balles, et entre le nombre de grains/épi et l'indice de récolte, et entre le poids de 1000 grains et la matière sèche d'un épi à la floraison sont positives et significatives (tableau 30).

#### *Corrélations négatives*

Le poids de 1000 grains d'une part et d'autre part l'indice de récolte et la matière sèche des balles/m<sup>2</sup> et entre le rendement et la matière sèche d'une tige à la récolte sont corrélés de façon négative et significative (tableau 30).

Notre souci est de trouver des relations communes aux deux régimes hydriques permettant de prédire le rendement et ses composantes relativement tôt, soit à la floraison puisque c'est à ce stade que le stress hydrique a commencé. 49,14 % et **46,38 %** (respectivement pour les régimes ETM et R1) de la variabilité du **rendement en grain** sont expliqués par la variabilité de la **matière sèche des épis à la floraison** et 34,69 % et **77,26 %** (respectivement pour les régimes ETM et R1) par la variabilité de **NDVI** et 54,61 % (ETM) et 35,64 % (R1) par la variabilité de la **biomasse à la récolte** (figure 12). Ce dernier caractère bien qu'il soit déterminé à la récolte, on constate que lui aussi est corrélé à **NDVI (44,62 % pour l'ETM et 24,50 % pour R1)** (figure 13).

72,42 % (ETM) et 68,23 % (R1) de la variabilité du nombre de grains/m<sup>2</sup> sont expliqués par la variabilité du **nombre d'épis/m<sup>2</sup> à la floraison**, 52,27 % (ETM) et 42,64 % (R1) par **NDVI**, 46,65 % (ETM) et 22,56 % (R1) par le nombre d'épis/pied à la floraison et 43,56 % (ETM) et 36,72 % (R1) par la matière sèche des **épis à la floraison**, 28,41 % (ETM) et 26,83 % (R1) par la biomasse à la récolte, 40,96 % (ETM) et 22,09 % (R1) par la biomasse à la floraison, 26,63 % (ETM) et 18,40 % (R1) par la matière sèche des tiges à la floraison.

La variabilité du poids de 1000 grains est expliquée par la variabilité de la matière sèche d'une tige à la floraison avec 55,95 % pour l'ETM et 50,13 % pour R1 et par la matière sèche d'une tige à la récolte avec 60,84 % et 46,24 % respectivement pour l'ETM et R1. Il est à noter que le poids de 1000 grains n'influence pas le rendement en grain et que les variables qui favorisent le nombre de grains influence négativement le poids de 1000 grains, c'est le cas du nombre d'épis/pied, du nombre d'épis par mètre carré à la floraison et à la récolte avec des coefficients de détermination très élevés (tableau 30).

La prédiction du rendement en grain, du nombre de grains/m<sup>2</sup> et de la biomasse à la récolte peut donc être réalisée à partir de la matière sèche des épis à la floraison pour les deux premiers caractères et de NDVI pour les trois caractères (figures 24 et 25). Le poids de 1000 grains quant à lui, peut être prédit à l'aide de la matière sèche d'une tige à la floraison, mais ce caractère est corrélé négativement au rendement en grain et au nombre de grains/m<sup>2</sup>.

Tableau 30. Principales corrélations significatives entre le rendement en grain, ses composantes et NDVI selon le régime hydrique

caractères		ETM (ddl = 22)	R1 (ddl = 22)	caractères		ETM (ddl = 22)	R1 (ddl = 22)	
Rendement en grain	Nombre de grains/épi R.	0,415*	0,292	Nombre de grains/m <sup>2</sup>	MS tiges Flo.	0,516**	0,429*	
	Nombre de grains/m <sup>2</sup>	0,409*	0,513*		MS des épis Flo	0,660***	0,606**	
	Matière sèche des balles	0,276	0,508*		MS biomasse Flo.	0,640***	0,470*	
	MS 1 tige R.	-0,066	-0,514*		MS 1 tige Flo	-0,603**	-0,699***	
	Pieds/m <sup>2</sup> R.	-0,057	0,468*		MS T+F+ B R.	0,440*	0,170	
	IR	0,462*	0,266		Nbre d'épis/pied Flo.	0,475*	0,683***	
	MS biomasse R.	0,739***	0,597**		MS biomasse R.	0,533**	0,518**	
	MS tiges Flo	0,646***	0,339		NDVI	0,723***	0,653***	
	MS feuilles Flo.	0,520**	0,092		Nbre d'épis/m <sup>2</sup> Flo	0,851***	0,826***	
	MS épis Flo	0,701***	0,681***		Poids de 1000 grains	Nombre d'épis/pied R.	-0,791***	-0,759***
	MS biomasse Flo.	0,723***	0,278			MS 1 tige R	0,780***	0,680***
	MS 1 tige Flo	0,586**	0,364			Epis/m <sup>2</sup> R	-0,853***	-0,819***
	NDVI	0,589**	0,879***			Nbre grains/m <sup>2</sup>	-0,857***	-0,911***
MS 1 tige Flo.	0,586**	-0,703***	IR	0,226		-0,870**		
MS tiges Flo.	0,682***	0,424*	MS balles/m <sup>2</sup> R.	-0,069		-0,631***		
MS biomasse Flo.	0,625**	0,467*	Nbre épis/m <sup>2</sup> Flo	-0,826***		-0,820***		
Grains/épi	Indice de récolte	0,441*	0,826***	MS 1 tige Flo.	0,748***	0,708***		
	Epis/pied R.	0,829***	0,745***	MS 1 épi Flo.	0,069	0,673***		
	MS 1 tige R.	-0,714***	-0,787***	Nbre épis/pied Flo.	-0,423*	-0,781***		
	IR	-0,035	0,826***	NDVI	-0,417*	-0,356		

NB :

Flo = floraison, R = récolte.

- Corrélations communes aux deux régimes
- Corrélations uniquement au niveau du régime ETM
- Corrélations uniquement au niveau du régime R1

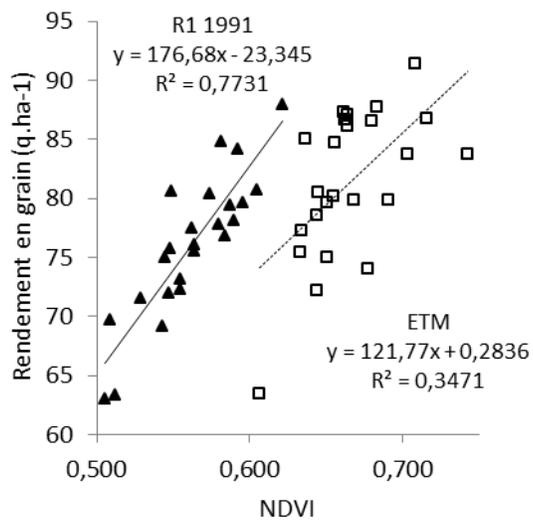
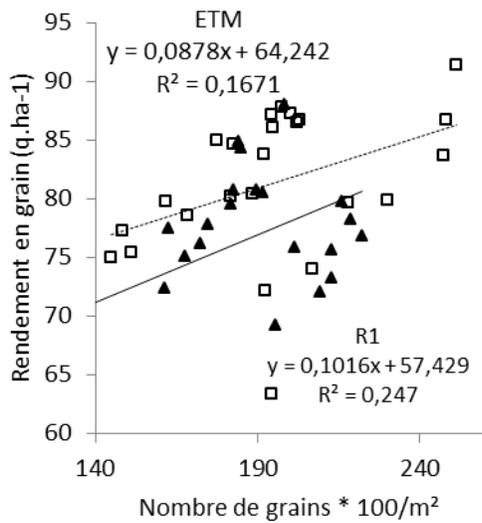
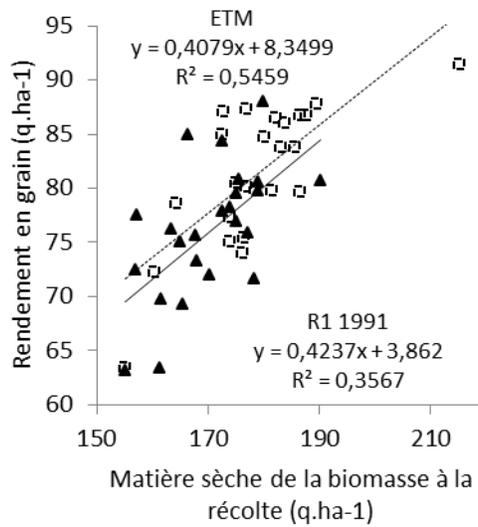
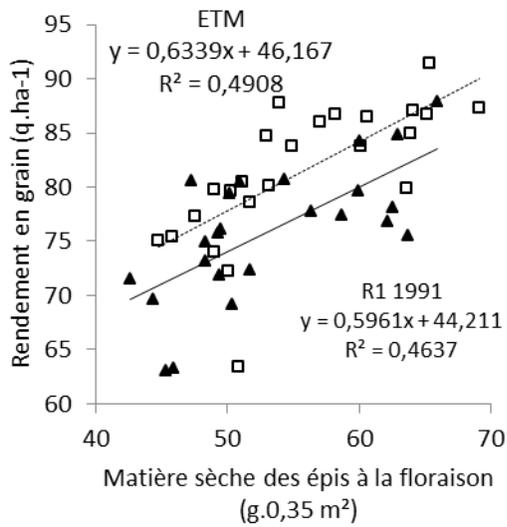


Figure 24. Relations entre le rendement en grain, le nombre de grains/m<sup>2</sup>, la matière sèche de la biomasse à la récolte, matière sèche des épis à la floraison et NDVI par régime hydrique (R1 et ETM), ▲ R1, □ ETM

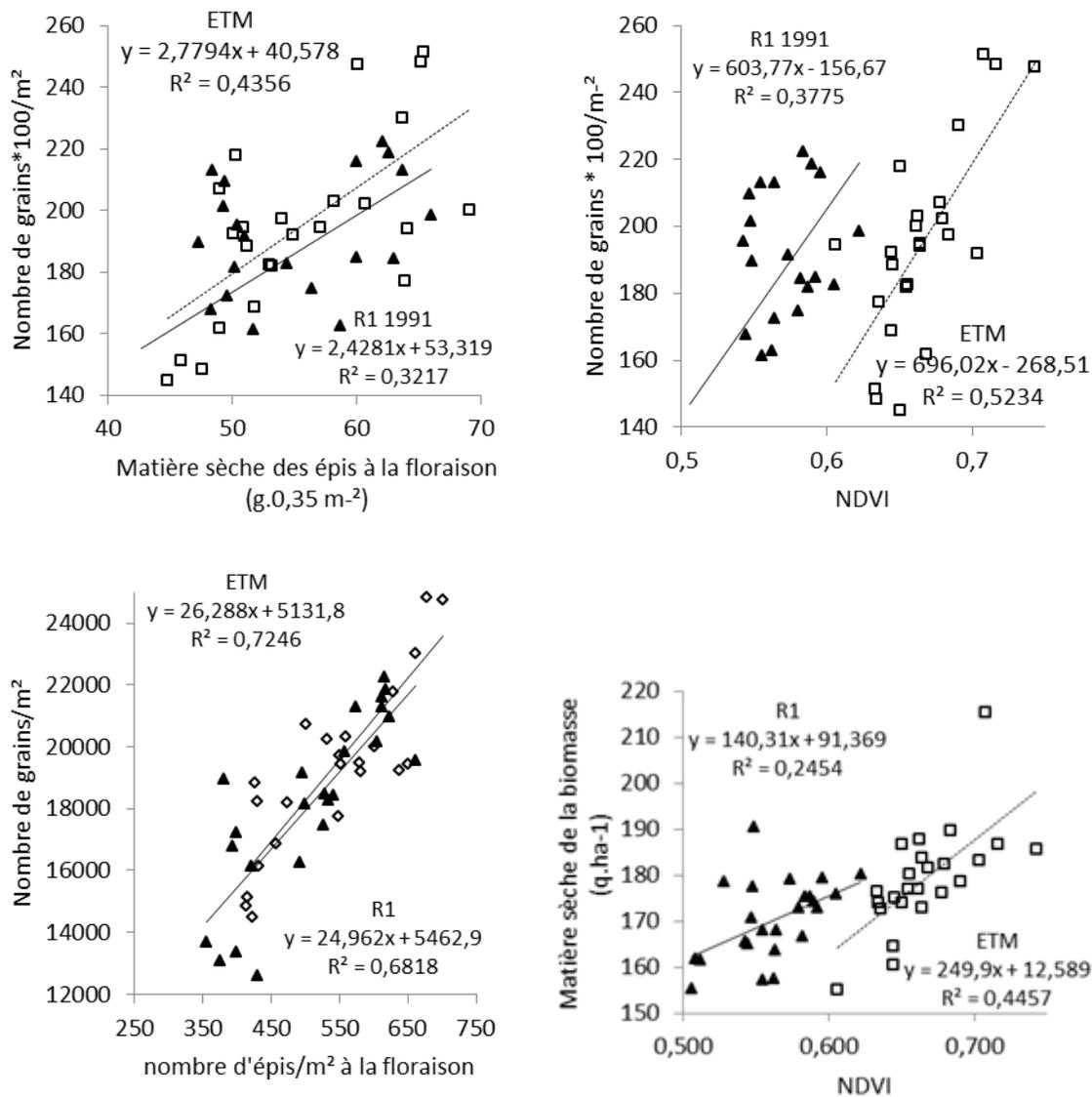


Figure 25. Relations entre le nombre de grains/m<sup>2</sup>, la matière sèche de la biomasse à la récolte, la matière sèche des épis à la floraison et NDVI par régime hydrique (R1 ▲ et ETM □).

### 13. Synthèse des résultats de l'essai réalisé en 1991

Pour tous les caractères relatifs à la plante, les effets génétiques sont supérieurs à l'effet régimes hydriques à l'exception de la sénescence, de la remobilisation et de la translocation où les effets régimes hydriques sont supérieurs aux effets génétiques.

L'application d'un stress hydrique modéré (R1) provoque une réduction générale du rendement et de ses composantes (nombre d'épis/plante, nombre d'épis/m<sup>2</sup>, nombre de grains/m<sup>2</sup>), de la matière sèche de la biomasse aérienne, des épis/0,35 m<sup>2</sup>, d'un épi et des tiges/0,35 m<sup>2</sup> à la récolte ; à la floraison la matière sèche d'une tige et du nombre d'épis/m<sup>2</sup> sont réduits. La réduction a touché toutes les variétés de la même façon.

La variété Artaban a été pénalisée au niveau du nombre de pieds/m<sup>2</sup> avec en moyenne 75 pieds/m<sup>2</sup> en moins par rapport à la moyenne des autres variétés ce qui a entraîné une meilleure alimentation des grains et un poids de 1000 grains supérieur à toutes les variétés. Bien que la variété Artaban ait été lésée par le nombre de pieds/m<sup>2</sup>, celle-ci a pu rattraper la variété Festival dans les régimes hydrique ETM et R1 au niveau du rendement en grain (rendement équivalent statistiquement). Festival est la variété qui a donné le plus faible rendement à l'ETM et R1. La différence observée entre les autres variétés pour le poids de 1000 grains, le nombre de grains/m<sup>2</sup> s'expliquerait par des potentialités génétiques différentes puisque le nombre de pieds/m<sup>2</sup> est identique.

La sénescence semble être liée à l'âge de la feuille, les feuilles apparues les premières sont les premières à vieillir. Cependant, le régime R1 (stress modéré) entraîne une accélération de la sénescence des trois étages de feuilles.

L'étude de la surface des courbes de la surface verte de la feuille étendard à l'ETM et au niveau du régime R1 montre que la variété Soissons est celle qui est la plus affectée par le stress hydrique tandis que la variété Scipion est la moins affectée, le classement des variétés pour le pourcentage de réduction de la surface verte est le suivant : Soissons > Festival = Artaban > Beauchamp > Thésée > Scipion

L'indice foliaire n'est pas affecté par le stress hydrique car les mesures ont été effectuées au stade floraison, or le stress n'a commencé qu'à ce stade.

Pour l'ETR de la période Avril – Mai, les effets génétiques sont supérieurs à l'effet du régime hydrique car à cette période, il y avait suffisamment d'eau dans le sol et l'effet du stress hydrique n'a commencé à s'installer que vers la fin du mois de Mai. Cependant, pour la majorité des caractères relatifs à l'eau (disponibilité dans le sol et dans la plante), l'effet régime hydrique est supérieur aux effets génétiques. Le stress hydrique affecte l'ensemble des variétés de la même façon.

La moyenne de NDVI montre aussi un effet régime hydrique supérieur aux effets génétiques car le stress hydrique a réduit la surface foliaire (sénescence) et donc la réflectance est plus élevée.

Une augmentation du potentiel hydrique foliaire (de base et midi solaire) pour toutes les variétés est constatée dans le régime R1, l'eau est retenue avec une force plus grande dans les cellules. A l'ETM, la variété Soissons se détache des trois autres variétés avec une valeur plus faible pour le potentiel hydrique foliaire de base, par contre au niveau du potentiel hydrique foliaire midi solaire c'est la variété Artaban qui se détache des trois autres variétés avec une valeur plus faible. En R1, les variétés Artaban, Thésée et Festival ont des valeurs de potentiel hydrique de base et midi solaire équivalentes en R1 tandis que la variété Soissons se détache de ce lot avec une valeur plus élevée. Cependant, par rapport au régime

à l'ETM, la variété Thésée montre la plus grande augmentation du potentiel hydrique foliaire de base (252,37 %) et Scipion la plus faible augmentation (167,19 %) ; concernant le potentiel hydrique foliaire midi solaire, Beauchamp (29,86 %) possède la plus grande augmentation et Thésée la plus faible augmentation (17,11 %).

La non signification de l'effet régimes hydriques au niveau de l'ETR pour la période avril-mai est due au fait que le stress à cette période n'avait pas encore commencé. Pour les deux autres périodes, il est clair que le stress hydrique provoque une diminution importante de la consommation en eau (soit 2 et 1,54 fois pour mai - juillet et avril - juillet respectivement). Les variétés Soissons et Festival sont celles qui consomment le plus d'eau pendant la période mai – juillet correspondant au stress hydrique. La non signification de l'effet variété pendant la période avril – juillet est due au fait qu'en avril il n'y a pas eu de stress.

Les variétés ont montré des comportements différents concernant la consommation en eau (ETR) pour la période de mai à juillet, en effet la variété Artaban est celle pour laquelle la réduction est la plus importante (52,19 %), tandis que la variété Soissons (37,06 %) est celle qui a montré la plus faible réduction qui est probablement due à une régulation stomatique plus importante.

Les teneurs en eau relative de base et midi solaire ont été réduites sous l'effet du stress hydrique. La variété Thésée semble montrer une teneur en eau relative de base très proche entre l'ETM et le régime restrictif (R1). Au niveau de la teneur en eau relative midi solaire toutes les variétés se sont comportées de la même façon.

L'étude des variables explicatives biologiques de cette réduction a montré que la matière sèche à la floraison (poids des épis/0,35 m<sup>2</sup> et d'une tige), la matière sèche à la récolte (un épi, tiges/0,35 m<sup>2</sup>) ont aussi été réduites. La diminution de la disponibilité de l'eau du sol a entraîné une diminution de la consommation en eau par les plantes (ETR des périodes Avril – Juillet et Mai – Juillet), de la teneur en eau relative de base et midi solaire ce qui a provoqué une sénescence précoce des feuilles et une diminution de la différence normalisée (NDVI). Cette indisponibilité de l'eau dans le sol a entraîné une augmentation du potentiel hydrique foliaire de base et midi solaire et de la remobilisation des assimilats de la tige vers les grains et une diminution de la translocation des assimilats provenant de la photosynthèse due à une diminution de la surface photosynthétique des feuilles, il est à noter que la translocation est toujours plus importante que la remobilisation quel que soit le régime hydrique.

Les valeurs de NDVI des variétés Artaban et Soissons sont les plus faibles, par conséquent, ces dernières sont les plus sensibles au stress hydrique tandis que la variété Scipion est la moins affectée.

L'étude des corrélations montre que le rendement en grain est principalement corrélé à la matière sèche de la biomasse à la récolte, à NDVI, à la matière sèche des épis à la floraison et au nombre de grains/m<sup>2</sup>.

L'analyse des corrélations entre les différents caractères montre que le stress hydrique modifie les liaisons entre les caractères et provoque des ruptures de corrélations, c'est le cas des corrélations significatives uniquement au niveau du régime hydrique ETM et établissement de nouvelles corrélations au niveau du régime hydrique R1.

## **II. ESSAI REALISE EN 1992**

### **1. Effet du stress hydrique sur le rendement en grain et ses composantes, la biomasse et l'indice de récolte**

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 13) révèle des différences significatives entre les variétés ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) et entre les régimes hydriques ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des caractères. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est significative pour le rendement en grain ( $p < 0,01$ ), le nombre de grains/épi ( $p < 0,05$ ), le poids de 1000 grains ( $p < 0,001$ ) et la biomasse à la récolte ( $p < 0,05$ ) indiquant la présence d'une variabilité génétique au niveau des caractères étudiés aussi bien qu'une diversité des conditions de croissance dans les différents environnements.

Les coefficients de variation (annexe 1, tableau 13) sont faibles pour tous les caractères, ils varient de 1,7 % (poids de 1000 grains) à 21,18 % (matière sèche de la biomasse aérienne à la récolte) pour l'effet variété, de 1,73 % (indice de récolte) à 12,81 % (biomasse aérienne) pour l'effet régime hydrique et de 3 % (poids de 1000 grains) à 7,52 % (biomasse aérienne) pour l'interaction variété  $\times$  régime hydrique.

Le pourcentage de variation (annexe 1, tableau 13) expliqué par les effets génétiques est inférieur à celui des effets régimes hydriques pour le rendement en grain (7,4 % et 74,83 % respectivement), la matière sèche de la biomasse aérienne à la récolte (23,19 % et 55,07 %) et l'indice de récolte (41,10 % et 44,89 % respectivement). Par contre pour le nombre de pieds/m<sup>2</sup> (36,91 %), le nombre d'épis/m<sup>2</sup> (93,71 %), le nombre de grains/épi (64,65 %), le nombre de grains/m<sup>2</sup> (20,54 %) et le poids de 1000 grains (65,28 %) les effets génétiques sont supérieurs aux effets régimes hydriques. Concernant le pourcentage de variation expliqué par l'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques, celui-ci reste inférieur aux effets régimes hydriques et varie de 0,39 % pour le nombre d'épis/m<sup>2</sup> à 10,93 % pour la matière sèche de la biomasse aérienne à la récolte.

Pour les traitements sous stress, tous les caractères présentent des moyennes inférieures à celles du traitement conduit à l'ETM (tableaux 32 et 33).

La figure 26 montre l'essai et les abris mobiles tandis que les figures 27, 28 et 29 montrent l'effet du stress hydrique.



Figure 26. Photo illustrant l'essai et les abris mobiles le 18 juin.



Figure 27. Photo montrant l'effet du stress hydrique sur la variété Ambral (R2, ETM et R1).



Figure 28. Photo montrant l'effet du stress hydrique sur la variété Soissons (R2, ETM et R1)



Figure 29. Photo montrant le contraste entre une parcelle à l'ETM (a) et une parcelle stressée à l'épiaison (R2) de la variété Ambral (b) (18 Juin 1992)

### Rendement en grain

Les moyennes du rendement en grain (tableau 31a) varient de  $104,22 \text{ q.ha}^{-1}$  (Ambral) à  $97,96 \text{ q.ha}^{-1}$  (Festival) au régime ETM, de  $98,61 \text{ q.ha}^{-1}$  (Soissons) à  $86,76 \text{ q.ha}^{-1}$  (Ambral) au régime R1. et de

78,33 q.ha<sup>-1</sup> (Soissons) à 57,28 q.ha<sup>-1</sup> (Ambral) au régime R2. Au niveau du régime ETM, toutes les variétés donnent un rendement en grain statistiquement équivalent. Tandis qu'aux régimes R1 et R2, les variétés se comportent différemment.

En R1 (tableau 31a), la variété Ambral présente un pourcentage de réduction (16,76 %) par rapport à l'ETM supérieur à celui des trois autres variétés. Au niveau des variétés de blé tendre, la variété Soissons présente le plus faible pourcentage de réduction (0,68 %), Festival (6,23 %) et Thésée (5,66 %) présentent des pourcentages de réduction équivalents.

En R2 (tableau 31a), c'est encore la variété Ambral avec 45,05 % de réduction qui est de loin la plus affectée par le stress hydrique par rapport aux variétés de blé tendre. La variété Festival (26,17 %) est celle qui est la plus affectée suivie de Thésée (23,64 %) et de soissons (21,11 %).

En moyenne le régime hydrique R1 présente une plus faible réduction (7,44 %) par rapport à l'ETM comparé à la réduction du rendement en grain en R2 qui est plus affecté par le stress hydrique (29,17 %) (tableau 31a).

L'indice de sensibilité à la sécheresse de Fischer donne pour R2 et R1 le même classement des variétés soit Ambral > Festival > Thésée > Soissons (tableau 34).

#### Nombre de pieds/m<sup>2</sup>

Les moyennes varient de 324,67 pieds/m<sup>2</sup> (Ambral) à 280,89 pieds/m<sup>2</sup> (Thésée) (tableau 31a). Ce caractère n'est pas affecté par le stress hydrique car ce dernier n'a commencé qu'au stade gonflement pour R2 et floraison pour R1. A ces stades, le nombre de pieds/m<sup>2</sup> est déjà déterminé.

#### Nombre d'épis/m<sup>2</sup>

Les moyennes de ce caractère varient de 710,62 (Festival) à 443,27 épis/m<sup>2</sup> (Thésée) (tableau 31a). Ce caractère n'est pas affecté par le stress hydrique car ce dernier n'a commencé qu'au stade gonflement pour R2 et floraison pour R1. A ces stades, le nombre d'épis/m<sup>2</sup> est déjà déterminé.

#### Nombre de grains/épi et de grains/m<sup>2</sup>

Les moyennes du nombre de grains/épi (tableau 31a) et du nombre de grains/m<sup>2</sup> (tableau 31b) varient pour le premier de 31,41 (Festival) à 40,48 grains/épi (Thésée) et de 17 948,41 (Thésée) à 23 955,31 (Soissons) grains/m<sup>2</sup> pour le deuxième.

Le nombre de grains/m<sup>2</sup> est affecté par le stress hydrique de manière identique pour les quatre variétés. Les pourcentages de réduction de ce caractère en R1 et R2 par rapport au régime conduit à l'ETM sont respectivement de 6,93 % à 17,44 % respectivement. Pour le nombre de grains/épi,

Ambral et Thésée présentent les pourcentages de réduction les plus élevés avec respectivement 20,68 et 17,03 (tableau 31b). Les pourcentages de réduction moyens par rapport à l'ETM de R1 et R2 sont de 5,78 % et 14,32 % pour le nombre de grains/épi.

### Poids de 1000 grains

Quel que soit le régime hydrique la variété Thésée surpasse les autres variétés avec des moyennes de 51,64 g (ETM), 52,87 g (R1) et 49,19 g (R2) (tableau 32, figure 30). En R1, Soissons suivie de Festival ont les plus faibles poids de 1000 grains avec 40,40 g et 40,10 g respectivement. En R2, les variétés Festival et Soissons ont des moyennes équivalentes statistiquement avec respectivement 35,80 g et 35,68 g. Ambral est celle qui a la moyenne la plus faible mais statistiquement identique à Festival et Soissons avec 33,93 g.

On observe deux groupes de réaction face au stress hydrique : Ambral et Festival sont affectées quel que soit l'importance du stress, tandis que Soissons et Thésée montrent un poids de 1000 grains plus élevé en R1 (tableau 32, figure 30). En R2, le premier groupe montre une très forte réduction pour Ambral (30,14 %) et moyenne pour festival (12,80 %) ; le deuxième groupe présente des réductions plus faibles : Soissons (8,41 %) et Thésée moins de 5%.

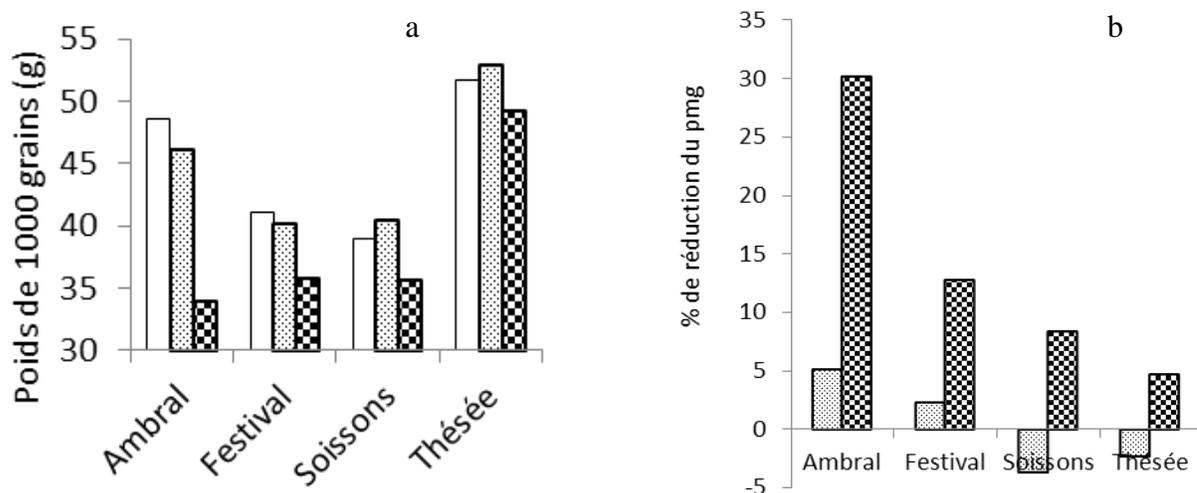


Figure 30. Poids de 1000 grains par variété et par régime hydrique ETM, R1, R2 (a) et % de réduction du pmg des régimes R1, R2 par rapport à l'ETM (b).

### Biomasse aérienne

La moyenne des variétés (tableau 32, figure 31) varie de 159,67 q.ha<sup>-1</sup> pour Ambral à 185,04 q.ha<sup>-1</sup> pour Soissons. La moyenne des régimes hydriques varie de 184,87 q.ha<sup>-1</sup> pour le régime conduit à l'ETM à 150,54 q.ha<sup>-1</sup> pour le régime R2.

En moyenne le régime hydrique R1 présente une plus faible réduction (5,7 %) par rapport à l'ETM, en R2 elle passe à 18,6 % (tableau 32).

### Indice de récolte

La moyenne des variétés (tableau 32, figure 31) varie de 0,52 pour Thésée à 0,46 pour Ambral. La moyenne des régimes hydriques varie de 0,50 (ETM) à 0,45 (R2).

### Indice de sensibilité de Fisher

L'indice de sensibilité de Fischer (SSI) donne en R2 le classement suivant :

Ambral > Festival > Soissons > Thésée (tableau 33)

Tableau 31a. Moyennes et pourcentages de réduction du rendement, du nombre de pieds/m<sup>2</sup>, du nombre d'épis/m<sup>2</sup>

Variétés et moyennes des régimes	Rendement en grain (q ha <sup>-1</sup> )						Nombre de pieds/m <sup>2</sup>	Nombre d'épis/m <sup>2</sup>	Nombre de grains/épi			
	Moy. des variétés	ETM	R1		R2				Moy. des variétés	Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.						
Ambral	82,75 b	<b>104,22 a</b>	86,76 b	16,76	57,27 b	45,05	<b>324,67 a</b>	598,37 b	31,89 c			
Festival	87,38 a	97,96 a	91,85 ab	6,23	72,32 a	26,17	315,67 ab	<b>710,62 a</b>	<b>31,41 c</b>			
Thésée	<b>92,14 a</b>	102,12 a	96,32 a	5,66	77,98 a	23,64	<b>280,89 b</b>	<b>443,27 c</b>	<b>40,48 a</b>			
Soissons	92,08 a	<b>99,29 a</b>	<b>98,61 a</b>	0,68	<b>78,33 a</b>	21,11	301,11 ab	708,87 a	33,86 b			
Moy ETM	<b>100,90 a</b>						<b>300,75</b>	<b>627,75</b>	<b>36,88 a</b>			
Moy R1	93,39 b			7,44			<b>312,92</b>	617,48	34,75 b	<b>5,78</b>		
Moy. R2	<b>71,47 c</b>					29,17	303,08	600,62	<b>31,60 c</b>	14,32		

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 31b : Moyennes du nombre de grains/épi et du nombre de grains/m<sup>2</sup>

Variétés et régimes	Nombre de grains/épi						Nombre de grains/m <sup>2</sup>		
	Classement général des variétés et des traitements	Classement des interactions			% de réduc.		Classement général des variétés et des traitements	% de réduc.	
		ETM	R1	R2	R1	R2		R1	R2
AMB	31,89 c	35,83 b	31,41 c	<b>28,42 c</b>	12,34	20,68	19049,22 c		
FES	<b>31,41 c</b>	<b>32,68 c</b>	31,99 c	29,55 c	2,11	9,58	22328,71 b		
SOI	33,86 b	35,00 bc	34,63 b	31,95 b	<b>1,06</b>	<b>8,71</b>	<b>23955,31 a</b>		

THE	<b>40,48 a</b>	<b>43,99 a</b>	<b>40,97 a</b>	<b>36,50 a</b>	<b>6,87</b>	<b>17,03</b>	<b>17948,41 c</b>		
ETM	<b>36,88 a</b>						<b>22660,56 a</b>		
R1	34,75 b				5,78		21091,09 a	6,93	
R2	<b>31,60 c</b>					<b>14,32</b>	<b>18709,59 b</b>		<b>17,44</b>

Tableau 32. Moyennes et pourcentages de réduction du poids de 1000 grains, de la biomasse aérienne et de l'indice de récolte

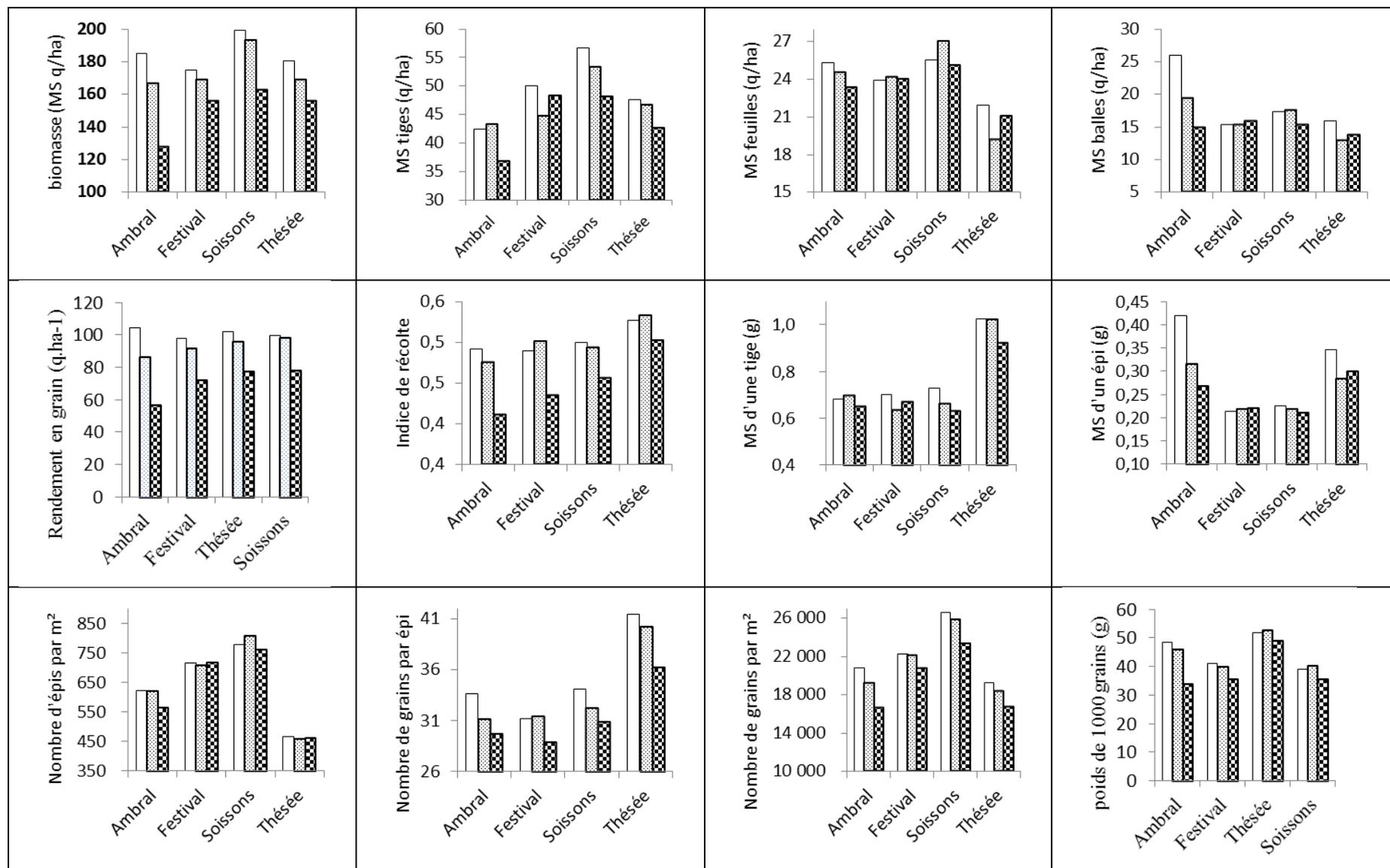
Variétés et moyennes des régimes	Poids de 1000 grains (g)						MS Biomasse aérienne récolte (q ha <sup>-1</sup> )		Indice de récolte
	Moy. des variétés	ETM	R1		R2		Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.			
Ambral	42,86 b	48,56 b	46,08 b	5,11	<b>33,93 b</b>	30,14	159,67		0,459 b
Festival	38,99 c	41,06 c	<b>40,10 c</b>	2,32	35,80 b	12,80	166,55		0,475 b
Thésée	<b>51,23 a</b>	<b>51,64 a</b>	<b>52,87 a</b>	-2,38	<b>49,19 a</b>	4,74	168,42		<b>0,521 a</b>
Soissons	<b>38,35 c</b>	<b>38,96 d</b>	40,40 c	-3,69	35,68 b	8,41	185,04		0,483 b
Moy ETM	<b>45,06 a</b>						184,87 a		<b>0,502</b>
Moy R1	44,86 a			<b>0,43</b>			174,36 a	5,68	0,501
Moy. R2	38,65 b					<b>14,22</b>	150,54 b	18,56	<b>0,451</b>

NB: réduc. = réduction

Le rendement et le poids de 1000 grains ont été calculés sur la base de 15 % d'humidité

Tableau 33. Indice de sensibilité de FISHER

Variétés	Régime	Rendement en grain	PMG	Nombre de grains/épi	Nombre d'épis/m <sup>2</sup>	Nombre de grains/m <sup>2</sup>
Ambral	2	<b>2,461</b>	<b>4,115</b>	<b>2,059</b>	<b>0,383</b>	<b>1,762</b>
Festival	2	1,430	1,748	0,953	<b>2,197</b>	1,263
Soissons	2	<b>1,154</b>	1,593	<b>0,867</b>	1,708	<b>1,151</b>
Thésée	2	1,291	<b>0,950</b>	1,695	1,246	1,637
Ambral	1	<b>0,916</b>	<b>0,698</b>	<b>1,228</b>	<b>-0,026</b>	<b>1,014</b>
Festival	1	0,341	<b>0,317</b>	0,210	0,641	<b>0,328</b>
Soissons	1	<b>0,037</b>	0,486	<b>0,105</b>	1,065	0,367
Thésée	1	0,310	0,318	0,683	<b>0,330</b>	0,637



MS : matière sèche

Figure 31 : Matière sèche des différents organes, indice de récolte, nombre d'épis par mètre carré, nombre de grains par épi, par m<sup>2</sup> et pmg par régime hydrique :

ETM R1 R2

Les figures 32 et 33 montrent l'effet du stress hydrique sur la longueur du col de l'épi et des épis de la variété Ambral.

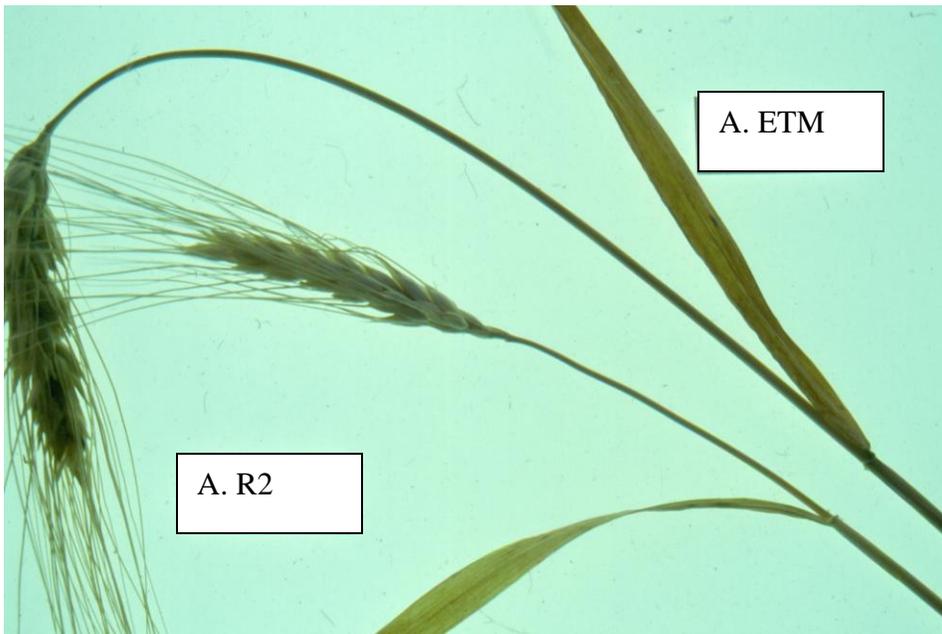


Figure 32. Photo montrant l'effet du stress hydrique au stade épiaison (R2) comparé au traitement conduit à l'ETM sur la longueur du col de l'épi et les épis de la variété Ambral.

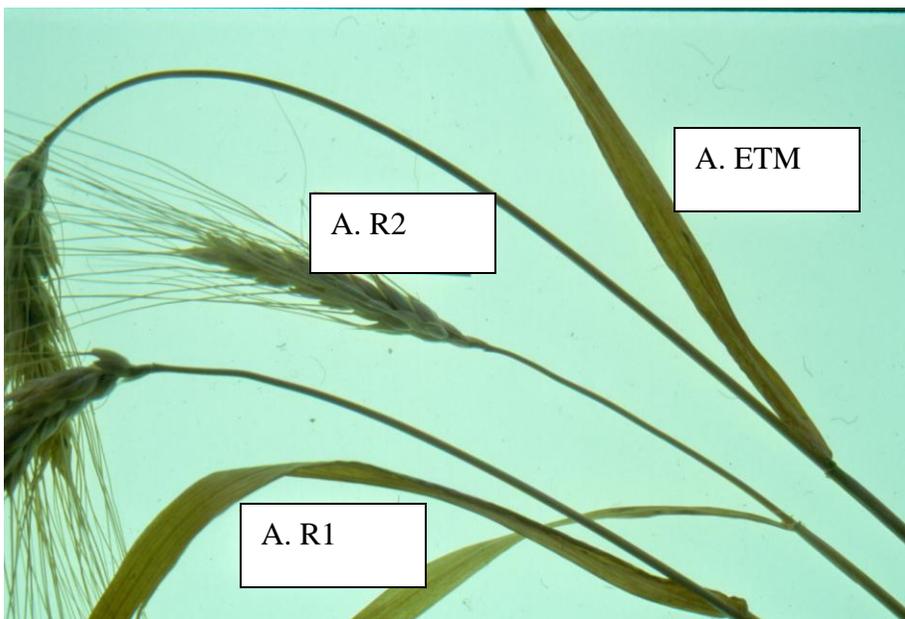


Figure 33. Photo représentant l'effet du stress hydrique aux stades épiaison (R2), floraison (R1) comparés au traitement conduit à l'ETM sur les épis et le col de l'épi de la variété Ambral.

## **2. Effet du stress hydrique sur la production de matière sèche des différents organes de la plante à la floraison et à la récolte**

L'analyse de la variance (annexe 1, tableaux 14 et 15) montre un effet variétés significatif ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des caractères à l'exception de la matière sèche des feuilles à la floraison, et à la récolte; des effets régimes hydriques et interaction variétés  $\times$  régimes hydriques non significatifs pour tous les caractères. Les coefficients de variation au niveau des variétés varient de 0,40 % à 44,05 % respectivement pour la matière sèche de la biomasse à la floraison et la matière sèche des feuilles mortes à la floraison, au niveau des régimes hydriques, ils varient de 4,04 % pour la matière sèche des feuilles à 42,28 % pour la matière sèche des balles à la récolte et de 2,20 % pour la matière sèche des tiges à 43,53 % pour la matière sèche d'un épi à la floraison.

A la floraison (annexe 1, tableau 14), une grande portion de la somme des carrés des écarts est due aux effets génétiques allant de 95,98 % (matière sèche des tiges) à 29,03 % (matière sèche des feuilles vertes), les pourcentages expliqués par les effets régimes hydriques varient de 0,50 % (matière sèche des feuilles mortes) à 16,26 % (matière sèche des feuilles vertes). Les pourcentages de la variabilité expliqués par les effets dus à l'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques varient 0,28 % (matière sèche d'un épi) à 24,54 % (matière sèche des épis).

A la récolte (annexe 1, tableau 15), une grande partie de la somme des carrés des écarts est due aux effets génétiques avec des valeurs allant de 36,25 % (matière sèche des balles) à 81,83 % (matière sèche d'une tige) ; la variation expliqués par les effets régimes hydriques et interaction variétés  $\times$  régimes hydriques sont beaucoup plus faible avec des valeurs allant de 1,32 % (matière sèche des feuilles) à 15,52 % (matière sèche des tiges) et de 1,89 % (matière sèche des tiges) à 26,54 % (matière sèche des balles) respectivement.

Les moyennes des régimes hydriques (tableau 34) sont équivalentes statistiquement pour les caractères matière sèche biomasse aérienne, matière sèche des feuilles mortes, matière sèche des feuilles vertes, matière sèche des épis, matière sèche d'une tige, matière sèche des tiges à la floraison et matière sèche d'un épi et des balles à

la récolte. A la récolte, la matière sèche d'une tige varie de 0,721 g pour R2 à 0,784 g pour l'ETM, le pourcentage de réduction par rapport à l'ETM est de 3,70 % pour R1 et 8,08 % pour R2. La matière sèche des tiges à la récolte varie de 43,94 q.ha<sup>-1</sup> (R2) à 49,21 q.ha<sup>-1</sup> (ETM) avec une réduction par rapport à l'ETM de 4,49 % (R1) et 10,71 % (R2), tandis que la matière sèche des feuilles varie de 24,17 q.ha<sup>-1</sup> à 23,37 q.ha<sup>-1</sup> avec une réduction par rapport à l'ETM de 1,82 % (R1) et 3,31 % (R2).

A la floraison (tableau 34), la matière sèche de la biomasse varie de 119,55 qha<sup>-1</sup> (Soissons) à 106,76 qha<sup>-1</sup> (Thésée), la matière sèche des feuilles vertes varie de 21,09 q.ha<sup>-1</sup> (Festival) à 23,82 q.ha<sup>-1</sup> (Soissons), ces valeurs sont statistiquement équivalentes. Ambral donne la plus forte valeur de matière sèche de feuilles mortes avec 9,53 q.ha<sup>-1</sup> tandis que Soissons la plus faible valeur avec 4,01 q.ha<sup>-1</sup>. La matière sèche des épis varie de 14,68 q.ha<sup>-1</sup> (Thésée) à 27,21 q.ha<sup>-1</sup> (Ambral). La matière sèche d'un épi varie de 0,433 g pour Ambral à 0,236 g pour Festival, celle d'une tige de 1,505 g (Thésée) à 0,953 g (Soissons) et celle des tiges de 73,06 q.ha<sup>-1</sup> (Soissons) à 60,24 q.ha<sup>-1</sup> (Ambral). La variété de blé dur Ambral se distingue nettement des variétés de blé tendre par une masse foliaire et des épis plus importantes; la variété de blé tendre Thésée se détache nettement par le poids de la tige (figure 34).

A la récolte (tableau 34, figure 34), la matière sèche d'une tige varie de 0,991 g (Thésée) à 0,670 g (Festival), celle des tiges de 52,68 q.ha<sup>-1</sup> (Soissons) à 40,81 (Ambral) q.ha<sup>-1</sup> et celle des feuilles de 25,91 q.ha<sup>-1</sup> (Soissons) à 20,70 q.ha<sup>-1</sup> (Thésée).

La matière sèche des balles varie de 14,21 q.ha<sup>-1</sup> (Thésée) à 20,12 (Ambral).

Tableau 34. Moyennes et pourcentages de réduction de la matière sèche à la floraison et à la récolte

Variétés et moyennes des traitements	Matière sèche à la floraison							Matière sèche à la récolte				
	Biomasse (q.ha <sup>-1</sup> )	Feuilles mortes (q.ha <sup>-1</sup> )	Feuilles vertes (q.ha <sup>-1</sup> )	Epis (q.ha <sup>-1</sup> )	1 épi (g)	1 Tige (g)	Tiges (q.ha <sup>-1</sup> )	1 épi	1 Tige	Tiges (q.ha <sup>-1</sup> )	Feuilles (q.ha <sup>-1</sup> )	Balles (q.ha <sup>-1</sup> )
Ambral	118,10 b	<b>9,53 a</b>	22,10	<b>27,21 a</b>	<b>0,433 a</b>	0,957 ab	<b>60,24 d</b>	<b>0,335 a</b>	0,678 b	<b>40,81 c</b>	24,40 a	<b>20,12 a</b>
Festival	111,41 c	6,45 b	<b>21,09</b>	16,57 b	<b>0,236 b</b>	0,956 b	67,29 b	0,217 b	<b>0,670 b</b>	47,73 b	24,02 ab	15,47 b
Soissons	<b>119,55 a</b>	<b>4,01 c</b>	<b>23,82</b>	18,66 b	0,243 b	<b>0,953 b</b>	<b>73,06 a</b>	<b>0,216 b</b>	0,674 b	<b>52,68 a</b>	<b>25,91 a</b>	16,78 b
Thésée	<b>106,76 d</b>	4,30 c	21,59	<b>14,68 b</b>	0,334 ab	<b>1,505 a</b>	66,18 c	0,309 a	<b>0,991 a</b>	45,67 b	<b>20,70 b</b>	<b>14,21 b</b>
Moy ETM	113,73	<b>6,39</b>	22,22	<b>18,81</b>	<b>0,303</b>	1,08	66,33	<b>0,301</b>	<b>0,784 a</b>	<b>49,21 a</b>	<b>24,17 a</b>	<b>18,67</b>
Moy R1	<b>117,81</b>	<b>5,49</b>	<b>23,05</b>	<b>19,83</b>	<b>0,320</b>	<b>1,13</b>	<b>69,43</b>	0,259	0,755 b	47,00 ab	23,73 ab	16,30
Moy R2	<b>110,32</b>	6,35	<b>21,18</b>	19,20	0,312	<b>1,06</b>	<b>64,31</b>	<b>0,248</b>	<b>0,721 b</b>	<b>43,94 b</b>	<b>23,37 b</b>	<b>14,96</b>
R1 % réduction par rapport à l'ETM	-	-	-	-	-	-	-	-	3,70	4,49	1,82	-
R2 % réduction par rapport à l'ETM	-	-	-	-	-	-	-	-	8,04	10,71	3,31	-

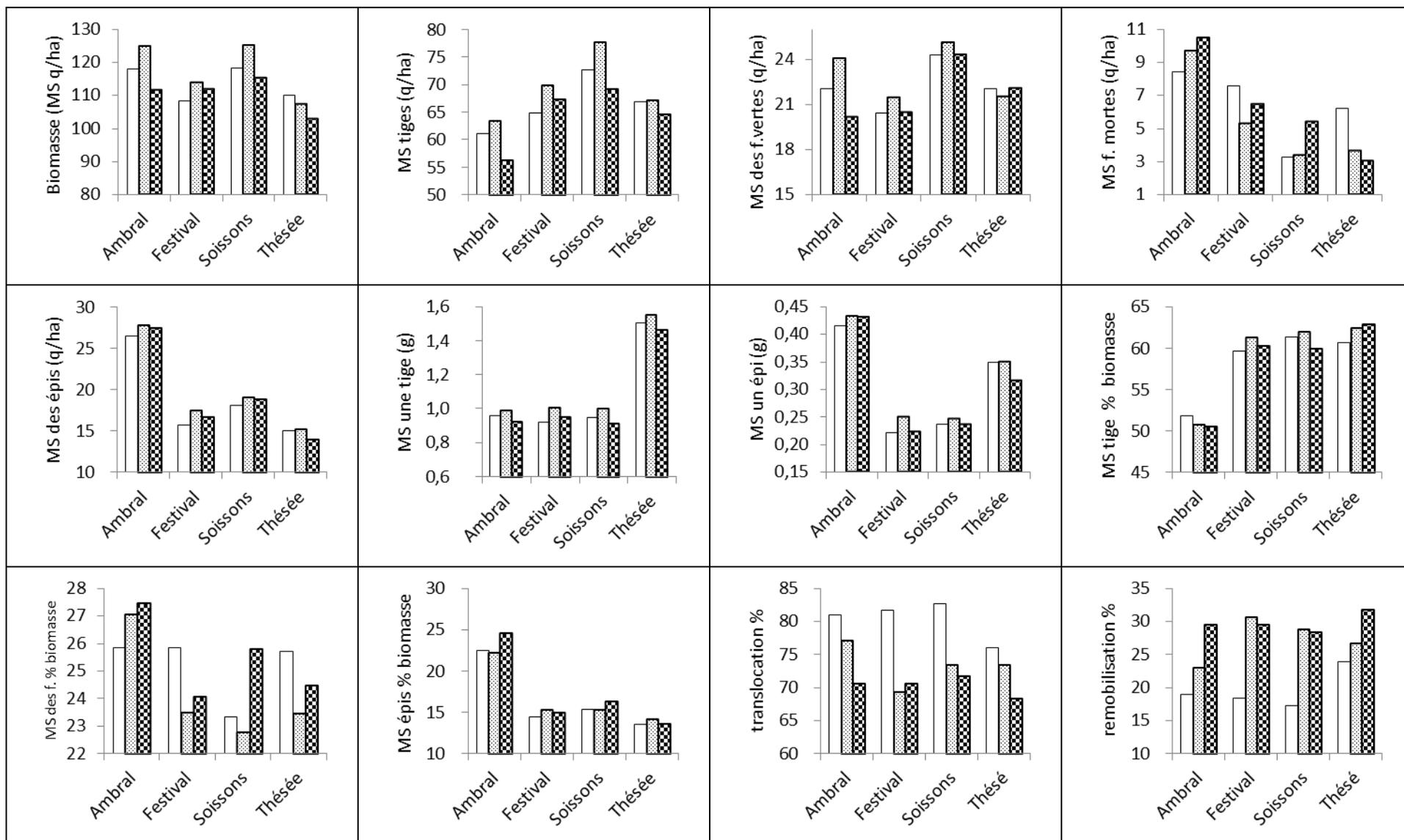


Figure 34. Matière sèche des différents organes à la floraison, biomasse, translocation et remobilisation selon les régimes hydriques : ETM R1 R2 .

### 3. Effet du stress hydrique sur la translocation et la remobilisation de la matière sèche

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 16) montre un effet variétés non significatif au niveau de la translocation et de la remobilisation. L'effet régimes hydriques est significatif ( $p < 0,05$ ).

Les effets régimes hydriques et les effets d'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques expliquent respectivement 45,15 % et 8,63 % de la variation, tandis que les effets variétés expliquent 4,63 % pour les deux caractères (annexe 1, tableau 16).

Les coefficients de variation sont élevés pour la remobilisation (70,71 %, 20,29 % et 21,13 % respectivement pour les effets variétés, régimes hydriques et interaction), et élevés à faibles pour la translocation (24,25 %, 6,95 % et 7,25 % respectivement pour les effets variétés, régimes hydriques et interaction variétés  $\times$  régimes hydriques).

Les moyennes (tableau 35, figure 34) des variétés varient de 72,58 % (Thésée) à 76,20 % (Ambral) pour la translocation et de 23,80 % (Ambral) à 27,42 % (Thésée) pour la remobilisation. Les moyennes des régimes hydriques varient de 80,34 % (ETM) à 70,28 % (R2) et de 19,66 % (ETM) à 29,72 % (R2) respectivement pour la translocation et la remobilisation.

Les pourcentages de réduction (tableau 35) et d'augmentation les plus élevés sont obtenus au niveau du régime hydrique R2 avec 12,52 % et -51,16 % pour la translocation et la remobilisation respectivement. Le stress hydrique a provoqué une diminution de la translocation au profit de la remobilisation (tableau 35).

Tableau 35. Moyennes et pourcentages de réduction des assimilâts remobilisés (remobilisation) à partir de la tige et provenant de la photosynthèse (translocation)

Moyennes des variétés et % de réduction	Translocation (%)	Remobilisation (%)
Ambral	76,20	23,80
Festival	73,85	26,15
Soissons	75,23	24,77
Thésée	72,58	27,42
Moy ETM	80,34 a	19,66 b
Moy R1	<b>72,77 b</b>	27,23 a
Moy R2	<b>70,28 b</b>	29,72 a
R1 % réduction par rapport à l'ETM	9,42	-38,50
R2 % réduction par rapport à l'ETM	12,52	-51,16

## **4. Effet du stress hydrique sur l'indice foliaire (LAI) et la durée de vie des feuilles (LAD)**

### **4.1. Indice foliaire (LAI)**

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 17) de l'indice foliaire (LAI) montre des différences significatives ( $p < 0,05$  à  $p < 0,01$ ) entre les différents régimes hydriques et significatives ( $p < 0,05$ ) entre les différentes variétés uniquement pour les mesures réalisées le 18 Mai. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est significative ( $p < 0,05$ ) uniquement pour les mesures réalisées le 1<sup>er</sup> Juin.

Les pourcentages expliqués par les effets variétés, régimes hydriques et interaction variétés  $\times$  régimes hydriques varient respectivement de 18,06 % (15 Juin) à 8,60 % (25 Juin), de 61,51 % (18 Mai) à 72,80 % (1 Juin) et de 3,25 % (15 Juin) à 17,20 % (25 Juin) (annexe 1, tableau 17).

Les coefficients de variation (Annexe 1, tableau 17) les plus faibles sont enregistrés le 18 Mai et le 1<sup>er</sup> Juin que ce soit au niveau des variétés (4,47 % et 9,70 % respectivement), au niveau des régimes hydriques (7,94 % et 4,70 % respectivement) et de l'interaction (4,76 % et 4,72 % respectivement). Les coefficients de variation pour le 15 Juin et le 25 Juin sont élevés à très élevés soit pour les variétés 23,84 % et 86,60 % respectivement, pour les régimes hydriques 30,57 % et 84,73 % respectivement et pour l'interaction 15,01 % et 86,60 % respectivement.

Les moyennes (tableau 36) des variétés varient de 5,65 (Soissons) à 4,92 (Thésée) pour le 18 Mai. Les moyennes des régimes hydriques les plus élevées sont données par le régime à l'ETM et R1 pour toutes les dates de mesure. R2 donne les valeurs les plus faibles. Les pourcentages de réduction de R2 par rapport à l'ETM sont élevés et varient de 21,91 % (18 Mai) à 100 % (25 Juin).

La comparaison des régimes hydriques au niveau de chaque variété montre (figure 35) que le stress hydrique diminue l'indice foliaire quelle que soit la variété.

Au niveau du régime hydrique ETM, la variété Soissons possède, dès le début des mesures, un indice foliaire (leaf area index) plus élevé que les trois autres variétés (figure 36). Une chute régulière de l'indice foliaire est constatée à partir du 1<sup>er</sup> Juin pour Festival,

Soissons et Thésée, et à partir du 3 juin pour Ambral. L'indice foliaire de cette dernière ne s'annule que le 2 Juillet, Festival le 25 Juin et Soissons et Thésée le 28 Juin.

Au niveau du régime hydrique R1 (figure 36), les variétés Ambral, Soissons et Festival présentent des valeurs de LAI équivalentes au début des mesures, tandis que Thésée a une valeur plus faible. Cette dernière bien qu'elle soit faible reste relativement plus stable (avec une plus faible réduction) jusqu'au 15 Juin. La réduction est plus importante au niveau de Thésée suivie de Festival. Vers la fin, Soissons et Thésée se comportent de la même façon et ont un LAI plus élevé.

Au niveau du régime hydrique R2 (figure 36), les variétés Ambral, Festival et Soissons présentent une chute du LAI à partir du 1<sup>er</sup> Juin et Thésée à partir du 3 Juin. La variété Thésée bien que sa valeur soit plus faible au départ par rapport aux trois autres variétés, elle maintient son indice foliaire stable jusqu'au 2 Juin et présente une diminution moins accentuée et une valeur plus élevée jusqu'au 16 Juin. Ambral est celle qui présente la plus forte réduction du LAI quelle que soit la date de mesure.

Tableau 36. Moyennes et pourcentages de réduction de l'indice foliaire (LAI) mesuré à différentes dates

Variétés, moyennes des traitements et % réduction	18 Mai	1 Juin						15 Juin	25 Juin
	Moy.	Moy.	ETM	R1	R2	% réduc R1	% réduc. R2	Moy.	Moy.
Ambral	5,41 ab	3,69	4,73 a	4,13 cd	2,22 h	<b>12,68</b>	<b>53,07</b>	1,54	0,24
Festival	5,10 bc	3,03	3,48 e	3,33 e	2,30 h	<b>4,31</b>	<b>33,91</b>	1,79	0,13
Soissons	<b>5,65 a</b>	3,80	4,42 b	4,15 bc	2,81 g	6,11	36,43	2,55	0,60
Thésée	<b>4,92 c</b>	3,89	4,35 bc	4,21 bc	3,12 ef	10,99	34,04	2,83	0,39
Moy ETM	<b>5,75 a</b>	<b>4,24 a</b>						<b>3,34 a</b>	<b>1,03 a</b>
Moy R1	5,56 a	3,95 a						2,35 a	0,00 b
Moy R2	<b>4,49 b</b>	<b>2,61 b</b>						<b>0,84 b</b>	0,00 b
R1 % réduction par rapport à l'ETM	3,30	6,84						29,64	100,00
R2 % réduction par rapport à l'ETM	21,91	38,44						74,85	100,00

NB: % réduc. = % de réduction

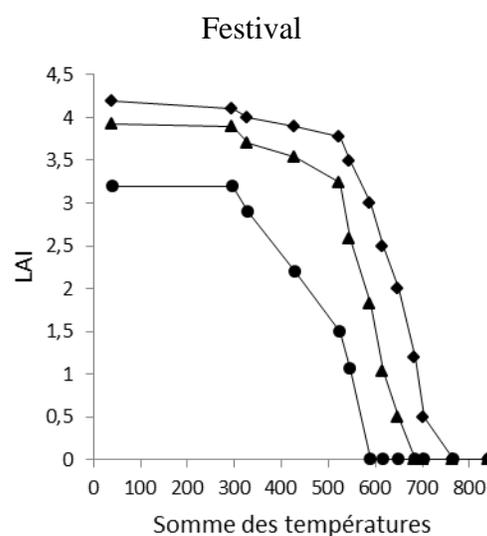
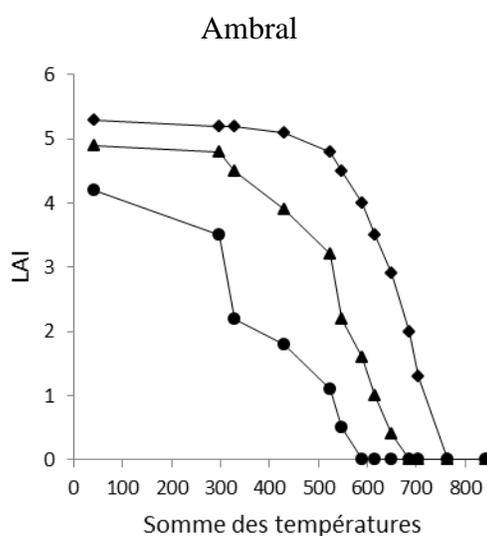
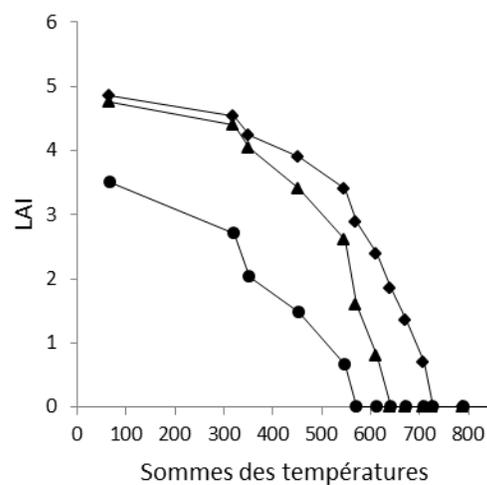
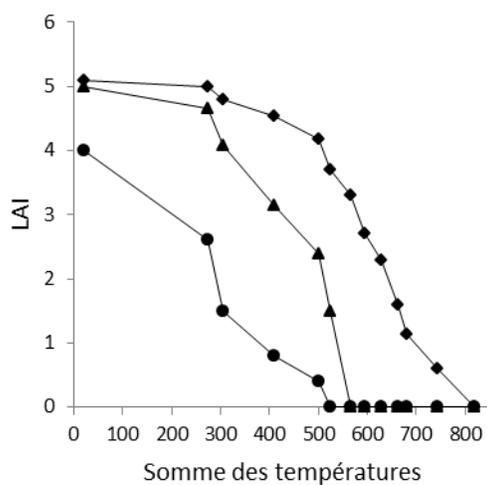


Figure 35. Evolution de l'indice foliaire (LAI) au niveau de chaque variété  
 ■ : ETM, ▲ : R1 et ● : R2

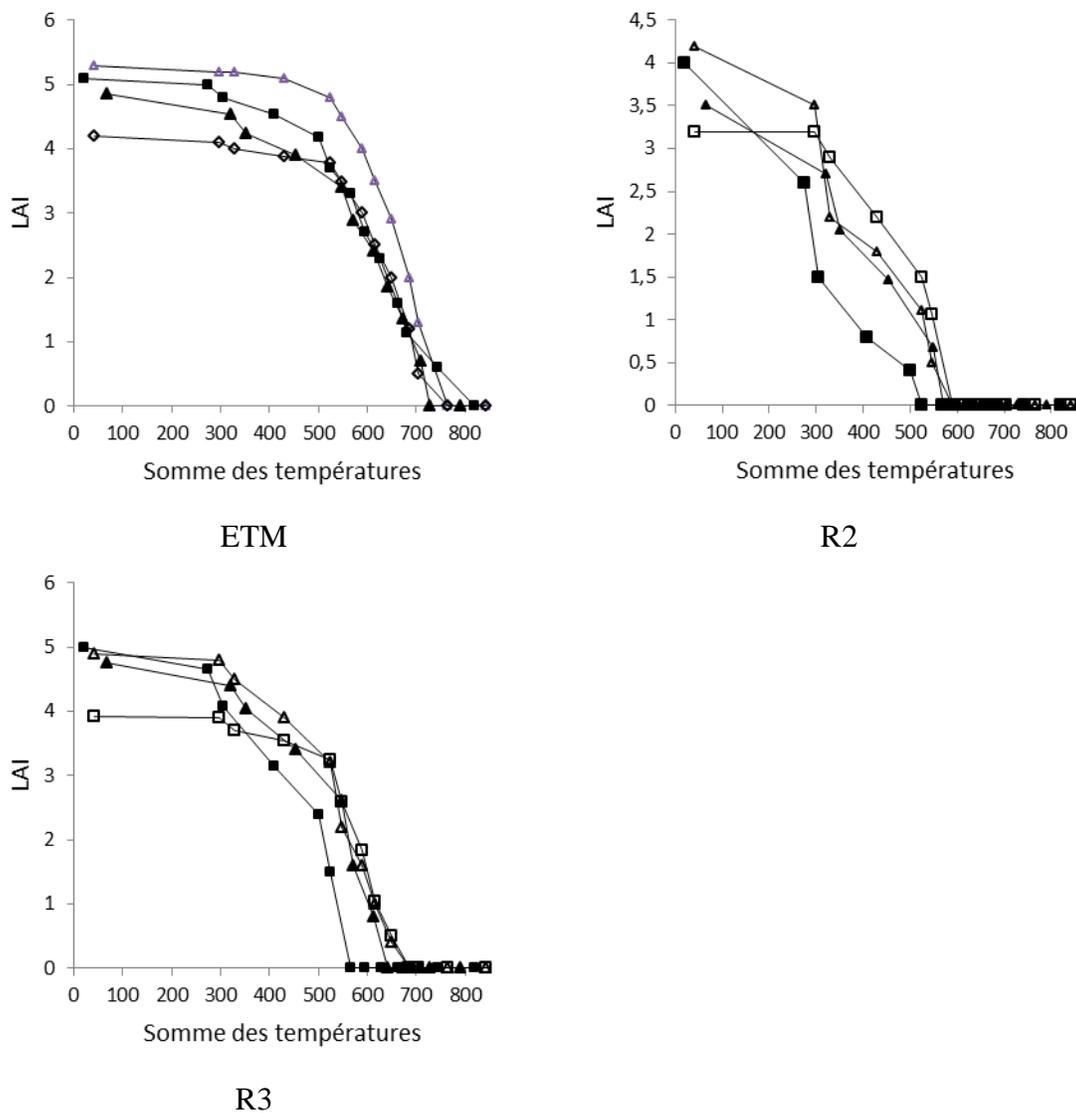


Figure 36. Comparaison des variétés au niveau de chaque régime hydrique pour le LAI.  
 Δ : Soissons, ■ : Ambral, ▲ : Festival, □ : Thésée

#### 4.2. Durée de vie des feuilles (LAD)

La variété Soissons (tableau 37, figure 37) donne la plus forte valeur de LAD quel que soit le régime hydrique, tandis que la variété Ambral donne la valeur la plus faible au niveau des régimes R1 et R2.

La variété Ambral est la plus affectée par les deux types de stress avec des pourcentages de réduction de 28,08 % (R1) et 61,09 % (R2) (figure 37). Parmi les variétés de blé tendre la variété Soissons, bien qu'elle possède un LAD élevé, est la plus sensible au niveau des deux types de stress avec des pourcentages de réduction de 24,24

% et 52,31 % respectivement pour R1 et R2. Au niveau du stress modéré Festival est la moins sensible avec une réduction de 13,52 %, mais avec un stress sévère elle devient presque aussi sensible que Soissons avec un pourcentage de réduction de 49,87 % (tableau 38). La variété Thésée est la moins sensible avec un pourcentage de réduction (14,59 %) presque équivalent à celui de Festival en R1 et un pourcentage de réduction le plus faible en R2 (41,20 %).

Tableau 37. Valeurs des LAD et % de réduction par rapport à l'ETM

VARIETES	LAD			% réduction	
	ETM	R1	R2	R1	R2
Ambral	2975,79	<b>2140,05</b>	<b>1157,98</b>	<b>28,08</b>	<b>61,09</b>
Festival	2742,80	2371,93	1374,98	<b>13,52</b>	49,87
Soissons	<b>3366,30</b>	<b>2550,26</b>	<b>1605,47</b>	24,24	52,31
Thésée	<b>2566,55</b>	2192,02	1509,13	<b>14,59</b>	<b>41,20</b>

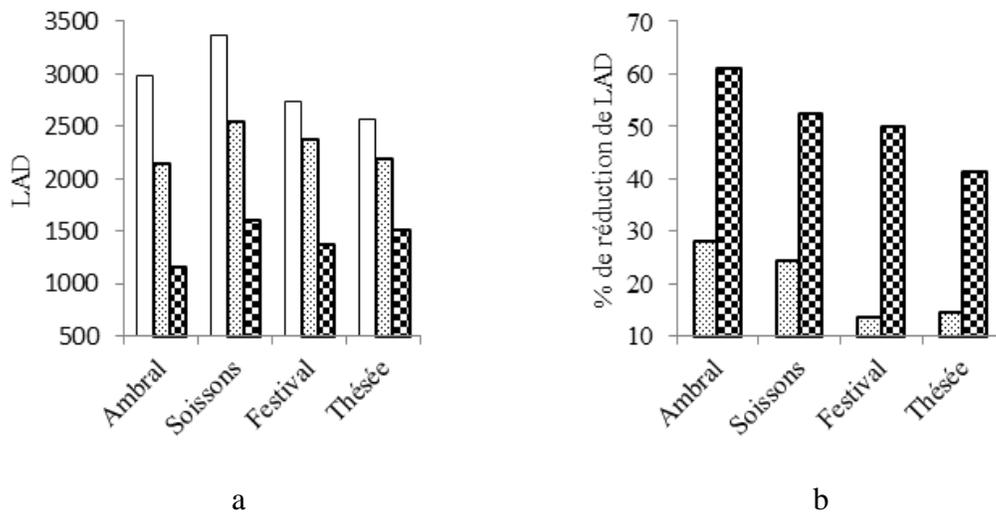


Figure 37 : Comparaison de la durée de vie des feuilles (LAD) (a) et du pourcentage de réduction (b) par variétés et régimes hydriques. □ ETM ■ R1 ▣ R2.

## 5. Evolution de la sénescence de la feuille étandard

L'étude de l'évolution de la sénescence montre que quelle que soit la variété les stress hydriques modéré (R1) et sévère (R2) réduisent la surface foliaire verte photosynthétique (figures 38 et 39). Les variétés sont toutes affectées par le stress sévère.

La comparaison de l'aire sous la courbe des différentes variétés sous différents régimes (ETM, R1 et R2) montre que la variété Festival présente une surface foliaire plus petite au régime ETM, elle représente 90,82 % de la surface foliaire de la variété Ambral (blé dur) qui possède la plus grande surface foliaire et 91,46 % de la surface foliaire de Thésée qui possède la plus grande surface au niveau des variétés de blés tendres utilisées (tableau 38). La variété Ambral est celle qui présente une réduction la plus importante quel que soit le type de stress avec 23,98 % (R1) et 44,86 % (R2). Parmi les variétés de blé tendre, Soissons est celle qui a été la moins affectée par le stress modéré (R1) soit 9,88 % de diminution par rapport à ETM, tandis que Festival et Thésée sont les plus touchées avec respectivement 15,56 % et 14,20 % par rapport à l'ETM. Au niveau du stress sévère (R2), la variété de blé tendre Festival est celle qui possède la plus faible réduction par rapport à l'ETM avec 29,28 %, Soissons et Thésée présentent des réductions équivalentes soit 30,01 % et 30,98 % respectivement. Le pourcentage de réduction en R2 par rapport à R1 montre que la variété Festival est celle qui présente le plus faible pourcentage de réduction avec 16,25 %, tandis que la variété Ambral le plus fort pourcentage de réduction avec 27,47 %, les deux autres variétés présentent des valeurs intermédiaires entre Festival et Ambral.

Le tableau 38 montre une diminution de la surface verte de la feuille étendard sous l'effet du stress hydrique.

Tableau 38. Réduction de l'aire sous les courbes de la sénescence

Variétés	ETM		R1		R2		
	surface	%	surface	% de réduc. par rapport à ETM	surface	% de réduc. par rapport à ETM	% de réduc. par rapport à R1
Ambral	68480,79	100	52056,63	23,98	37757,91	<b>44,86</b>	<b>27,47</b>
Festival	62196,03	100	52520,81	15,56	43987,25	<b>29,28</b>	<b>16,25</b>
Soissons	67763,94	100	61066,56	<b>9,88</b>	47430,88	30,01	22,33
Thésée	68001,43	100	58343,67	14,20	46935,58	30,98	19,55

NB: % réduc. = % de réduction

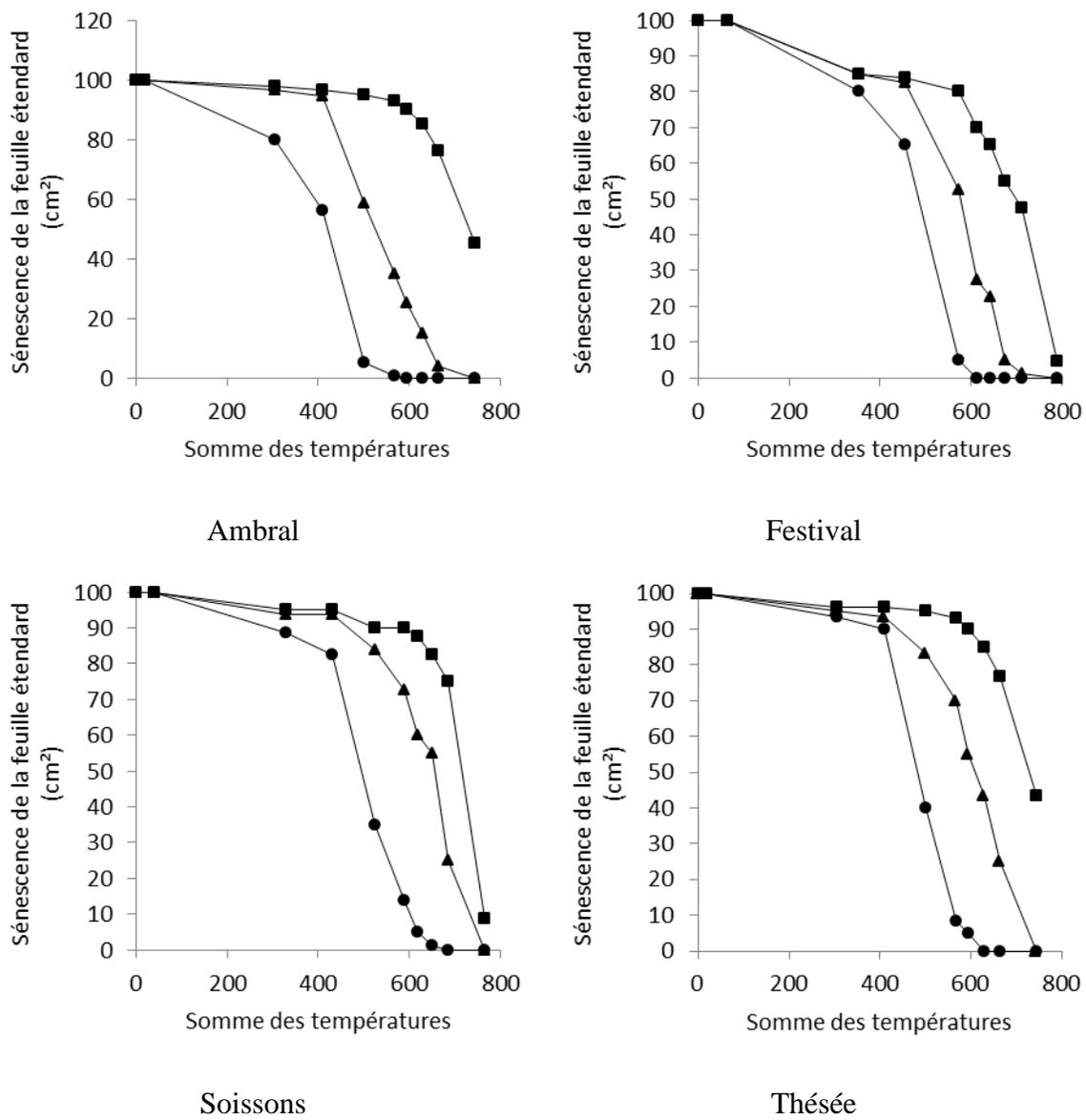


Figure 38. Evolution de la sénescence de la feuille étendard au niveau de chaque variété

■ : ETM, ▲ : R1 et ● : R2

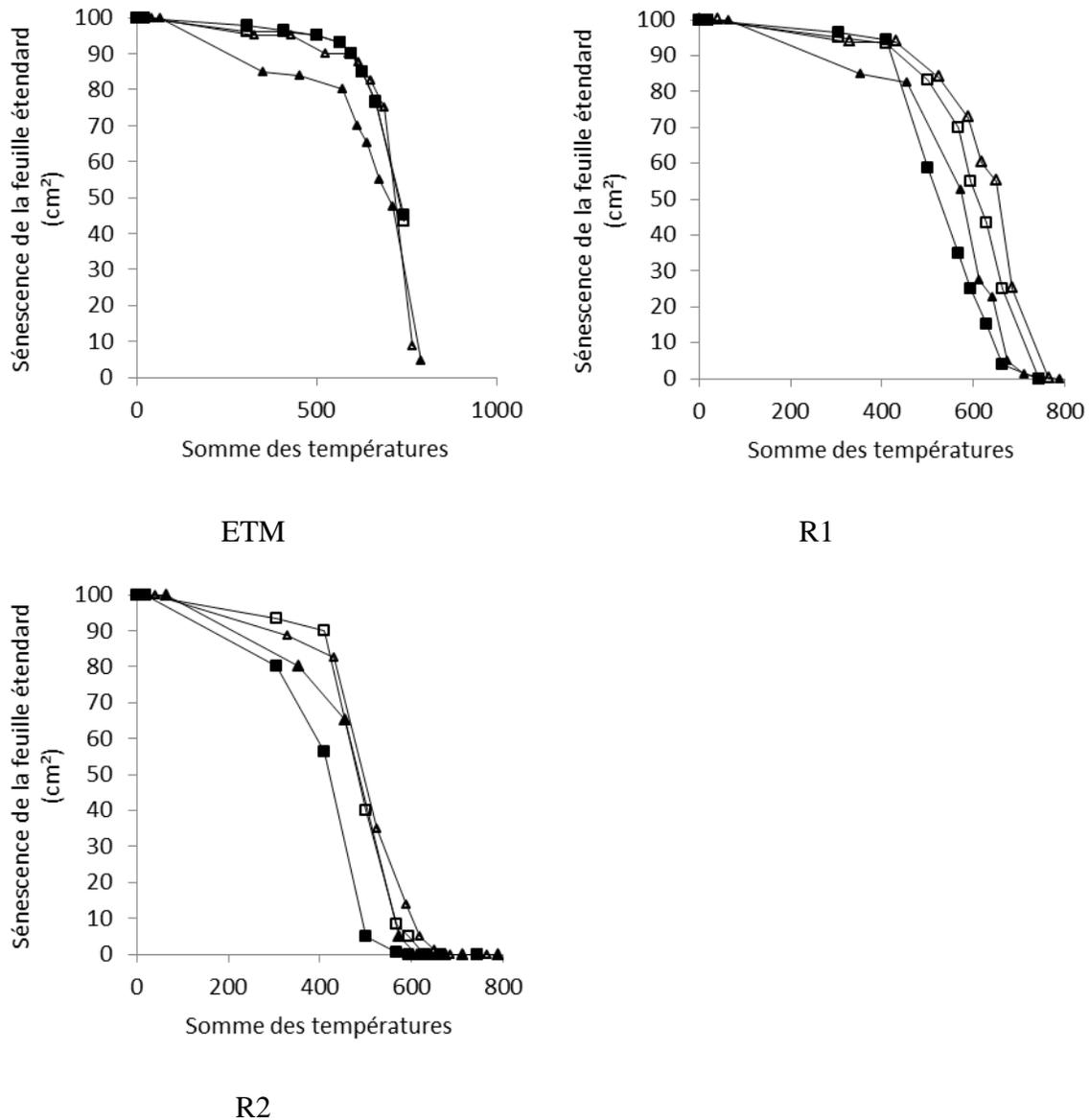


Figure 39. Comparaison des variétés au niveau de chaque régime hydrique :  
 ■ : Ambral, ▲ : Festival, △ : Soissons, □ : Thésée

## 6. Effet du stress hydrique sur la consommation en eau de la culture (ETR)

L'analyse de la variance montre des effets variétés significatifs ( $p < 0,05$ ) pour la consommation en eau de la culture du stade un nœud (4 avril) à la floraison (25 mai) et non significatifs du stade un nœud à la maturité (2 juillet) (annexe 1, tableau 18). La variation expliquée par les effets régimes hydriques est supérieure à celle expliquée par l'effet variétés. Au niveau des régimes hydriques la variation expliquée varie de 28,37 %

à 91,38 % dans l'ordre ; par contre au niveau variétal cette variation n'est que de 18,45 % et 2,30 %.

Les coefficients de variation montrent une bonne précision pour les deux facteurs (8,2 et 2,2 % pour le facteur irrigation et de 3,02 et 5,7 % pour le facteur variété durant les deux périodes.

Le tableau 39 donne les valeurs moyennes par périodes : stade un nœud-floraison et un nœud-maturité pour les différentes variétés et les régimes hydriques. Durant la première période Ambral semble consommer plus d'eau que Thésée (206 et 187 mm). En revanche durant la deuxième période l'effet variétal s'estompe au profit des régimes hydriques (346,67 et 236,92 mm à l'ETM et R2 soit une diminution de 31,66 %.

Tableau 39. Moyennes et pourcentages de réduction de la consommation en eau par la culture (mm)

Variétés et moyennes des traitements	Stade 1 nœud-floraison	Stade 1 noeud - maturité
Ambral	<b>206,17 a</b>	<b>301,39</b>
Festival	195,75 ab	282,50
Soissons	202,00 a	291,50
Thésée	<b>186,83 b</b>	<b>286,17</b>
Moy ETM	<b>206,88</b>	<b>346,67 a</b>
Moy R1	200,69	287,58 b
Moy R2	<b>185,50</b>	<b>236,92 c</b>
R1 % réduction par rapport à l'ETM	-	17,05
R2 % réduction par rapport à l'ETM	-	31,66

## 7. Effet du stress hydrique sur le potentiel hydrique foliaire ( $\psi$ )

### 7.1. Potentiel hydrique foliaire de base

L'analyse de la variance (annexe 1, tableau 19) montre un effet régimes hydriques significatif ( $p < 0,001$ ) pour toutes les dates de mesure, un effet variétés significatif ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) à toutes les dates excepté le 10 juin et une interaction génotypes x irrigation significative ( $p < 0,05$ ,  $p < 0,001$ ) pour 50 % des dates.

Les régimes hydriques expliquent une part importante de la variabilité (85,83 à 42,82 %), tandis que les variétés participent par des valeurs plus faibles ( $< 12$  %) excepté les dates du 13 mai (57,83 %) et du 26 mai (24,59 %). Le pourcentage de la variation

expliqué par l'interaction régimes hydriques × variétés est beaucoup plus faible que les effets régimes hydriques et variétés (< 7%).

Les coefficients de variation sont élevés et varient de 16,78 % (22 mai) à 36,91 % (2 juin).

La variété de blé dur Ambral présente toujours les valeurs (absolues) les plus élevées pour toutes les dates de mesure (tableaux 40 et 41). En général, les variétés de blé tendre présentent, entre elles, des valeurs moyennes équivalentes statistiquement à l'exception du 19 mai où la variété Soissons présente le pourcentage de réduction le plus faible. La figure 40 montre l'évolution du potentiel hydrique foliaire de base.

## 7.2. Potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi_{ms}$ )

L'analyse de la variance (annexe 1, tableaux 20 et 21) montre un effet régimes hydriques significatif ( $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates excepté le 13 Mai, un effet variétés significatif ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates sauf le 16 Juin, et une interaction significative ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) hormis le 13 Mai.

L'effet régimes hydriques explique une forte variabilité du caractère de 68,35 à 32,82 % respectivement les 29 et 15 Mai ; l'effet variétés explique une part plus faible (6,27 à 44,94 % pour le 2 Juin et 15 Mai respectivement). En revanche, l'interaction des deux facteurs n'explique qu'une faible valeur de la variabilité (de 3,93 à 18,62 %).

Les coefficients de variation sont inférieurs à 7 % pour la majorité des dates à l'exception des mesures réalisées les 2, 5 et 16 juin (14,05, 17,77 et 15,02 % respectivement).

La variété de blé dur Ambral présente toujours les valeurs (absolues) les plus élevées pour toutes les dates de mesure (tableaux 42, 43 et 44). En général, les variétés de blé tendre présentent des valeurs moyennes équivalentes statistiquement à l'exception du 2 juin où la variété Soissons présente le pourcentage de réduction le plus élevé. La figure 41 montre l'évolution du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\Psi$ ) (MPa) en fonction des sommes des températures (base 0 °C) depuis l'épiaison pour les variétés Ambral, Festival, Soissons et Thésée selon les régimes hydriques et la comparaison entre la variété Thésée et la variété Ambral.

Tableau 40. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire de base ( $\psi$ ) (MPa – 1) du 9 au 22 Mai

Variétés et moyennes des régimes	9 Mai				9 Mai	13 Mai	13 Mai	17 Mai	19 Mai				22 Mai
	Moy. des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy des variétés R3	Moy. des variétés	Moy. des variétés R3	Moy. des régimes Festival	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.	
Ambral	<b>1,058 a</b>	0,356 c	<b>1,760 a</b>	<b>-394,38</b>		<b>0,984 a</b>	-	-	<b>0,925 a</b>	0,436 d	<b>1,333 a</b>	<b>-205,73</b>	<b>0,86 a</b>
Festival	0,807 b	0,402 c	1,212 b	-201,49	0,432	0,636 b	0,688 a	0,662	<b>0,594 c</b>	0,332 d	<b>0,856 c</b>	-157,83	0,65 b
Soissons	0,788 b	0,264 c	1,312 b	-396,97	-	<b>0,528 b</b>	-	-	0,718 bc	0,456 d	0,980 bc	<b>-114,91</b>	0,64 b
Thésée	<b>0,700 b</b>	0,372 c	1,028 b	<b>-176,34</b>	0,420	0,498 b	0,452 b	-	0,831 ab	0,436 d	1,160 ab	-166,06	0,65 b
Moy ETM	0,349 b				-	0,593 b	-	0,472 c	0,415 b	0,350 b			0,643
Moy. R1								0,597 b					
Moy R2	<b>1,328 a</b>			<b>-280,52</b>	-	<b>0,730 a</b>	-	0,916 a	1,097 a	1,023 a			0,651
% réduc.R1					-	<b>-23,10</b>	-	<b>-26,48</b>					
% réduc. R2								<b>-94,07</b>			<b>-192,29</b>		

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 41. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire de base ( $\psi$ ) (MPa – 1) du 26 mai au 10 Juin

Variétés et moyennes des régimes	26 Mai				2 Juin	5 Juin	10 Juin	10 Juin
	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. des variétés	Moy. des variétés	Moy. des variétés	Moy. des variétés R1
Ambral	<b>1,219 a</b>	<b>0,666 cd</b>	<b>1,680 a</b>	-152,25	<b>1,360 a</b>	-	1,407	-
Festival	<b>0,586 b</b>	<b>0,368 d</b>	<b>0,804 bc</b>	-118,48	<b>0,859 b</b>	0,549	-	1,182 b
Soissons	0,787 b	0,512 cd	1,062 b	<b>-107,42</b>	1,089 b	-	1,369	1,776 a
Thésée	0,739 b	0,396 d	1,025 b	<b>-158,84</b>	0,913 b	0,489	1,365	1,112 b
Moy ETM	0,485 b				<b>0,575 c</b>	0,280 b	0,671 b	-
Moy. R1	1,162 a			<b>-139,59</b>	0,812 b	0,710 a		
Moy R2					<b>1,684 a</b>		2,089 a	
% réduc.							-211,33	

NB: % réduc. = % de réduction

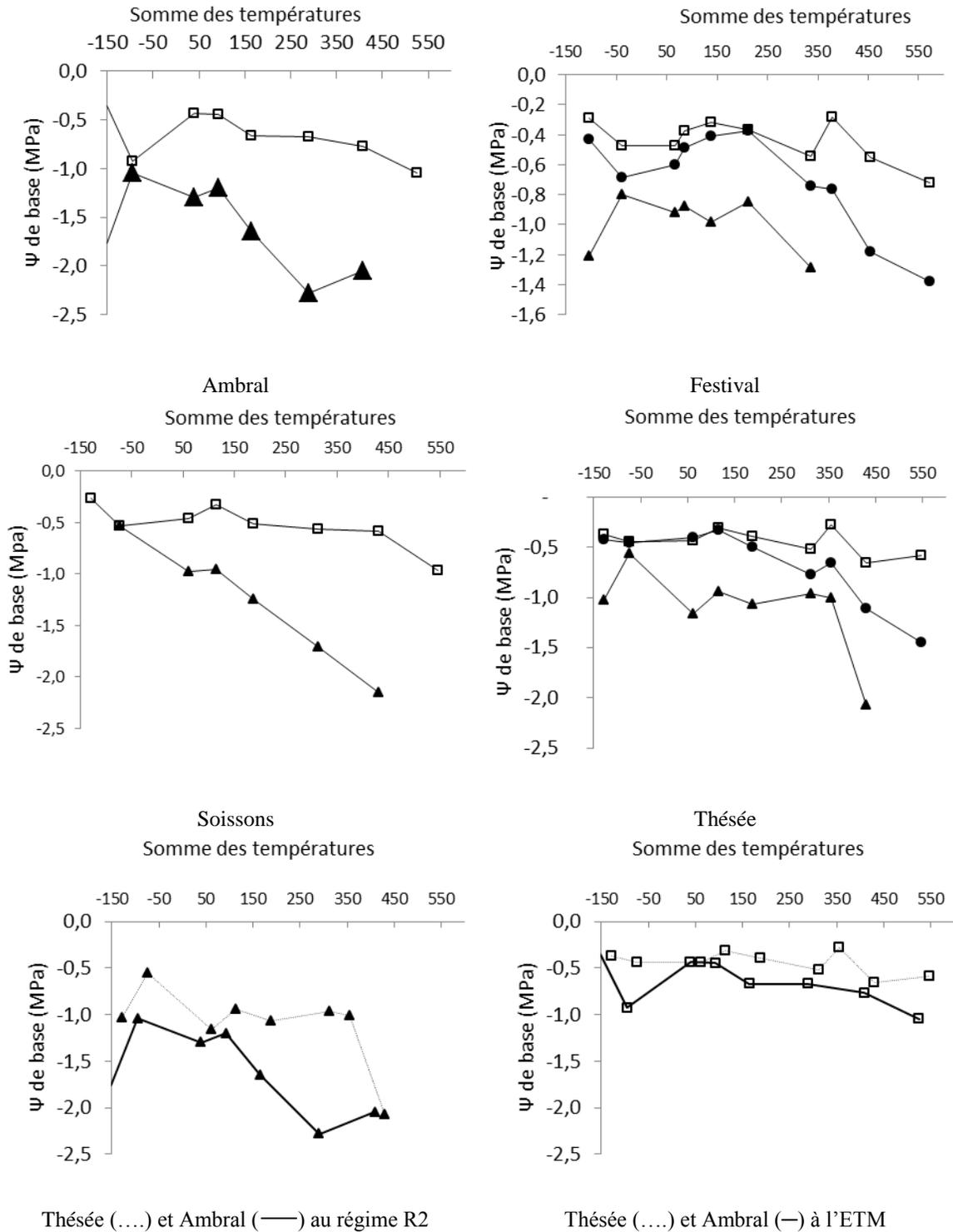


Figure 40. Evolution des  $\Psi$  de base (MPa) en fonction des sommes des températures (base 0 °C) depuis l'épiaison pour les variétés Ambral, Festival, Soissons et Thésée selon les régimes hydriques □ ETM, ● R1 et ▲ R2.

Tableau 42. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi_{ms}$ ) (MPa -1) du 13 au 22 Mai

Variétés et moyennes des traitements	13 Mai	15 Mai				17 Mai				19 Mai			
	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.
Ambral	<b>2,070 a</b>	<b>2,242 a</b>	<b>2,008 bc</b>	<b>2,476 a</b>	<b>-23,26</b>	<b>2,079 a</b>	<b>1,859 bc</b>	<b>2,300 a</b>	<b>-23,72</b>	<b>2,334 a</b>	<b>2,038 de</b>	<b>2,630 a</b>	<b>-29,05</b>
Festival	<b>1,909 b</b>	1,898 b	1,820 cde	1,976 bc	<b>- 8,57</b>	1,892 b	1,797 cd	1,987 b	<b>-10,57</b>	2,069 c	1,882 f	2,256 c	-19,87
Soissons	1,929 b	<b>1,776 c</b>	<b>1,670 e</b>	<b>1,882 cd</b>	-12,69	1,849 b	1,754 cd	<b>1,943 b</b>	-10,78	<b>1,994 c</b>	<b>1,848 f</b>	<b>2,140 cd</b>	<b>-15,80</b>
Thésée	2,028 ab	1,933 b	1,764 de	2,102 b	-19,16	<b>1,822 b</b>	<b>1,674 d</b>	1,970 b	-17,68	2,180 b	1,954 ef	2,406 b	-23,13
Moy. ETM	1,870 b	1,815 b				1,771 b				1,931 b			
Moy. R1													
Moy. R2	<b>2,098 a</b>	<b>2,109 a</b>				<b>2,050 a</b>			-15,75	<b>2,358 a</b>			
% réduc.	-12,19				-16,20								-22,11

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 43. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi_{ms}$ ) (MPa -1) du 22 Mai au 2 Juin

Variétés et moyennes des traitements	22 Mai				26 Mai				29 Mai				2 Juin			
	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. Des variétés	ETM	R2	% réduc.
Ambral	<b>2,379</b>	<b>1,972 b</b>	<b>2,786 a</b>	<b>-41,28</b>	<b>2,754 a</b>	<b>2,126 c</b>	<b>3,382 a</b>	<b>-59,08</b>	<b>2,713 a</b>	<b>1,916 d</b>	<b>3,510 a</b>	<b>-83,19</b>	<b>2,430 a</b>	1,650 d	<b>3,210 a</b>	-94,55
Festival	1,903 b	<b>1,680 c</b>	2,126 b	-26,55	2,130 b	1,852 d	2,408 b	<b>-30,02</b>	2,138 b	1,810 de	2,466 c	<b>-36,24</b>	2,117 b	<b>1,908 cd</b>	2,326 bc	-21,91
Soissons	1,931 b	1,770 c	2,092 b	<b>-18,19</b>	<b>2,100 b</b>	<b>1,820 d</b>	<b>2,380 b</b>	-30,77	2,189 b	1,612 e	2,766 b	-71,59	<b>2,001 b</b>	<b>1,232 e</b>	2,770 b	<b>-124,84</b>
Thésée	<b>1,858 b</b>	1,700 c	<b>2,016 b</b>	-18,59	2,113 b	1,822 d	2,404 b	-31,94	<b>2,034 b</b>	<b>1,676 e</b>	<b>2,392 c</b>	-42,72	2,082 b	1,864 cd	<b>2,300 bc</b>	<b>-23,39</b>
Moy. ETM	1,781 b				1,905 b				1,754 b				<b>1,664 b</b>			
Moy. R1																
Moy. R2	<b>2,255 a</b>			<b>-26,61</b>	<b>2,643 a</b>			<b>-38,74</b>	<b>2,784 a</b>				<b>2,652 a</b>			<b>-59,38</b>

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 44. Moyennes et pourcentages de réduction du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi$  ms) (MPa -1) du 29 mai au 16 Juin.

Variétés et moyennes des traitements	29 Mai R1	2 Juin R1 4 var.	5 Juin ETM, R1 et R2 4 var.						16 Juin		
	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	Moy. Des variétés	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2	Moy. Des variétés	ETM	R1
Ambral	<b>2,268 a</b>	<b>2,156 a</b>	<b>2,070 a</b>	1,120 def	<b>1,850 c</b>	<b>3,240 a</b>	-65,18	<b>-189,29</b>	<b>2,382 a</b>	<b>2,184 ab</b>	<b>2,580 a</b>
Festival	1,972 b	1,922 b	1,566 bc	<b>0,760 f</b>	1,582 cd	2,356 b	<b>-108,16</b>	-210,00	<b>1,820 b</b>	1,984 b	1,656 b
Soissons		1,665 c	1,733 b	<b>1,144 def</b>	1,630 cd	2,426 b	<b>-42,48</b>	-112,06	2,092 ab	1,968 b	2,216 ab
Thésée	1,976 b	2,042 ab	<b>1,412 c</b>	0,942 ef	<b>1,432 cde</b>	<b>1,862 c</b>	-52,02	<b>-97,66</b>	2,058 ab	1,876 b	2,240 ab
Moy. ETM			0,991 c						2,003		
Moy. R1	2,072	1,946	1,624 b				-63,87		2,173		
Moy. R2			2,471 a				-149,34				

NB: % réduc. = % de réduction

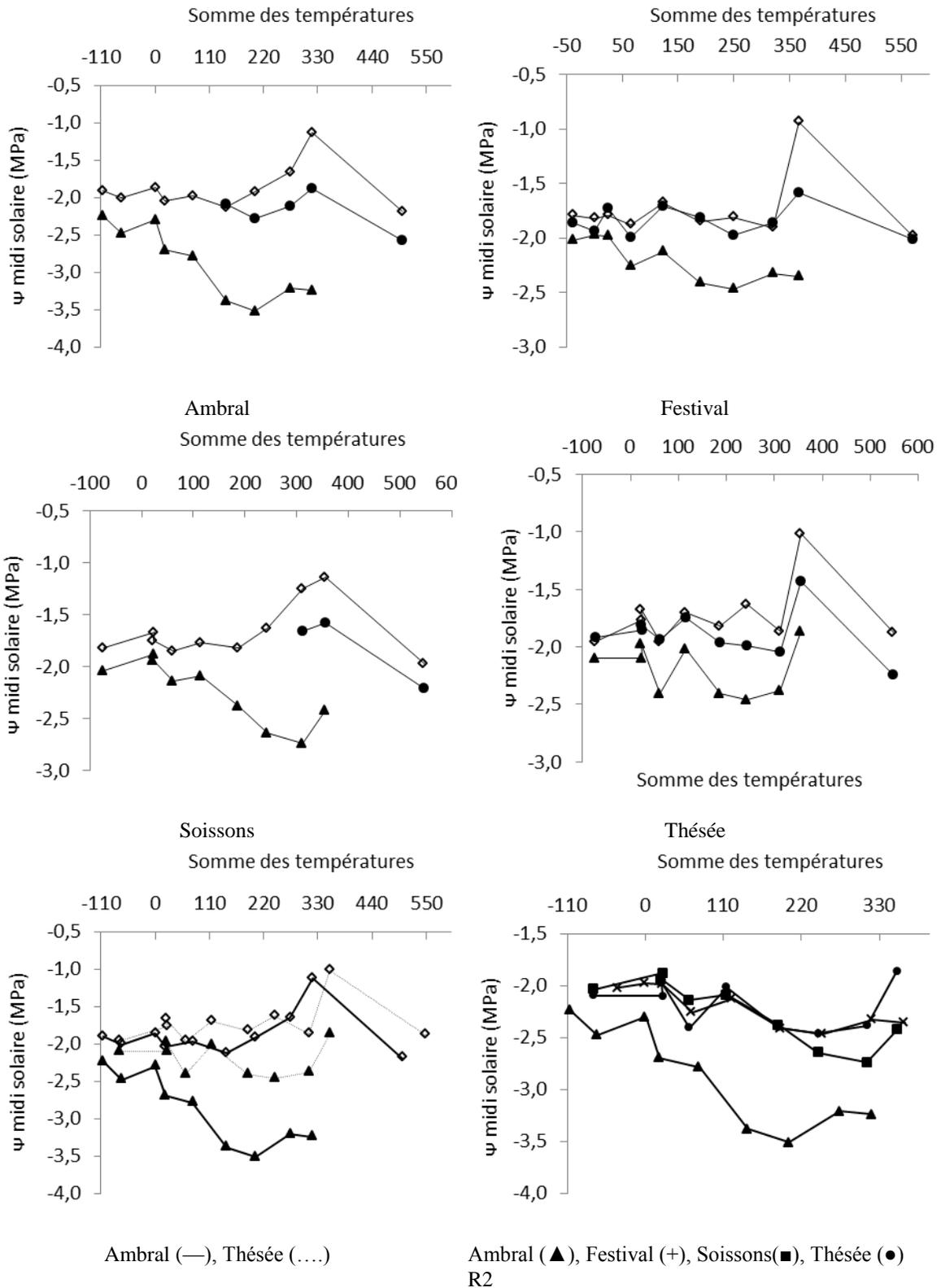


Figure 41. Evolution des  $\psi$  midi solaires (en MPa) en fonction des sommes de températures (base 0°C) depuis l'épiaison pour les variétés Ambral, Festival, Soissons et Thésée selon les régimes hydriques  $\square$  ETM,  $\bullet$  R1 et  $\blacktriangle$  R2.

## **8. Effet du stress hydrique sur la teneur en eau relative (RWC)**

### **8.1. Teneur en eau relative de base (RWC)**

L'analyse de la variance (annexe 1, tableaux 22 et 23) montre des différences significatives ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) entre les différents régimes hydriques et entre les variétés à l'exception du 17 Mai où aucune signification n'a été observée. L'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques est significative ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) à l'exception des 13, 17, 19 Mai (3 régimes et 2 variétés), 22 Mai (2 régimes et 4 variétés) et 26 Mai.

Le pourcentage de la variation expliqué par l'effet régimes hydriques varie de 91,11 % (5 Juin) à 12,58 % (17 Mai) tandis que celui expliqué par l'effet variétés varie de 4,5 % (29 Mai) à 57,16 % (19 Mai pour 3 régimes et 2 variétés). Le pourcentage de la variation expliquée par l'interaction est faible et varie de 17,15 % (10 Juin) à 0,49 % (5 Juin). En moyenne, l'effet régimes hydriques est supérieur à l'effet variétés.

Les coefficients de variation sont faibles et inférieurs à 2 %.

Le stress hydrique provoque une réduction de la teneur en eau relative surtout au niveau du régime hydrique sévère (tableaux 45 à 48 et figure 42) allant de 8,97 % (10 Juin) à 2,22 % (13 Mai) au niveau du régime sévère et de 3,76 % (16 Juin) à 0,25 % (29 Mai) pour le régime modéré (R1).

A l'ETM, les différentes variétés présentent toutes une RWC équivalente et proches de 95 %, en R1 et surtout en R2, Ambral présente une teneur relative en eau de plus en plus faible.

Tableau 45. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (RWC base) (% de MS) du 13, 17, 19 et 22 Mai

Variétés et moyennes des régimes	13 Mai	13 Mai	17 Mai	19 Mai			19 Mai	22 Mai		22 Mai					
	Moy. des variétés	Moy. des variétés	Moy. des variétés	Moy. des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. des régimes	Moy. Des variétés		ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2
Ambral	95,12 a			95,10 b	97,41 a	92,79 d	<b>4,72</b>		94,04 b						
Festival	<b>93,08 b</b>	<b>93,39 b</b>	91,97	<b>92,86 c</b>	94,00 cd	91,72 e	2,43	93,09 b	93,59 b	93,85 b	95,85 b	94,37 c	91,34 d	1,54	4,71
Soissons	95,59 a	95,39 a		94,76 b	96,22 b	93,30 cd	<b>3,03</b>		93,45 b						
Thésée	95,14 a	94,86 a	93,11	<b>96,09 a</b>	97,95 a	94,22 c	3,81	96,40 a	96,33 a	96,79 a	97,62 a	97,69 a	95,04 bc	-0,07	2,64
Moy ETM	<b>96,00 a</b>	<b>95,66 a</b>		96,40 a				95,98 a	96,44 a	96,74 a					
Moy. R1		94,44 ab	92,92					95,29 a		96,03 a					
Moy R2	93,47 b	93,54 b	91,73	93,01 b				92,97 b	92,27 b	93,19 b					
% réduc. R1		1,28						<b>0,72</b>		0,73					
% réduc. R2	<b>2,64</b>	2,22		<b>3,52</b>				<b>3,14</b>	<b>4,32</b>	3,67					<b>0</b>

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 46. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (RWC base) (%MS) du 26, 29 Mai

Variétés et moyennes des régimes	26 Mai				26 Mai	29 Mai				29 Mai					
	Moy. des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. des régimes	Moy. des variétés	ETM	R2	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2
Ambral	92,28 a	95,53 a	89,03 d	<b>6,80</b>		93,74 a	97,67 a	89,80 d	<b>8,06</b>						
Festival	89,83 b	91,35 c	88,32 d	3,32	91,21 b	92,84 a	94,72 b	90,96 d	<b>3,97</b>	93,23 b	94,72 b	90,96 c	94,00 b	0,76	3,97
Soissons	93,29 a	94,53 ab	92,04 bc	<b>2,63</b>		90,94 b	92,29 c	89,60 d	2,91						
Thésée	93,33 a	94,39 ab	92,27 bc	<b>2,25</b>	94,03 a	93,22 a	95,90 b	90,54 d	5,59	94,19 a	95,90 a	90,54 c	96,14 a	-0,25	5,59
Moy ETM	93,95 a				92,87 b	95,15 a				95,31 a					
Moy. R1					94,70 a					95,07 a					
Moy R2	90,42 b				90,30 c	90,22 b				90,75 b					
% réduc. R1					<b>-1,97</b>					0,25					
% réduc. R2	<b>3,76</b>				<b>2,77</b>	<b>5,18</b>				4,78					

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 47. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (RWC base) (%MS) du 2, 5 et 10 Juin

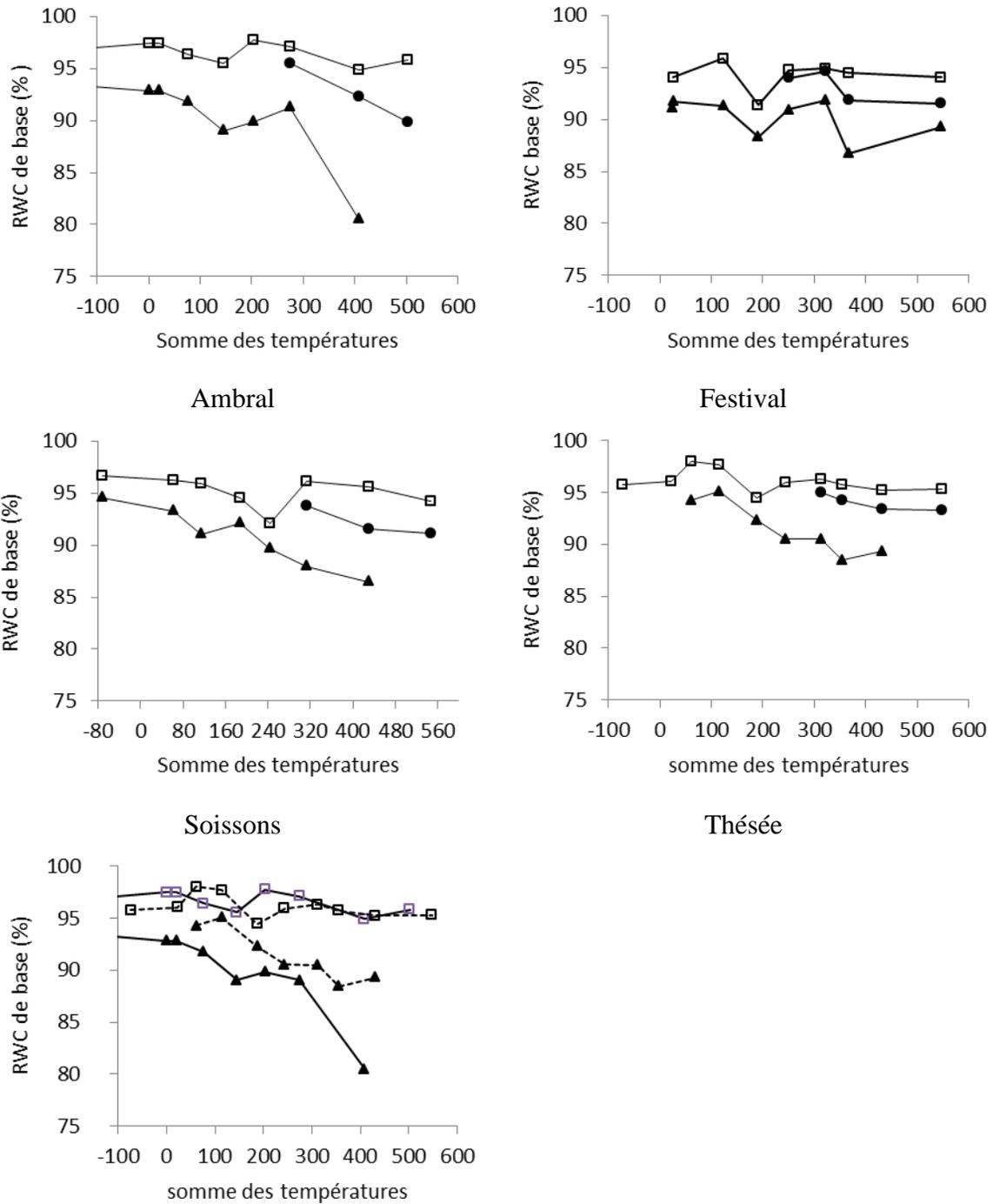
Variétés et moyennes des régimes	2 Juin						5 Juin	10 Juin					
	Moy. des variétés	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2	Moy. des variétés	Moy. des variétés	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2
Ambral	94,59 a	97,04 a	95,49 bc	91,25 ef	<b>1,60</b>	<b>5,97</b>		89,23 c	94,88 a	92,30 bc	80,53 g	<b>2,72</b>	<b>15,12</b>
Festival	93,82 b	94,86 cd	94,75 cd	91,87 e	0,12	3,15	91,00 b	91,62 b	94,01 ab	91,54 c	89,31 d	<b>-2,61</b>	2,52
Soissons	92,58 c	96,08 ab	93,78 d	87,88 g	<b>2,39</b>	<b>8,53</b>		91,21 b	95,56 a	91,60 bc	86,47 f	<b>4,14</b>	9,51
Thésée	93,88 b	96,24 ab	94,93 cd	90,46 f	1,36	6,01	92,77 a	92,64 a	95,22 a	93,41 abc	89,30 e	1,90	6,22
Moy ETM	96,05 a						95,07 a	94,91 a					
Moy. R1	94,74 b						93,02 b	92,21 b					
Moy R2	90,36 c						87,57 c	86,40 c					
% réduc.R1	<b>1,36</b>						<b>2,08</b>	<b>2,84</b>					
% réduc R2	<b>5,92</b>						<b>7,82</b>	<b>8,97</b>					

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 48. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative de base (RWC) (%MS) du 16 Juin

Variétés et moyennes des traitements	16 Juin			
	Moy. Des variétés	ETM	R1	% réduc.
Ambral	92,80 b	95,80 a	89,79 d	6,27
Festival	91,83 b	93,42 c	90,24 d	<b>3,40</b>
Soissons	92,70 b	94,25 bc	91,15 d	3,29
Thésée	94,26 a	95,25 ab	93,27 c	<b>2,08</b>
Moy. ETM	94,68 a			
Moy. R1	91,12 b			
% réduction R1	<b>3,76</b>			

NB: % réduc. = % de réduction



Ambral (—) et Thésée (---)

Figure 42. Evolution des RWC de base (en %) en fonction des sommes de températures (base 0°C) depuis l'épiaison pour les variétés Ambral, Festival, Soissons, Thésée et Ambral (—) –Thésée (---) selon les régimes hydriques □ ETM, ● R1 et ▲ R2

## 8.2. Teneur en eau relative midi solaire (RWCms)

L'analyse de la variance (annexe 1, tableaux 24 et 25) montre un effet régimes hydriques significatif ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception du 13 Mai (3 régimes et 2 variétés) et du 17 Mai (2 régimes et 2 variétés), l'effet variétés est aussi significatif ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception du 15 Mai (2 régimes et 4 variétés) et du 17 Mai (3 régimes et 2 variétés). L'interaction est également significative ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception du 13 Mai (3 régimes et 2 variétés), 17 Mai (3 régimes et 2 variétés), 26 Mai (3 régimes et 2 variétés) et du 5 Juin (3 régimes et 2 variétés).

Pour la majorité des dates l'effet régimes hydriques explique plus la variabilité de la teneur en eau relative midi solaire que l'effet variétés avec des valeurs allant de 89,3 % (26 Mai, 2 régimes et 4 variétés) à 65,99 % (16 Juin) à l'exception du 13 Mai (2 régimes et 4 variétés et 3 régimes et 2 variétés) où l'effet variété explique plus la variabilité que l'effet régimes hydriques avec des valeurs de 21,35 % et 27,79 % respectivement.

Les coefficients de variation demeurent faibles (moins de 3 %).

Une réduction générale des moyennes (tableaux 49 à 53) de la teneur relative en eau midi solaire au niveau des variétés et des régimes hydriques a été constatée avec l'application du stress hydrique. Les réductions varient de 1,10 % (17 Mai, 3 régimes et 2 variétés) à 3,35 % (2 Juin) pour le régime R1 et de 4,67 % (15 Mai, 2 régimes et 4 variétés) à 14,63 % (2 Juin) pour le régime R2.

La variété Ambral est celle qui est la plus affectée par le stress hydrique (R2) pour la majorité des dates, cependant pour les dates du 29 Mai et du 5 Juin, les variétés Soissons et Ambral présentent des réductions équivalentes (16,36 % et 14,87 % pour le 29 Mai et 18,52 % et 12,89 % pour le 5 Juin respectivement). La figure 43 montre l'évolution de la teneur en eau relative midi solaire. Quelle que soit la variété, la RWC est un indicateur de stress hydrique assez performant puisque les régimes étudiés ont bien été différenciés, d'autant mieux que le stress est élevé. La variété de blé dur Ambral est celle qui perd le plus d'eau, la variété de blé tendre Thésée semble garder l'eau le plus longtemps possible (figure 43).

Tableau 49. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative midi solaire (*RWCms*) (%MS) du 29 et 2 juin

Variétés et moyennes des Régimes	29 Mai						2 Juin					
	M var.	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2	M var.	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2
Ambral	84,71 b	<b>89,99 ab</b>	87,53 bc	76,61 e	2,73	14,87	<b>86,51 c</b>	95,52 ab	<b>92,56 c</b>	<b>71,45 g</b>	<b>3,10</b>	<b>25,20</b>
Festival	87,01 a	90,19 ab	<b>87,05 c</b>	<b>83,77 d</b>	3,48	<b>7,12</b>	89,19 b	<b>94,68 abc</b>	89,28 d	83,62 f	5,70	11,68
Soissons	<b>84,42 b</b>	90,12 ab	87,76 bc	<b>75,37 e</b>	<b>2,62</b>	<b>16,36</b>	91,88 a	95,36 ab	<b>93,39 bc</b>	<b>86,89 de</b>	<b>2,05</b>	<b>8,73</b>
Thésée	<b>87,83 a</b>	<b>92,38 a</b>	<b>88,85 bc</b>	82,26 d	<b>3,82</b>	10,95	<b>91,52 a</b>	<b>96,44 a</b>	93,98 abc	84,15 f	2,55	12,74
Moy ETM	<b>90,67 a</b>						<b>95,50 a</b>					
Moy R1	87,80 b						92,30 b					
Moy. R2	<b>79,50 c</b>						<b>81,53 c</b>					
% réduc. R1	3,17						3,35					
% réduc. R2	12,32						14,63					

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 50. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative midi solaire (*RWCms*) (%MS) du 5 et 16 juin

Variétés et moyennes des Régimes	5 Juin						16 Juin				
	M var.	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2	M var.	ETM	R1	% réduc. R1	
Ambral	88,27 b	92,69 a	91,37 ab	80,74 c	1,42	12,89	<b>81,48 c</b>	<b>92,60 a</b>	<b>70,36 f a</b>	<b>24,02</b>	
Festival	85,14 c	88,45 ab	86,21 b	80,75 c	2,53	8,70	84,06 b	<b>87,24 b</b>	80,88 d	7,29	
Soissons	86,65 bc	93,67 a	89,95 ab	76,32 c	<b>3,97</b>	<b>18,52</b>	83,41 b	87,73 b	79,08 e	9,86	
Thésée	90,52 a	93,55 a	91,47 ab	86,55 b	<b>3,85</b>	<b>7,48</b>	<b>85,58 a</b>	88,09 b	<b>83,07 c</b>	<b>5,70</b>	
Moy ETM	92,09 a						88,92 a				
Moy R1	89,75 b						78,35 b				
Moy. R2	81,09 c										
% réduc. R1	2,54						11,89				
% réduc. R2	11,94										

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 51. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative midi solaire (*RWCms*) (%MS) du 13 et 19 Mai

Variétés et moyennes des Régimes	13 Mai 3R 2V	15 Mai 2R 4V	17mai 2R 4V				19 Mai 2R 4V			
	M var.	M var.	M var.	ETM	R2	% réduc.	M var.	ETM	R2	% réduc.
Ambral		<b>87,26</b>	87,73 b	91,72 a	83,73 c	<b>8,71</b>	83,45 b	90,95 a	75,96 e	<b>16,48</b>
Festival	86,79 b	88,42	90,26 a	92,18 a	88,34 b	<b>4,17</b>	84,72 ab	86,05 c	83,39 d	<b>3,09</b>
Soissons		87,37	89,61 a	91,62 a	87,59 b	5,21	85,32 a	88,23 b	82,42 d	6,59
Thésée	89,47 a	<b>87,49</b>	89,55 a	92,24 a	86,85 b	5,84	85,98 a	89,93 ab	82,02 d	8,80
Moy ETM	<b>89,81</b>	89,73 a	91,94 a				88,79 a			
Moy R1	87,71									
Moy. R2	86,66	85,54 b	86,63 b				80,95 b			
% réduc. R2		4,67	5,78				8,83			

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 52. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative midi solaire (*RWCms*) (%MS) du 15 Mai et 17 Mai

NB: % réduc. = % de réduction

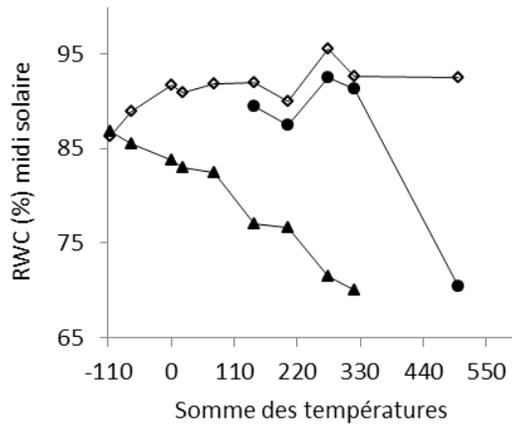
Variétés et moyennes des Régimes	15 Mai 3R 2V						17 Mai 3R 2V					
	M var.	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2	M var.	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2
Festival	87,31 b	90,55 b	85,10 c	86,29 c	6,02	4,70	90,58	86,05 b	88,65 a	83,39 c	-3,02	3,09
Thésée	89,19 a	89,61 b	92,59 a	85,37 c	-3,33	4,73	90,09	89,93 a	88,76 a	82,02 c	1,30	8,80
Moy ETM	90,08 a						92,21 a					
Moy R1	88,84 a						91,20 a					
Moy. R2	85,83 b						87,60 b					
% réduc. R1	1,38						1,10					
% réduc. R2	4,72						5,00					

NB: % réduc. = % de réduc.

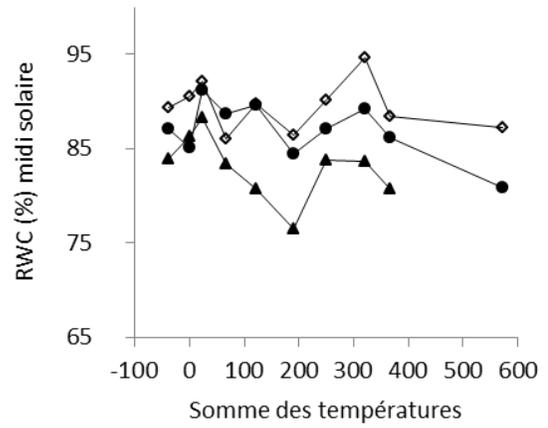
Tableau 53. Moyennes et pourcentages de réduction de la teneur en eau relative midi solaire (*RWC<sub>ms</sub>*) (%MS) du 22 et 26 Mai

Variétés et moyennes des Régimes	22 Mai 3R 2V						26 Mai 3R 3V					
	M var.	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2	M var.	ETM	R1	R2	% réduc. R1	% réduc. R2
Ambral							86,17 a	91,96 a	89,53 b	77,02 f	2,64	16,25
Festival	86,70 b	89,69 b	89,67 b	80,74 d	<b>0,02</b>	9,98	<b>82,52 c</b>	86,50 cd	84,51 d	76,54 f	2,30	11,51
Thésée	89,59 a	89,86 b	91,79 a	87,11 c	<b>-2,15</b>	<b>3,06</b>	<b>84,57 b</b>	87,66 cb	86,59 cd	79,44 e	1,22	9,38
Moy ETM	89,78 b						88,71 a					
Moy R1	90,73 a						86,88 b					
Moy. R2	83,93 c						77,62 c					
% réduc. R1	-1,05						2,06					
% réduc. R2	6,52						12,50					

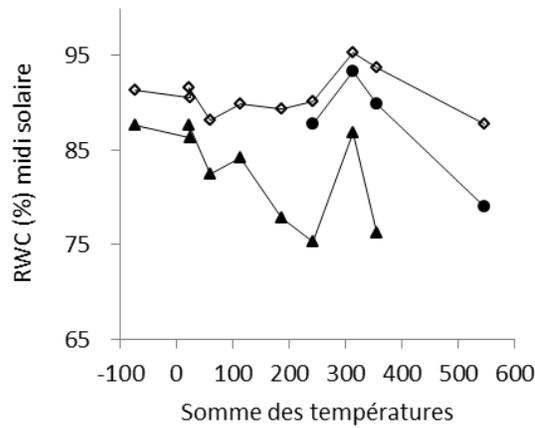
NB: % réduc. = % de réduction



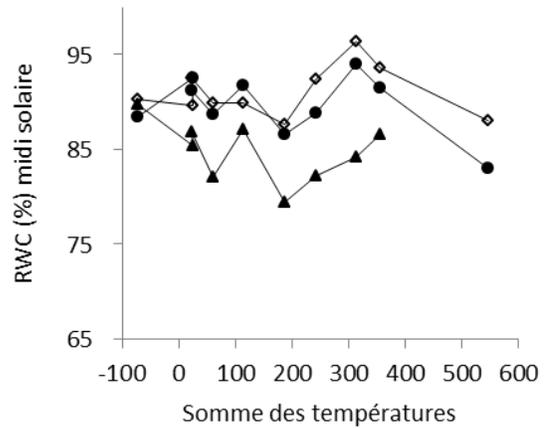
Ambral



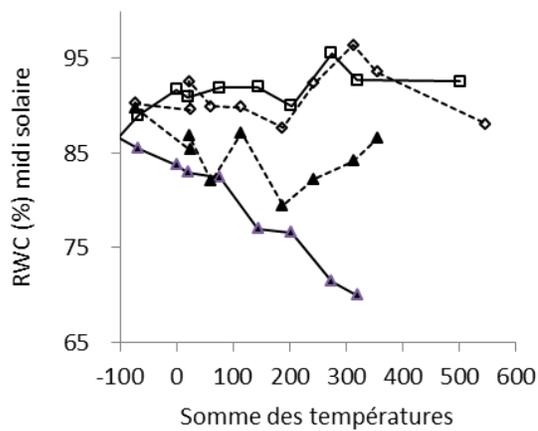
Festival



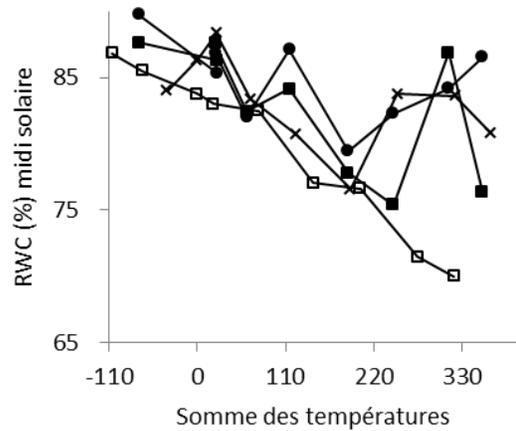
Soissons



Thésée



Ambral (—), Thésée (...)



Ambral (□), Festival (+), Soissons (■), Thésée (●) en R2

Figure 43. Evolution de RWC (%) midi solaire en fonction des sommes de températures (base 0°C) depuis l'épiaison pour les variétés Ambral, Festival, Soissons et Thésée ; Ambral-Thésée (ETM R2), les 4 variétés R2 selon les régimes hydriques □ETM, ● R1, et ▲ R2.

## **9. Mesures tensiométriques**

La figure 44 montre l'évolution du potentiel hydrique du sol (en cb) de la capacité de rétention du sol à la maturité de la culture pour le régime conduit en ETM. On observe un assèchement progressif du sol sur les trois profondeurs étudiées jusqu'à la première irrigation de 40 mm apportée le 6 mai. Durant la période allant du 19 avril au 9 mai, la culture a été soumise à un stress hydrique modéré. Mais à partir du 9 mai correspondant au stade méiose, la culture a été menée en confort hydrique permanent jusqu'à la maturité.

Le régime R1 a reçu 80 mm fractionnés en 4 doses de 20 mm répartis de la méiose à la fin de la floraison : la culture a subi un stress modéré, tandis que le régime R2 n'a plus reçu d'eau depuis la mise en place des abris mobiles le 9 avril ; on peut considérer que les phases méiose et floraison ont subi un stress hydrique.

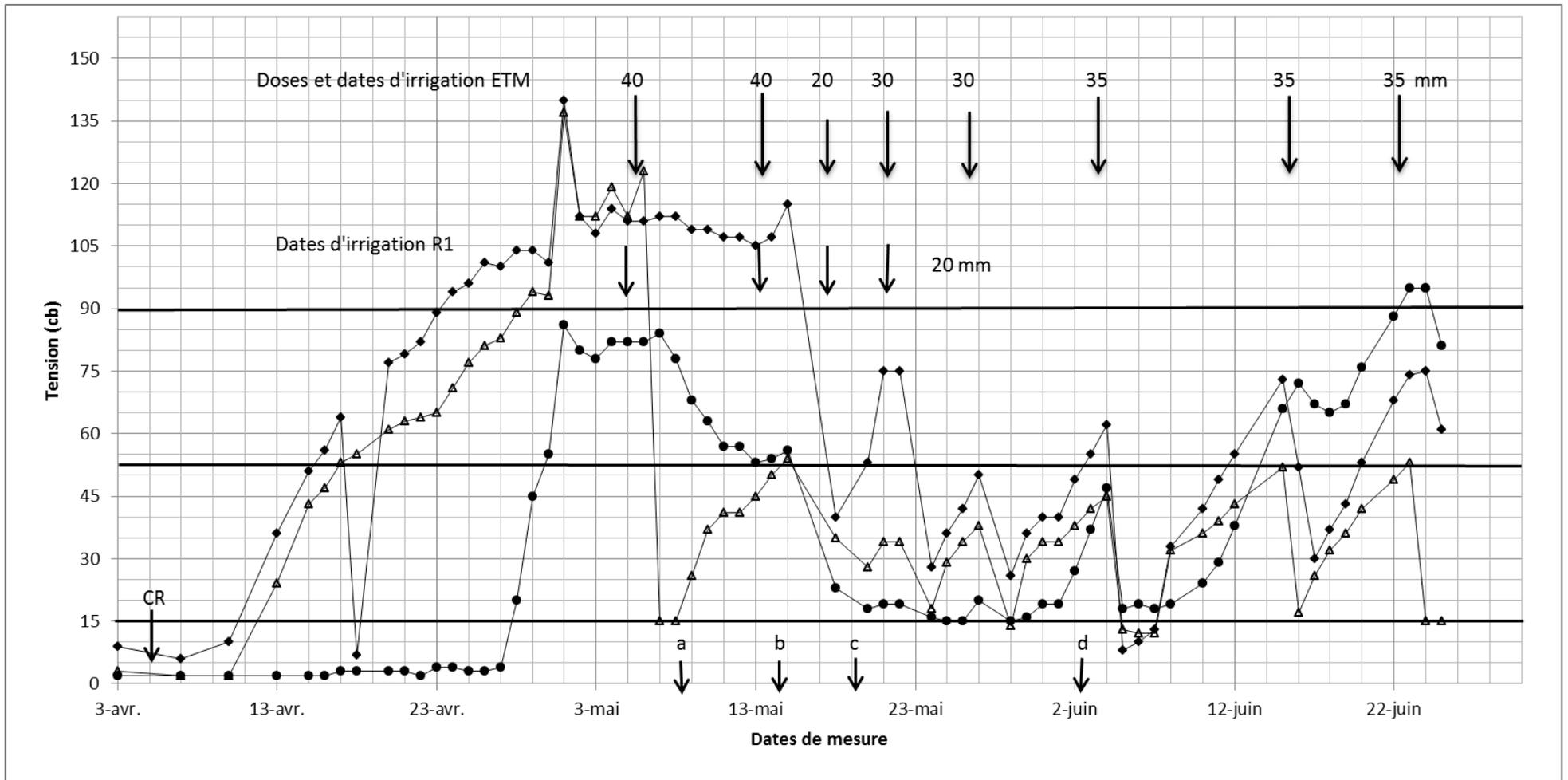


Figure 44. Mesures tensiométriques en cb (tensiomètre watermark) à différentes profondeurs du sol (■ : 30 cm, Δ : 60 cm, ● : 90 cm) du traitement ETM (1992). a : stade méiose, b : épiaison, c : floraison, d : stade laitex, CR : capacité de rétention en eau du sol. Les lignes horizontales indiquent les limites remarquables de l'utilisation de l'eau. 10- 15 cb : sol ressuyé, 15- 50 cb : confort hydrique, plus de 90 cb : la réserve du sol s'est beaucoup vidée.

## 10. Effet du stress hydrique sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Les analyses de variance des différentes dates de mesures et de  $\overline{NDVI}$  (annexe 1, tableaux 26 et 27) montrent des effets significatifs pour les variétés ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) et les régimes hydriques ( $p < 0,001$ ) pour toutes les dates et pour  $\overline{NDVI}$  et une interaction significative ( $p < 0,01$  à  $p < 0,001$ ) pour la majorité des dates à l'exception du 15 juillet. Les coefficients de variation des différentes dates sont faibles et varient de 1,88 % (11 juin) à 7,94 % (26 Juin), le coefficient de variation de  $\overline{NDVI}$  et aussi faible (2,13 %).

Le pourcentage de variation (annexe 1, tableaux 26 et 27) expliqué par les régimes hydriques varie de 66,06 % (9 Juin) à 88,74 % (22 Juin), celui expliqué par les variétés varie de 6,09 % (15 Juin) à 18,19 % (28 Juin), tandis que celui expliqué par l'interaction variétés  $\times$  régimes hydriques, varie de 4,48 % (15 Juin) à 20,10 % (9 Juin). Il en découle que l'effet régimes hydriques est toujours supérieur aux effets génétiques.

La figure 45 montre l'évolution de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) par variété et régime hydrique.

Les moyennes des NDVI et  $\overline{NDVI}$  sont données dans les tableaux 54 à 60.  $\overline{NDVI}$  (tableau 60) varient de 0,530 (Festival) à 0,593 (Soissons). Au niveau de ETM, de 0,523 % (Soissons) à 0,421 (Festival) au niveau de R1 et de 0,321 (Ambral) à 0,408 (Soissons). Le pourcentage de réduction (tableau 60) pour les variétés varie de 11,80 % (Soissons) à 24,66 % (Ambral) en R1 et de 28,87 % (Festival) à 45,41 % (Ambral) en R2. La variété Ambral (blé dur) est la plus affectée par le stress hydrique par rapport aux trois autres variétés de blé tendre quel que soit le type de stress, ces dernières présentent des valeurs proches en R2. En R1, la variété Soissons est la moins affectée.

La moyenne de  $\overline{NDVI}$  des régimes hydriques (tableau 60) toutes variétés confondues est plus importante au niveau de ETM avec 0,568, R2 présente la valeur la plus faible avec 0,374. Le pourcentage de réduction par rapport à l'ETM est de 18,13 % pour R1 et 34,15 % pour R2.

Les moyennes de l'aire sous les courbes des NDVI et des réductions par variété et régime hydrique sont données dans le tableau 61. Quel que soit le stress hydrique, le

pourcentage de réduction de l'aire sous la courbe le plus élevé est donné par la variété Ambral (11,56 % et 26,22 % respectivement pour R1 et R2). Au niveau du régime R1, les variétés Soissons (5,74 %) et Thésée (5,84 %) sont les moins affectées, Festival présente une réduction intermédiaire (8,69 %). Au niveau du stress sévère (R2), les variétés Festival et Thésée sont les moins affectées avec des valeurs de 14,42 % et 14,18 % respectivement. Un changement de classement des pourcentages de réduction par rapport à R1 au niveau de R2 est observé, la variété Soissons qui était la moins affectée au niveau de R1 devient la plus touchée par le stress sévère avec 16,67 %.

Tableau 54. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 9 et 11 Juin

Variétés et moyennes des régimes	9 juin						11 Juin					
	Moy. des variétés	ETM	R1		R2		Moy. des variétés	ETM	R1		R2	
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.
Ambral	0,742 c	0,829 abc	0,808 abc	2,53	0,591 e	28,71	0,730 c	0,832 a	0,800 ab	<b>3,85</b>	0,557 f	<b>33,05</b>
Festival	0,759 bc	0,794 abc	0,784 abc	1,26	0,700 d	11,84	0,739 bc	0,792 bc	0,761 c	3,91	0,664 e	16,16
Soissons	0,796 a	0,835 a	0,832 ab	0,36	0,721 d	13,65	0,787 a	0,831 a	0,827 a	0,48	0,703 d	<b>15,40</b>
Thésée	0,772 b	0,796 abc	0,781 c	1,88	0,738 d	7,29	0,752 b	0,783 bc	0,775 b	1,02	0,699 d	10,73
Moy ETM	0,813 a						0,810 a					
Moy R1	0,801 a			<b>1,48</b>			0,791 b			2,35		
Moy. R2	0,687 b			15,50			0,656 c			19,01		

NB : % réduc. = % de réduction

Tableau 55. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 15 et 17 Juin

Variétés et moyennes des régimes	15 juin						17 Juin					
	Moy. des variétés	ETM	R1		R2		Moy. des variétés	ETM	R1		R2	
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.
Ambral	0,625 c	0,784 ab	0,672 c	14,29	0,418 g	46,68	0,579 c	0,785 a	0,585 d	<b>25,48</b>	0,366 h	<b>53,38</b>
Festival	0,618 c	0,739 b	0,630 d	14,75	0,485 f	34,37	0,564 c	0,726 b	0,529 e	27,13	0,436 g	39,94
Soissons	0,696 a	0,791 a	0,767 ab	3,03	0,529 e	33,12	0,664 a	0,787 a	0,714 b	9,28	0,490 ef	<b>37,74</b>
Thésée	0,660 b	0,755 ab	0,693 c	8,21	0,532 e	29,54	0,613 b	0,736 b	0,643 c	12,64	0,460 fg	37,50
Moy ETM	0,767 a						0,759 a					
Moy R1	0,690 b			10,04			0,618 b			18,58		
Moy. R2	0,491 c			35,98			0,438 c			42,29		

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 56. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 18 et 20 Juin

Variétés et moyennes des régimes	18 juin						20 Juin					
	Moy. Des variétés	ETM	R1		R2		Moy. des variétés	ETM	R1		R2	
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.
Ambral	0,540 c	<b>0,762 a</b>	0,507 e	<b>33,465</b>	<b>0,352 i</b>	<b>0,352</b>	0,512 bc	<b>0,731 a</b>	0,488 d		<b>0,317 e</b>	
Festival	<b>0,527 c</b>	<b>0,699 bc</b>	<b>0,476 ef</b>	31,903	0,406 h	0,406	<b>0,486 c</b>	<b>0,649 bc</b>	<b>0,424 e</b>		0,385 e	
Soissons	<b>0,629 a</b>	<b>0,762 a</b>	<b>0,674 c</b>	<b>11,549</b>	<b>0,453 fg</b>	<b>0,453</b>	<b>0,573 a</b>	0,716 a	<b>0,606 c</b>		<b>0,396 e</b>	
Thésée	0,583 b	0,723 ab	0,607 d	16,044	0,420 gh	0,420	0,519 b	0,663 b	0,531 d		0,363 e	
Moy ETM	0,736 a						0,690 a					
Moy R1	0,566 b			23,098			0,512 b			<b>25,80</b>		
Moy. R2	0,408 c					44,565	0,365 c					47,10

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 57. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 22 et 24 Juin

Variétés et moyennes des régimes	22 juin						24 Juin					
	Moy. Des variétés	ETM	R1		R2		Moy. des variétés	ETM	R1		R2	
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.
Ambral	0,501 b	0,726 a	0,458 e	36,92	0,318 h	56,23	0,443 b	0,652 a	0,388 f	<b>40,49</b>	0,289 i	<b>55,68</b>
Festival	0,459 c	0,620 c	0,399 f	35,56	0,359 g	42,11	0,394 c	0,503 d	0,357 g	29,03	0,322 h	35,98
Soissons	0,545 a	0,687 b	0,550 d	20,05	0,391 f	43,08	0,479 a	0,616 b	0,462 e	25	0,360 g	<b>41,56</b>
Thésée	0,489 b	0,647 c	0,467 e	27,79	0,353 g	45,40	0,432 b	0,574 c	0,393 f	31,53	0,330 h	42,51
Moy ETM	0,670 a						0,586 a					
Moy R1	0,469 b			30,08			0,400 b			31,74		
Moy. R2	0,355 c					46,98	0,325 c					44,54

NB: % réduc. = % de réduction

Tableau 58. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 26 et 27 Juin

Variétés et moyennes des régimes	26 juin						27 Juin					
	Moy. Des variétés	ETM	R1		R2		Moy. des variétés	ETM	R1		R2	
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.
Ambral	0,368 b	0,554 a	0,315 c	43,14	0,235 d	57,58	0,352 c	0,515 a	0,297 de	<b>42,33</b>	<b>0,242 f</b>	<b>53,01</b>
Festival	0,359 b	0,440 b	0,319 c	27,50	0,319 c	27,50	0,330 c	0,414 b	0,300 de	27,54	<b>0,277 ef</b>	<b>33,09</b>
Soissons	0,432 a	0,539 a	0,405 b	24,86	0,350 bc	35,06	0,405 a	0,501 a	0,383 bc	<b>23,55</b>	0,331 de	33,93
Thésée	0,392 b	0,517 a	0,351 bc	32,11	0,307 c	40,62	0,375 b	0,470 a	0,349 cd	25,74	0,307 de	34,68
Moy ETM	0,513 a						0,475 a					
Moy R1	0,348 b			32,16			0,332 b			30,11		
Moy. R2	0,303 c			40,94			0,289 c					

NB: % réduc. = % de réduc.

Tableau 59. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 28 Juin et 2 Juillet

Variétés et moyennes des régimes	28 Juillet						2 Juillet					
	Moy. Des variétés	ETM	R1		R2		Moy. des variétés	ETM	R1		R2	
		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.		Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.
Ambral	0,323 c	0,437 b	0,273 f	37,53	0,257 f	41,19	0,246 c	0,260 ef	0,236 f	<b>9,23</b>	0,243 f	<b>6,54</b>
Festival	0,309 d	0,375 c	0,277 f	26,13	0,274 f	26,93	0,256 c	0,259 ef	0,243 f	6,18	0,265 ef	-2,32
Soissons	0,385 a	0,462 a	0,374 c	19,05	0,318 e	31,17	0,329 a	0,370 a	0,323 c	<b>12,70</b>	0,294 d	<b>20,54</b>
Thésée	0,354 b	0,420 b	0,342 d	18,57	0,301 e	28,33	0,305 b	0,348 b	0,290 d	16,67	0,278 de	20,11
Moy ETM	0,424 a						0,309 a					
Moy R1	0,317 b			25,24			0,273 b			11,65		
Moy. R2	0,288 c			32,08			0,270 b			12,62		

NB: % réduc. = % de réduc.

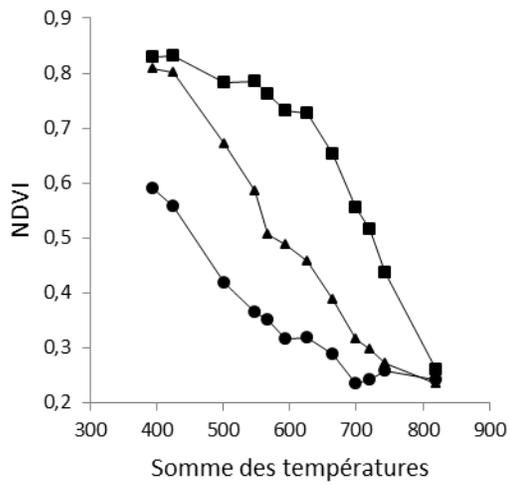
Tableau 60. Moyennes et pourcentages de réduction de NDVI du 15 Juin et  $\overline{NDVI}$

Variétés et moyennes des régimes	15 Juillet		$\overline{NDVI}$					
	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	ETM	R1		R2	
				Moy. des variétés	Moy. des variétés	% réduc.	Moy. des variétés	% réduc.
Ambral	0,209 c		0,450 c	0,588 a	0,443 c	<b>24,66</b>	<b>0,321 b</b>	<b>45,41</b>
Festival	0,227 b		<b>0,443 c</b>	<b>0,530 c</b>	<b>0,421 c</b>	20,57	0,377 a	<b>28,87</b>
Soissons	0,251 a		<b>0,508 a</b>	<b>0,593 a</b>	<b>0,523 a</b>	<b>11,80</b>	<b>0,408 a</b>	31,20
Thésée	0,233 b		0,475 b	0,560 b	0,473 b	15,54	0,391 a	30,18
Moy. ETM	0,218 b			<b>0,568 a</b>				
Moy. R1	0,227 b	-4,13		0,465 b		18,13		
Moy. R2	0,246 a	-12,84		<b>0,374 c</b>		34,15		

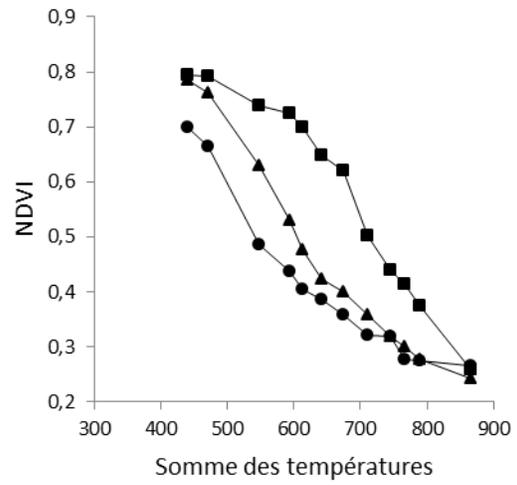
Au niveau de la date du 15 Juillet les pourcentages sont négatifs car il n'y a plus d'absorption, la valeur de la réflexion est supérieure à l'énergie reçue en réalité cette valeur correspond à la somme de la réflexion et de l'émission des plantes puisque tous les corps émettent un rayonnement.

Tableau 61. Moyennes et pourcentages de réduction de la surface des courbes de NDVI par variété et régime hydrique

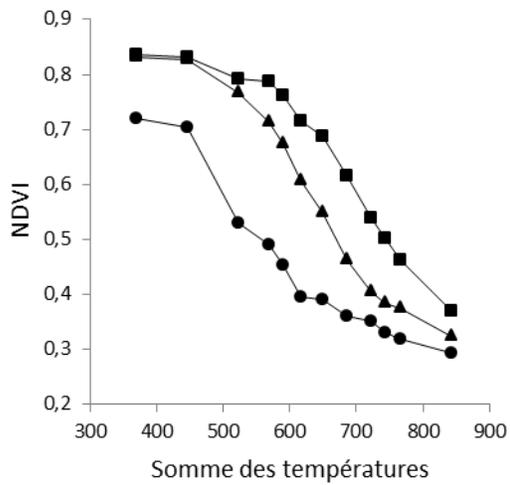
variétés	surface des courbes NDVI				
	ETM	R1	% réduction	R2	% réduction
Ambral	621,45	549,44	11,59	458,52	26,22
Festival	616,35	562,81	8,69	527,50	14,42
Soissons	641,98	605,14	5,74	534,99	16,67
Thésée	599,89	564,86	5,84	514,81	14,18



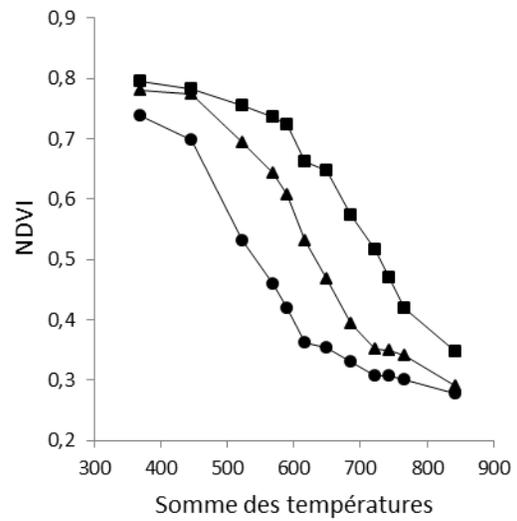
Ambral



Festival



Soissons



Thésée

Figure 45. Evolution de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) par variété et régime hydrique. ■ETM, ● R2 et ▲. R1

## 11. Principales corrélations entre le rendement en grain, ses composantes, NDVI selon le régime hydrique

Les corrélations suivantes sont positives et significatives au niveau des trois régimes (tableau 62) :

- entre le rendement en grain d'une part et d'autre part
  - \* le nombre de grains/m<sup>2</sup>,
  - \* le nombre d'épis/m<sup>2</sup> à la récolte,
  - \* la matière sèche de la biomasse aérienne à la récolte,
  
- entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> d'une part et d'autre part
  - \* la matière sèche des tiges à la floraison,
  - \* la matière sèche d'une tige à la floraison,
  - \* la matière sèche d'un épi à la floraison,
  - \* la matière sèche des tiges à la récolte,
  - \* la matière sèche des tiges + feuilles + balles à la récolte,
  - \* la matière sèche d'une tige à la récolte,
  - \* la matière sèche d'un épi à la récolte,
  - \* le nombre d'épis/m<sup>2</sup>,
  - \* la matière sèche du poids de 1000 grains
  
- entre le nombre de grains/épi d'une part et d'autre part
  - \* la matière sèche des feuilles à la récolte,
  - \* la matière sèche d'une tige à la floraison,
  - \* la matière sèche d'un épi à la récolte,
  - \* l'indice de récolte,
  - \* la matière sèche du poids de 1000 grains
  
- entre d'une part le poids de 1000 grains et d'autre part
  - \* la matière sèche d'une tige à la récolte,
  - \* le nombre d'épis/m<sup>2</sup> à la récolte,

- \* l'indice de récolte,
- \* la matière sèche d'un épi à la récolte,
- \* la matière sèche d'une tige à la floraison.

- entre NDVI d'une part et d'autre part

- \* le rendement en grain,
- \* le nombre de grains/m<sup>2</sup>,
- \* le nombre de grains/épi,
- \* le poids de 1000 grains.
- \* le LAI

*Corrélations négatives*

Les corrélations suivantes (tableau 62) sont négatives et significatives :

- Entre le poids de 1000 grains d'une part et d'autre part

- \* le nombre d'épis/m<sup>2</sup>,
- \* la matière sèche des feuilles à la récolte.

- Entre le nombre de grains/épi d'une part et d'autre part

- \* la matière sèche des feuilles,

- Entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> d'une part et d'autre part

- \* la matière sèche d'une tige à la floraison,
- \* la matière sèche d'un épi à la floraison
- \* la matière sèche d'une tige à la récolte,
- \* la matière sèche d'un épi à la récolte,
- \* la matière sèche du poids de 1000 grains.

Corrélations significatives uniquement au niveau du régime hydrique ETM  
(tableau 62)

*Corrélations positives*

Les corrélations suivantes sont positives et significatives uniquement dans le régime hydrique ETM (tableau 62) :

- Entre le rendement en grain et la matière sèche des balles.

- Entre le nombre de grains et la matière sèche des feuilles vertes à la floraison

*Corrélations négatives*

\* Entre la matière sèche des tiges à la récolte et le poids de 1000 grains

Corrélation au niveau du régime hydrique de R1

*Corrélations positives*

La corrélation entre le rendement en grain et la matière sèche d'un épi à la récolte est positive.

*Corrélations négatives*

Les corrélations entre le nombre de grains/épi et le nombre de grains/m<sup>2</sup>, le poids de 1000 grains d'une part et d'autre part la matière sèche des tiges à la floraison et la matière sèche des balles/m<sup>2</sup> à la récolte sont négatives.

Corrélation au niveau du régime hydrique de R2

*Corrélations positives*

Les corrélations entre le nombre de grains/m<sup>2</sup> et le nombre de grains/épi, le rendement en grain d'une part et d'autre part la matière sèche d'une tige à la récolte, la matière sèche du poids de 1000 grains, la matière sèche des tiges à la floraison, la matière sèche d'une tige à la floraison sont positives et significatives (tableau 62).

*Corrélations négatives*

Les corrélations entre la matière sèche du poids de 1000 grains d'une part et d'autre part la matière sèche des feuilles mortes et des épis à la floraison (tableau 62).

Corrélations communes aux régimes ETM et R1

- le nombre de grains/m<sup>2</sup> et la matière sèche des feuilles mortes à la floraison (r négatif).
- La matière sèche d'un épi à la floraison et la matière sèche du poids de 1000 grains à la floraison.

Corrélations communes aux régimes ETM et R2

- nombre de grains/épi et rendement en grain.

### Corrélations communes aux régimes R1 et R2

- Rendement en grain d'une part et d'autre part
  - La matière sèche des épis à la floraison (r négatif)
  - La matière sèche des feuilles mortes à la floraison (r négatif)
  - La matière sèche d'un épi à la floraison (r négatif)
  - La matière sèche des balles à la récolte (r positif)
- Nombre de grains/m<sup>2</sup>
  - La matière sèche des balles à la récolte
- La matière sèche du poids de 1000 grains et la biomasse à la floraison (r négatif).

Aucun caractère mesuré à la floraison n'est corrélé avec le rendement en grain au niveau du régime conduit à l'ETM. Cependant des corrélations indirectes communes aux trois régimes ont été observées, il s'agit d'une part du nombre de grains/m<sup>2</sup> et d'autre part de la matière sèche des tiges à la floraison ( $r^2 = 0,342^*$ ,  $0,343^*$  et  $0,458^{**}$  respectivement pour les régimes ETM, R2 et R1), de la matière sèche d'un épi à la floraison ( $r = -0,497^{***}$ ,  $-0,547^{***}$  et  $-0,648^{***}$  respectivement pour les régimes ETM, R2 et R1) et de la matière sèche d'une tige à la floraison ( $r = -0,482^{***}$ ,  $-0,403^{**}$  et  $-0,495^{***}$  respectivement pour les régimes ETM, R2 et R1).

Les régimes R1 et R2 provoquent l'apparition de corrélations n'existant pas au niveau du régime conduit à l'ETM, c'est le cas des corrélations entre d'une part le rendement en grain et d'autre part la matière sèche du poids de 1000 grains au niveau du régime R2 ( $r = 0,520^{***}$ ), de la matière sèche des épis à la floraison ( $r = -0,380^*$  pour R1 et  $-0,679^{***}$  pour R2), de la matière sèche des feuilles mortes à la floraison ( $r = -0,409^{**}$  pour R1 et  $-0,784^{***}$  pour R2) et de la matière sèche d'un épi à la floraison ( $r = -0,407^{**}$  pour R1 et  $-0,544^{***}$  pour R2). Des ruptures de corrélations sont constatées au niveau des régimes R1 et R2, c'est le cas des corrélations entre le rendement en grain et la matière sèche des balles à la récolte, du nombre de grains/épi et de la matière sèche d'un épi à la floraison, du nombre de grains/m<sup>2</sup> et de la matière sèche des feuilles vertes à la

floraison, de la matière sèche du poids de 1000 grains et de la matière sèche d'un épi à la floraison, pour cette dernière corrélation seul le régime sévère (R2) montre une rupture.

75 %, 44,36 %, 20,16 % et 11,36 % de la variabilité du rendement en grain, du nombre de grains/m<sup>2</sup>, du poids de 1000 grains et du nombre de grains/épi respectivement est expliqué par la variabilité de NDVI (figure 46).

52,40 %, 28,40 %, 23,20 % et 23,20 % de la variabilité du rendement en grain, du poids de 1000 grains, du nombre de grains/épi et du nombre de grains/m<sup>2</sup> respectivement est expliqué par la variabilité du LAI (figure 47). 59,80 % de la variabilité de NDVI est expliqué par la variabilité de LAI (figure 47).

La prédiction du rendement en grain, du nombre de grains/m<sup>2</sup>, du poids de 1000 grains et du nombre de grains/épi peut donc être réalisée à partir de NDVI et/ou du LAI.

Tableau 62. Principales corrélations entre le rendement en grain, ses composantes, NDVI et LAI selon le régime hydrique

Caractères		ETM (ddl = 46)	R1 (ddl = 46)	R2 (ddl = 46)	Caractères		ETM (ddl = 46)	R1 (ddl = 46)	R2 (ddl = 46)
Rendement en grain	Nombre de grains/épi R.	0,310*	0,213	0,462**	Nombre de grains/m <sup>2</sup>	MS tiges Flo.	0,342*	0,458**	0,343*
	Nombre de grains/m <sup>2</sup> R	0,712***	0,697***	0,590***		MS 1 tige Flo	-0,482***	-0,495***	-0,403**
	Matière sèche des balles R	0,309*	0,100	0,209		MS 1 épi Flo	-0,497***	-0,648***	-0,547***
	MS 1 tige R.	0,222	0,119	0,410**		MS feuilles vertes Flo	0,296*	0,249	0,171
	MS 1 épi R	0,017	-0,324*	-0,111		MS feuilles mortes Flo	-0,388**	-0,321*	-0,193
	IR	0,389**	0,388**	0,723***		MS tiges R	0,855***	0,792***	0,882***
	Nombre d'épis/m <sup>2</sup> R	0,360*	0,417**	0,329*		MS T+F+ B R.	0,812***	0,841***	0,799***
	MS pmg	0,117	0,061	0,520***		MS feuilles R	0,677***	0,766***	0,724***
	MS biomasse R.	0,960***	0,925***	0,919***		MS balles R	0,084	0,360*	0,390**
	MS tiges Flo	0,233	0,289	0,298*		MS 1 tige R	-0,352*	-0,543***	-0,406*
	MS épis Flo	-0,019	-0,380*	-0,679***		MS 1 épi R	-0,494***	-0,562***	-0,593***
	MS feuilles mortes Flo	-0,237	-0,409**	-0,784***		Nombre d'épis/m <sup>2</sup>	0,868***	0,902***	0,928***
	MS 1 tige Flo	0,079	0,132	0,430**		Nbre de grains/épi	-0,263	-0,391**	-0,252
	MS 1 épi Flo	-0,070	-0,407**	-0,544***		MS pmg	-0,608***	-0,662***	-0,378**
	NDVI		0,866***			NDVI		0,666***	
	LAI (du 15/06/92)		0,724***			LAI (du 15/06/92)		0,482*	
Nombre de grains/épi	MS feuilles R	-0,329*	-0,548***	-0,314*	Poids de 1000 grains	MS biomasse Flo	-0,106	0,367*	0,444**
	MS feuilles mortes Flo	-0,283	-0,466***	-0,601***		MS 1 tige R	0,796***	0,909***	0,909***
	MS balles R	-0,327*	-0,474***	-0,229		MS tiges R	-0,362*	-0,063	-0,063
	MS 1 épi Flo	0,338*	0,153	0,012		MS tiges Flo	-0,185	-0,335*	-0,020
	MS 1 tige Flo.	0,846***	0,900***	0,829***		Épis/m <sup>2</sup> R	-0,840***	-0,830***	-0,606***
	MS épis Flo	0,038	-0,477**	-0,430**		IR	0,687***	0,662***	0,837***
	MS biomasse Flo.	0,199	-0,361*	-0,241		MS balles/m <sup>2</sup> R.	0,173	-0,409*	-0,178
	Indice de récolte	0,875***	0,782***	0,762***		MS 1 épi R	0,683***	0,445**	0,507***
	Épis/m <sup>2</sup> R	-0,698***	-0,739***	-0,587***		MS épis Flo	-0,030	-0,235	-0,608***
	MS 1 tige R.	0,897***	0,956***	0,868***		MS 1 tige Flo.	0,815***	0,862***	0,923***
	Nbre grains/m <sup>2</sup>	-0,263	-0,391**	-0,252		MS 1 épi Flo.	0,602***	0,485***	-0,058
	MS 1 épi R	0,425**	0,299*	0,465***		MS feuilles mortes Flo	0,243	-0,031	-0,708***
	Pmg	0,770***	0,799***	0,808***		MS feuilles R	-0,387**	-0,574***	-0,379**
	NDVI		0,337*			NDVI		0,449**	
	LAI(du 15/06/92)		0,482*			LAI (du 15/06/92)		0,533**	
	NDVI-LAI (du 15/06/92)		0,835***						

Flo : floraison, R : récolte

Cor. Communes ETM, R1 et R2    
  Cor. Communes ETM et R1    
  Cor. Communes R1 et R2    
  Cor. ETM    
  Cor. R1    
  Cor. R2

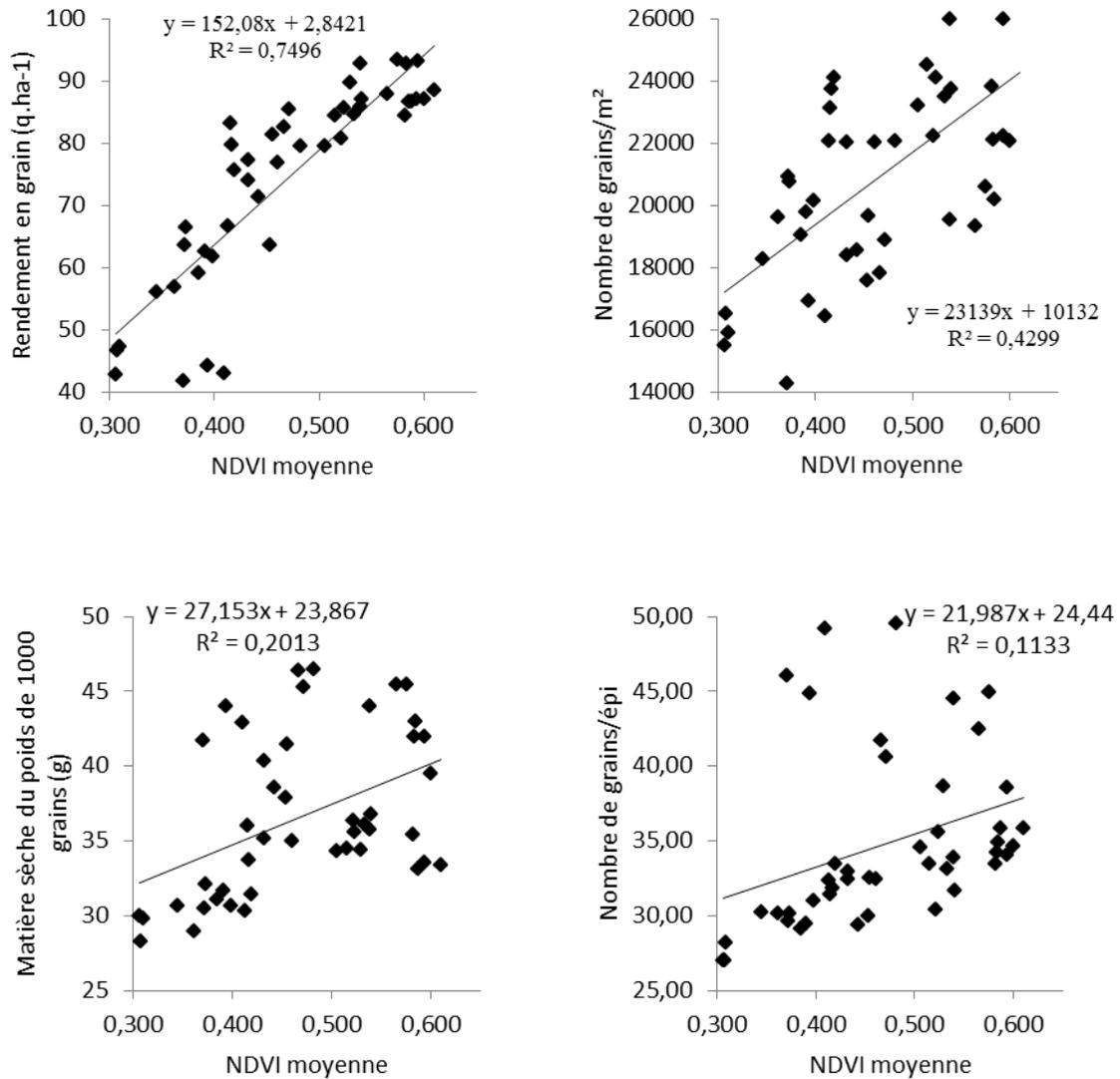


Figure 46. Relation entre d'une part NDVI moyenne et d'autre part la matière sèche du rendement en grain et du poids de 1000 grains, du nombre de grain/m<sup>2</sup> et du nombre de grains/d'épis.

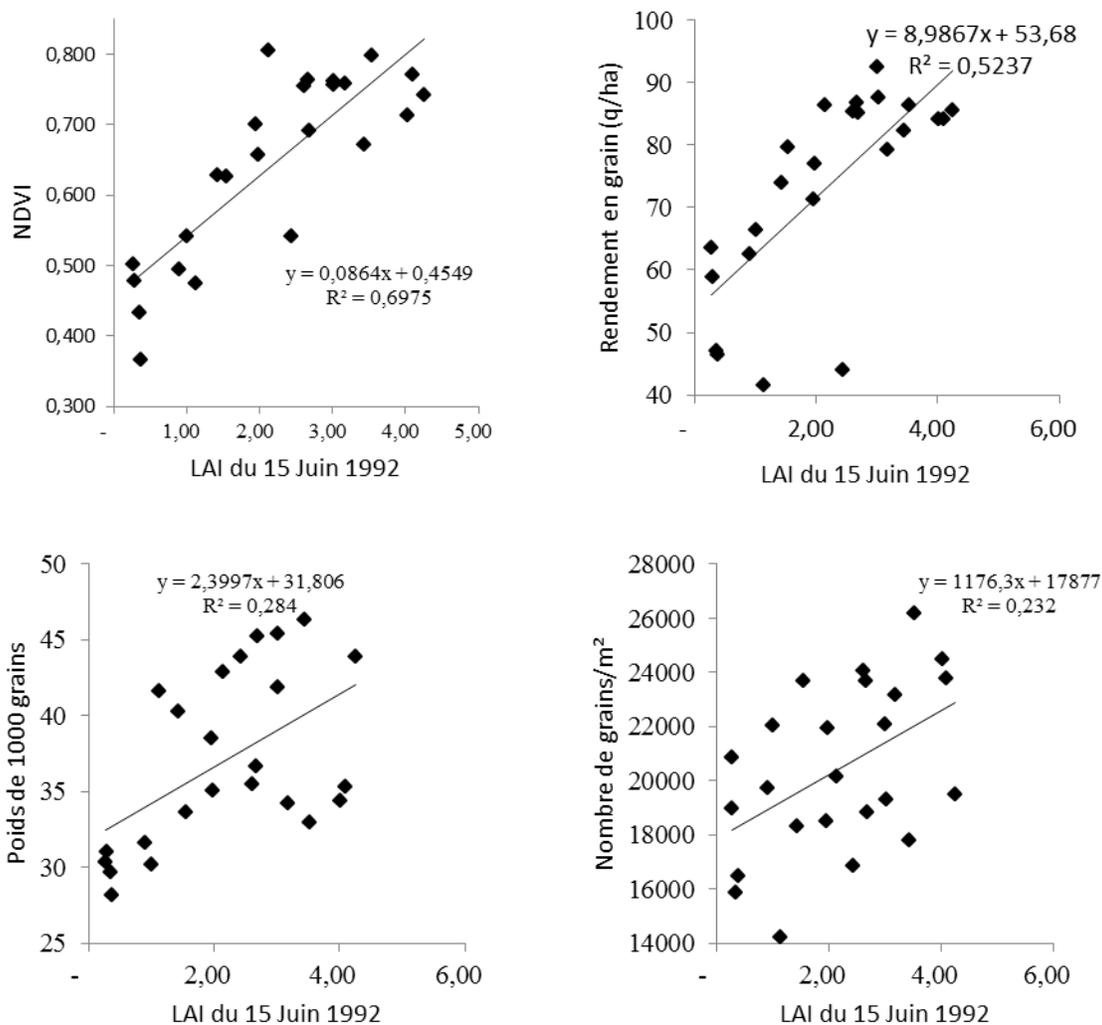


Figure 47. Relation entre d'une part le LAI du 15 Juin 1992 et d'autre part NDVI, le rendement en grain, le poids de 1000 grains, le nombre de grains/m<sup>2</sup>.

## 12. Synthèse des résultats de l'essai réalisé en 1992

Pour la majorité des caractères relatifs à la plante, les effets génétiques sont supérieurs aux effets régimes hydriques à l'exception de la matière sèche de la biomasse aérienne à la récolte, de l'indice de récolte et du LAI. Concernant la remobilisation et la translocation, comme pour 1991, l'effet régimes hydriques est supérieur aux effets génétiques. Le stress hydrique provoque une diminution de la translocation au profit de la remobilisation, cependant la translocation reste supérieure à la remobilisation.

Pour l'ensemble des caractères relatifs à l'eau (disponibilité dans le sol et dans la plante : potentiel hydrique foliaire de base et midi solaire, teneur en eau relative de base et midi solaire), les effets régimes hydriques sont supérieurs aux effets génétiques. Pour la consommation en eau des cultures jusqu'à la floraison les variétés Ambral, Soissons et Festival sont celles qui consomment le plus. La variété Thésée a la consommation la plus faible. De la floraison à la maturité physiologique, la consommation en eau est équivalente. Le régime R2 (stress hydrique au stade gonflement) est celui qui a le plus souffert du manque d'eau et pour lequel la consommation est la plus faible.

Quelle que soit la variété, la teneur en eau relative est un indicateur de stress hydrique assez performant puisque les régimes étudiés ont bien été différenciés, d'autant mieux que le stress est élevé. La variété de blé dur Ambral est celle qui perd le plus d'eau, la variété de blé tendre Thésée semble garder l'eau le plus longtemps possible.

La moyenne de NDVI montre aussi un effet régimes hydriques supérieur aux effets génétiques car le stress hydrique a réduit la surface foliaire (sénescence) et donc la réflectance est plus élevée.

L'application d'un stress hydrique modéré et sévère (R1 et R2) a provoqué une réduction générale du rendement et de ses composantes (nombre de grains/épi, nombre de grains/m<sup>2</sup> et poids de 1000 grains), de la matière sèche de la biomasse aérienne à la récolte, de la matière sèche d'un épi, d'une tige, des tiges/ha des feuilles/ha. La réduction a touché toutes les variétés.

La variété Thésée est caractérisée par un poids de 1000 grains, un nombre de grains/épi et un indice de récolte les plus élevés et un nombre de grains/m<sup>2</sup> et d'épis/m<sup>2</sup> les plus faibles quel que soit le régime hydrique. Cette variété a été pénalisée par un nombre de pieds/m<sup>2</sup> inférieur aux trois autres variétés, ce qui explique le faible nombre d'épis/m<sup>2</sup>, de plus cette variété ne talle pas beaucoup.

Les variétés Soissons et Festival ont un nombre d'épis/m<sup>2</sup> élevé et un poids de 1000 grains statistiquement identique mais la variété Soissons présente le plus grand nombre de grains comparée à Festival ce qui a entraîné un rendement légèrement plus élevé mais statistiquement identique quel que soit le régime hydrique.

La variété de blé dur Ambral a un poids de 1000 grains plus faible que la variété Thésée. Bien que cette variété produise un rendement en grain équivalent à celui des variétés de blé tendre dans les conditions de confort hydrique (ETM), celle-ci est la plus affectée par le stress hydrique.

Il est à noter que les variétés de blé ont des caractéristiques spécifiques concernant les composantes de rendement ; cependant, une compensation entre ces dernières aboutit à un rendement en grain équivalent quel que soit le régime hydrique ; c'est le cas de la variété Thésée dont le nombre d'épis/m<sup>2</sup> est inférieur aux trois autres variétés tandis que le poids de 1000 grains et le nombre de grains/épi sont supérieurs.

Une augmentation en valeur absolue du potentiel hydrique foliaire (de base et midi solaire) pour toutes les variétés est constatée dans les deux régimes R1 et R2. La variété de blé dur Ambral présente toujours les valeurs les plus élevées. Toutes les variétés de blé tendre ont présenté des potentiels hydriques foliaires de base et midi solaire équivalents à l'exception du 2 juin où Soissons a présenté un potentiel hydrique foliaire midi solaire le plus élevé en valeur absolue.

L'étude des variables explicatives biologiques a montré que la matière sèche à la récolte (un épi, d'une tige, des tiges et des feuilles) a aussi été réduite. La diminution de la disponibilité de l'eau du sol a entraîné une diminution de la consommation en eau par les plantes (ETR de la période Floraison – maturité physiologique), de la teneur en eau relative de base et midi solaire ce qui a provoqué une sénescence précoce des feuilles et une diminution de la différence normalisée (NDVI). Cette indisponibilité de l'eau dans le sol a entraîné une augmentation en valeur absolue du potentiel hydrique foliaire de base et midi solaire et de la remobilisation des assimilats de la tige vers les grains et une diminution de la translocation des assimilats provenant de la photosynthèse due à une diminution de la surface photosynthétique des feuilles (voir sénescence des feuilles). Quel que soit le type de stress, la surface verte de la feuille étendard de la variété de blé dur Ambral est la plus affectée par le stress hydrique. La diminution de la surface verte est reflétée par la diminution du LAI et du LAD.

Le stress hydrique a provoqué une diminution de la translocation au profit de la remobilisation, cependant, la translocation est toujours plus importante que la remobilisation quel que soit le régime hydrique et que le stress hydrique affecte de la même façon les quatre variétés (blés dur et tendre).

L'étude des corrélations montre que le rendement en grain est principalement corrélé à NDVI, à l'indice foliaire (LAI), à la matière sèche de la biomasse à la récolte, au nombre de grains/m<sup>2</sup>, au nombre d'épis/m<sup>2</sup> et à l'indice de récolte.

L'analyse des corrélations entre les différents caractères montre que le stress hydrique modifie les liaisons entre les caractères et provoque des ruptures de corrélations, c'est le cas des corrélations significatives uniquement au niveau du régime hydrique ETM et établissement de nouvelles corrélations au niveau des régimes hydriques R1 et R2.

## Discussion générale

Des variations génotypiques statistiquement significatives pour le rendement en grain et ses composantes ont été rapportées chez le blé tendre (Abd El Moneim *et al.*, 2010, Shamsi and Kobraee, 2011) et chez le blé dur (Elhani S, *et al.*, 2007) dans des conditions de confort hydrique et de stress hydrique. Dans cette étude, nous avons utilisé six variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en 1991 et quatre variétés dont une de blé dur (*Triticum durum* Desf) en 1992. Ces variétés montrent une variation élevée pour tous les caractères étudiés (rendement en grain, nombre de grains/m<sup>2</sup>, poids de 1000 grains, matière sèche à la floraison et à la récolte, indice foliaire, sénescence, teneur en eau relative, potentiel hydrique foliaire, consommation en eau des culture et NDVI) et pour les deux essais dans tous les régimes hydriques à l'exception du rendement en grain dans les conditions de confort hydrique (ETM) en 1992 où toutes les variétés ont présenté des moyennes statistiquement égales (probablement dû au nombre moyen de pieds/m<sup>2</sup> statistiquement différents d'une variété à une autre). La signification de l'effet variétés suggère que des différences génétiques existent parmi les variétés étudiées. La présence d'interaction génotypes × régimes hydriques a été trouvée dans notre étude. Selon Gallais (1990), la présence d'interaction génotypes × environnements indique que l'expression des gènes n'est pas la même sous diverses conditions environnementales, certaines variétés sont plus stables que d'autres, c'est le cas de Festival, cependant cette variété donne un rendement en grain plus faible que les autres variétés dans les deux régimes hydriques en 1991 ; en 1992, elle se comporte comme les autres variétés de blé tendre.

La comparaison des moyennes entre les différents régimes hydriques montre que tous les caractères ont des moyennes toujours plus faibles dans les conditions de stress hydrique par rapport aux conditions de confort hydrique dans les deux essais. Selon Beheshti et Behboodi Fard (2010), le stress hydrique diminue le rendement biologique et en grain. Nos résultats montrent que dans le régime ETM, toutes les variétés donnent des rendements en grain statistiquement équivalents en 1992. Tandis que sous les régimes R2 (stress hydrique au stade gonflement) et R1 (stress hydrique à l'anthèse), les variétés se comportent différemment, en effet, les variétés Artaban (blé tendre) et Ambral (blé dur)

donnent les rendements les plus faibles. Selon Bányai *et al.*, (2012), dans le cas d'un déficit hydrique, il y a une augmentation du nombre d'épillets stériles basaux et apicaux, mais la perte de grains est affectée dans tous les épillets de l'épi. Kumar *et al.* (2006) montre une réduction, dans les conditions de stress hydrique, du poids de 1000 grains sur le riz. Dans leur étude, Fábíán *et al.*, (2013), concluent que la variété Plainsman V est capable de maintenir son activité photosynthétique sous des conditions de sécheresse moyenne et modérée, qui entraîne une plus grande fixation du carbone comparé à la variété sensible Cappell Desprez. Selon Demirevska *et al.* (2008), le stress hydrique provoque, chez les variétés sensibles de blé tendre, une diminution de la surface relative occupée par les mitochondries dans la cellule et une augmentation de la quantité d'acide abscisique. Ces auteurs montrent que les variétés tolérantes au stress hydrique avaient des niveaux de protéines, particulièrement la RuBisCo (ribulose biphosphate carboxylase : enzyme impliquée dans la première étape importante de la fixation du carbone) et les calpaïnes (enzymes protéolytiques), plus élevées. La diminution de la surface relative des mitochondries affecte les différentes fonctions de ces dernières (respiration intracellulaire, dégradation des lipides et synthèse des protéines).

Le classement des variétés de blé tendre communes aux deux essais (Festival, Soissons et Thésée) montre que quels que soient l'année ou le régime hydrique, la variété Soissons donnent le plus grand nombre de grains/m<sup>2</sup> et d'épis/m<sup>2</sup> (pour ce dernier caractère Soissons est statistiquement égal à Festival) tandis que la variété Thésée donne le plus grand poids de 1000 grains ; il y a donc une stabilité de comportement pour les variétés pour ces trois caractères. Concernant l'indice de récolte, à l'ETM, la variété Thésée est supérieure à Festival et Soissons quelle que soit l'année. Par contre, au niveau du régime R1, le classement change d'une année à l'autre pour Thésée et Soissons (instables) tandis que Festival garde le même classement (stable) et donne le plus mauvais indice de récolte.

Pour tous les caractères les variétés Artaban (blé tendre, 1991) et Ambral (blé dur, 1992) ont un indice de sensibilité (SSI) plus élevé pour le rendement en grain, mais le SSI pour le poids de 1000 grains et le nombre de grains/m<sup>2</sup> est plus élevé dans les deux régimes (R2 et R1 en 1992) pour Ambral. Parmi les variétés de blé tendre, Soissons a le plus faible indice de sensibilité pour la majorité des caractères en 1992 mais cette variété

a l'indice le plus élevé en 1991 et Festival l'indice le plus élevé en 1992. En 1991, c'est la variété Scipion qui a l'indice le plus faible, tandis que Soissons a un indice de sensibilité presque équivalent à celui de la variété Artaban pour le rendement en grain. Ainsi, la tolérance au stress dépend des variétés à l'intérieur de la même espèce et de l'environnement dans lequel elles sont cultivées.

Pour les caractères matière sèche à la floraison et à la récolte, la remobilisation et la translocation de la matière sèche, toutes les variétés ont été réduites de la même façon en 1991. Concernant la surface verte de la feuille étendard, Artaban présente une réduction équivalente à celles des variétés Soissons et Beauchamp. Pour le Potentiel hydrique midi solaire les variétés Artaban, Thésée et Festival sont moins sensibles au stress hydrique par rapport à Soissons. Ces résultats montrent que la variété de blé dur Ambral (1992) se comporte différemment sous l'effet d'un stress hydrique par rapport aux variétés de blé tendre.

Pour le rendement en grain, le blé dur (Ambral en 1992) a une plus grande réduction dans les conditions de stress hydrique comparé au blé tendre. Nos résultats sont similaires à ceux de Marty et Slafer (2007). Selon ces auteurs, le rendement moyen était similaire pour les deux espèces de blé, mais les rendements en grain du blé tendre sont plus élevés dans les conditions de stress sévère tandis que le blé dur possède un potentiel de rendement plus élevé. Ils ont aussi trouvé que les deux espèces ont une croissance similaire avant l'anthèse mais après l'anthèse le blé tendre a une croissance plus grande que celle du blé dur dans les environnements relativement difficile et vice-versa. La tolérance au stress hydrique du blé tendre comparé à celle du blé dur est vraisemblablement due à la présence du génome D chez le blé tendre. Le génome D est originaire d'*Aegilops tauschii* (Coss.) Schmalh, (*Aegilops squarrosa* auct, non L.). Le genre *Aegilops* représente une importante source naturelle de gènes utiles pour l'amélioration du blé en particulier pour la résistance (Belkadi *et al.*, 2003). Les génotypes de blé tendre et de blé dur étaient caractérisés par différentes réactions physiologiques à l'application de stress hydrique et par des réponses moléculaires clairement différentes (Aprile *et al.*, 2009). Selon ces auteurs, l'organisation du génome a

montré des différences du niveau d'expression de centaines de gènes situés sur le génome D ou contrôlé par des régulateurs situés sur le génome D.

Le rendement du blé provient principalement de l'accumulation de la matière sèche après l'anthèse et de la redistribution dans les organes végétatifs avant l'anthèse. L'application d'un stress hydrique modéré (stress appliqué à l'anthèse) provoque une réduction de la matière sèche des épis et d'une tige à la floraison et la matière sèche d'un épi à la récolte (1991) et des tiges à la récolte (1991 et 1992) et des feuilles à la récolte (1992). Les réductions sont plus importantes au niveau du traitement sévère (stress appliqué au stade gonflement) en 1992. Nos résultats sont en accord avec ceux de Kumar *et al.* (2006) qui trouvent, chez le riz, une réduction significative de l'accumulation de la matière sèche à la floraison et à la maturité dans les sites affectés par le stress hydrique. A la floraison, la quantité de matière sèche des épis est inférieure à celle des tiges et des feuilles. Nos résultats sont en accord avec ceux de Dordas (2012) qui trouve que la matière sèche des feuilles et des tiges était plus importante que la matière sèche de l'épi à la floraison chez l'orge.

Le LAI et le LAD sont affectés par le stress hydrique. Le LAD qui intègre le LAI et la durée de vie de la feuille semble mieux exprimer l'effet du stress que le LAI.

Nos résultats montrent que le stress hydrique réduit la translocation à partir des feuilles de 18,01 % en 1991 et 9,43 % (R1) et 12,52 % (R2) en 1992 et augmente la remobilisation à partir des tiges de 62,00 % en 1991 et 38,50 (R1) et 51,16 % (R2) en 1992 ; cependant, la translocation est toujours supérieure à la remobilisation. Les résultats de Yang *et al.* (2001) montrent que le stress hydrique augmente les réserves totales de carbone remobilisé à partir des tiges et des gaines de 23,8 - 27,1 % et 19,6 -36,7 %, respectivement pour les traitements avec une quantité normale et élevée d'azote.

Le rendement en grain, le nombre de grains/m<sup>2</sup>, la biomasse, le nombre d'épis par plante et par m<sup>2</sup> à la récolte sont les caractères les plus touchés par le stress hydrique modéré (anthèse) et sévère avec des réductions au niveau du premier traitement (stress à l'anthèse) de 7,06 %, 6,75 %, 5,29 %, 4,29 % et 4,28 % en 1991 respectivement et de

7,44 %, 5,78 %, 6,93 %, 5,68 % pour le rendement en grain, le nombre de grains/épi, le nombre de grains/m<sup>2</sup>, et la biomasse à la récolte respectivement en 1992 ; au niveau du stress sévère (stade gonflement), les réductions sont beaucoup plus importantes avec 29,17 %, 14,32 %, 17,44 %, 14,22 % et 18,56 % respectivement pour le rendement en grain, le nombre de grains/épi, le nombre de grains/m<sup>2</sup>, le poids de 1000 grains et la biomasse aérienne à la récolte. Les résultats d'Isanloo *et al.* (2008) montrent que le nombre de grains/épi et le taux de régression des talles sont les composantes majeures affectées par le stress hydrique, ceux de Rajala *et al.* (2009) confirment que le déficit hydrique avant la pollinisation réduit fortement le nombre de fleurs fertiles et de grains, tandis qu'un stress terminal réduit le nombre de grains par épi. Dans les travaux de Hanifi- Mekliche *et al.* (2011), le nombre de grains et le rendement en paille expliquent 31,36 % et 34,91 % de la variabilité du rendement en grain de l'orge dans les conditions pluviales (stress terminal) alors que dans les conditions irriguées ces caractères n'expliquent que 4 % et 9 % respectivement. Selon Debaek *et al.* (1996), le rendement en grain est plus lié à la fertilité de l'épi qu'à la taille du grain. Il ressort que le nombre de grains et le rendement en paille sont les caractères qui déterminent le plus le rendement dans les conditions de stress hydrique. Les résultats de Ben Naceur *et al.* (1999) montrent que le stress hydrique au stade gonflement induit une diminution systématique du poids des grains de 58 % et le rendement final est réduit de 73 et 58 % dans le cas où la sécheresse intervient aux stades gonflement et anthèse respectivement. Selon ces auteurs, les conséquences d'un stress hydrique intervenant au stade gonflement sont plus néfastes car pendant cette période l'épi est déjà formé mais les organes floraux peuvent être sérieusement endommagés ce qui donne des épis dont la base et le sommet sont stériles.

Selon Zhang *et al.* (2010), avec l'augmentation de la teneur en eau relative du sol, une grande quantité de matière sèche accumulée avant l'anthèse était redistribuée, et le taux de redistribution était élevé. Selon ces auteurs, beaucoup de matière sèche accumulée après l'anthèse était conservée dans les organes végétatifs jusqu'à leur translocation vers les grains. La translocation des assimilats est toujours plus importante que la remobilisation dans nos expériences. Nos résultats sont en accord avec ceux de Mazoni *et al.* (2007) qui trouvent que les carbohydrates du grain, originaire des photosynthétats produits pendant son remplissage (remobilisation), n'atteint pas les 30 %.

Nos résultats montrent que la translocation diminue dans les conditions de stress hydrique au profit de la remobilisation des assimilats à partir des tiges. Les résultats de Beheshti et Behboodi fard (2010) montrent que le stress hydrique augmente significativement la quantité de matière sèche remobilisée, l'efficacité de la remobilisation et le pourcentage de la remobilisation de 11,21 %, 32,37 % et 14,20 %, respectivement, comparé à la condition d'absence de stress de tous les génotypes de sorgho étudiés. Nos résultats montrent, en effet, une remobilisation plus importante dans les conditions de stress hydrique. Une variation génétique pour la remobilisation et la translocation chez les variétés étudiées a été constatée en 1991 tandis qu'en 1992 toutes les variétés se sont comportées de la même façon. En effet, les variétés Festival et Beauchamps (en 1991) sont celles qui remobilisent le moins et pour lesquelles la translocation est plus importante. Selon Acreche et Slafer (2009), quoique l'activité photosynthétique diminue rapidement pendant le remplissage du grain, jusqu'à un certain degré, mais les feuilles et les tiges restent encore actives pour le prélèvement de l'azote et la photosynthèse après l'anthèse (Masoni *et al.*, 2007). Selon ces auteurs, 73 à 82 % de l'azote et 56 – 63 % du phosphore du grain proviennent de la remobilisation.

Les effets génétiques sont plus élevés que les effets des régimes hydriques pour la teneur en eau relative de base (1991), tandis qu'en 1992 ce sont les effets régimes hydriques qui sont supérieurs aux effets génétiques ceci est dû au fait qu'en 1991, le nombre de variétés étudiées (6) était supérieur à celui de 1992 (4) et le nombre de régimes hydriques n'étaient que de deux en 1991 alors qu'en 1992 il était de trois.

Pour la teneur en eau relative midi solaire, ce sont les effets régimes hydriques qui sont les plus importants. Le stress hydrique a provoqué une diminution de la teneur en eau relative de base et midi solaire.

Pour le potentiel hydrique foliaire de base et midi solaire, Les effets régimes hydriques expliquent plus la variation détectée. **Le stress hydrique a provoqué une augmentation du potentiel hydrique foliaire de base et midi solaire, cette augmentation est plus importante dans le traitement R2 (stress hydrique sévère).** Ben Naceur *et al.* (1999) montre, dans leur étude sur l'effet d'un déficit hydrique survenant aux stades

gonflement et anthèse, que le potentiel hydrique foliaire optimum est de -0,8 MPa et une humidité du sol de 18 % dans les parcelles témoins, tandis que dans les parcelles ayant subi le stress hydrique aux stades gonflement et anthèse le potentiel hydrique foliaire et l'humidité du sol étaient respectivement de -2,2 MPa et 12 %. Les conséquences d'un stress hydrique intervenant au stade gonflement sont plus néfastes car pendant cette période l'épi est déjà formé mais les organes floraux peuvent être sérieusement endommagés.

L'étude des corrélations entre les caractères montrent que le rendement en grain est principalement corrélé, en 1991 à la matière sèche des épis à la floraison et pour les deux années à la biomasse à la récolte, au nombre de grains/m<sup>2</sup>, à l'indice de récolte, au nombre de grains/épi, à NDVI et au LAI. Selon Schulze (1986), la production de biomasse est une fonction du métabolisme du carbone, de l'eau et de la répartition du flux d'éléments nutritifs. Les corrélations entre d'une part le nombre de grains/m<sup>2</sup> et d'autre part la matière sèche des épis à la floraison(en 1991) et NDVI (1991 et 1992) sont aussi élevées. L'importance de NDVI dans la réalisation du rendement s'explique, surtout dans les conditions de stress hydrique, par l'importance de la surface foliaire (lieu de la photosynthèse) qui absorbe les rayonnements. Ce résultat est confirmé par la forte corrélation entre NDVI et LAI. Les travaux de Balaghi *et al.* (2008) montrent que la somme de NDVI est de loin la variable explicative la plus importante spécialement dans les conditions pluviales. Pour ces auteurs, la variabilité de la somme de NDVI explique 69,4 % de la production totale. Les plus faibles valeurs des coefficients de corrélation en 1991 sont dues à une plus faible intensité de stress hydrique (stress hydrique appliqué uniquement de l'anthèse à la maturité) comparé à celui de 1992 (stress hydrique appliqué uniquement de l'anthèse à la maturité et stress hydrique appliqué de la méiose à la maturité).

Certaines corrélations sont communes aux deux régimes hydriques. Le stress hydrique modifie les liaisons entre les caractères et provoque des ruptures de corrélations, c'est le cas des corrélations significatives uniquement au niveau du régime hydrique ETM, et établissement de nouvelles corrélations au niveau du régime hydrique R2 et R1. Nos résultats sont en accord avec ceux de Hanifi-Mekliche *et al.* (2011).

La variabilité du rendement en grain, du nombre de grains/m<sup>2</sup> et du poids de 1000 grains est expliquée par la variabilité de NDVI (figure 48). 51,55 %, 27,88 %, 4,12 % (ns), 4,97 % (ns) (1991) et 75 %, 44,36 %, 20,16 % et 11,36 % (1992) de la variabilité du rendement en grain, du nombre de grains/m<sup>2</sup> et du poids de 1000 grains et nombre de grains/épi respectivement sont expliqués par la variabilité de NDVI. Nos résultats confirment ceux rapportés par Balaghi *et al.* (2008). Gutiérrez-Rodriguez *et al.*, (2004) montrent que NDVI a une plus grande association avec le rendement en grain dans les conditions de sécheresse.

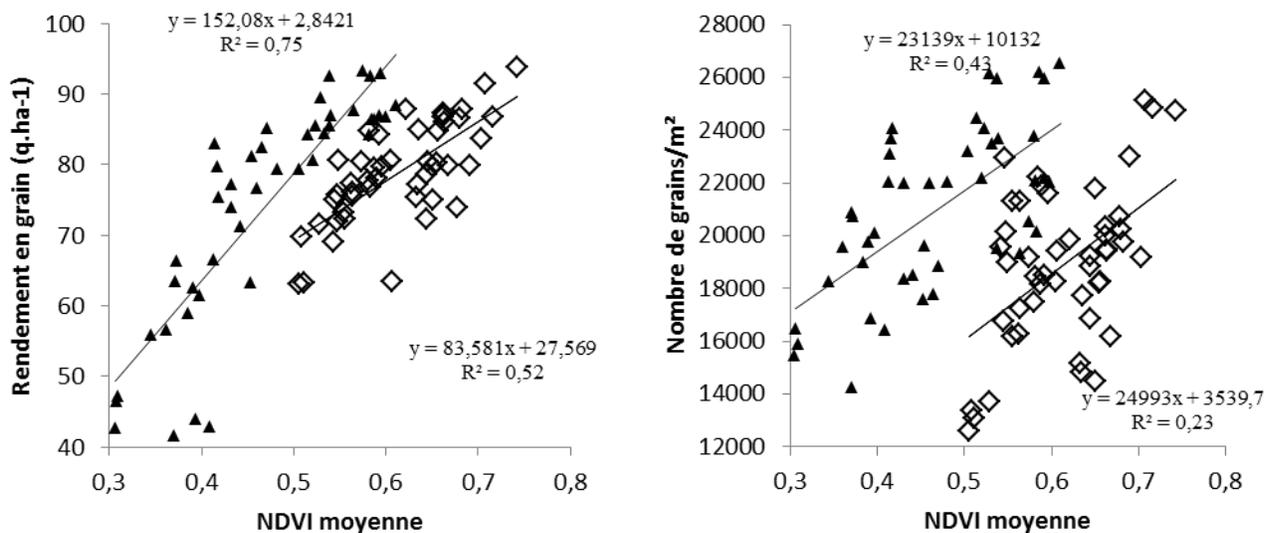


Figure 48. A: Relations entre d'une part NDVI moyenne et d'autre part le rendement en grain et le nombre de grains/m<sup>2</sup>  
 □: 1991, ▲: 1992

Le rendement en grain peut être prédit en utilisant une régression simple avec NDVI (Lobos *et al.*, 2014). Dans les traitements irrigués, les plantes restent plus longtemps vertes que dans les conditions de stress, nos résultats sont en accord avec ceux de Bányai *et al.*, (2012). En effet, le NDVI est basé sur la végétation verte absorbant les radiations solaires dans les bandes spectrales par la chlorophylle, le stress hydrique provoque une diminution de la surface photosynthétique et par conséquent une diminution du NDVI.

## **PARTIE II : INTERACTION GENOTYPE X ENVIRONNEMENT**

Ne possédant pas de serre mobile à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (Alger) pour étudier l'effet du stress hydrique en Algérie, nous avons travaillé sur les données de trois essais réalisés à l'E.N.S.A. durant trois années successives (2005/2006, 2006/2007 et 2007/2008) par trois étudiants (Mihoub I., Bouraïne S. et Mohamed Yahiaoui L.) dans le cadre de leur mémoire d'ingénieur et Dahlia F dans le cadre de son magister. Ces données nous ont permis d'étudier l'effet du milieu sur l'expression du rendement et de différents caractères agronomiques de 17 géotypes créés dans le cadre de différents projets CNEPRU.

### **BIBLIOGRAPHIE**

#### **1- Importance de la céréaliculture en Algérie et effet des conditions climatiques**

La céréaliculture est pratiquée sur l'ensemble du territoire national. Elle occupe environ 80 % de la surface agricole du pays (Talamali, 2004). Le blé dur représente 43 % de la sole céréalière (MADR, 2006). La production nationale se caractérise par une variabilité interannuelle très importante (ITGC, 1999). Les données de FAOSTAT ont été utilisées pour réaliser l'évolution des productions et des rendements des blés dur et tendre (figure 1). On remarque une tendance à l'augmentation des rendements pour les quatre dernières années (2009 à 2012) (figure 1), cependant les rendements restent encore faibles. Cette variation est due principalement aux conditions climatiques.

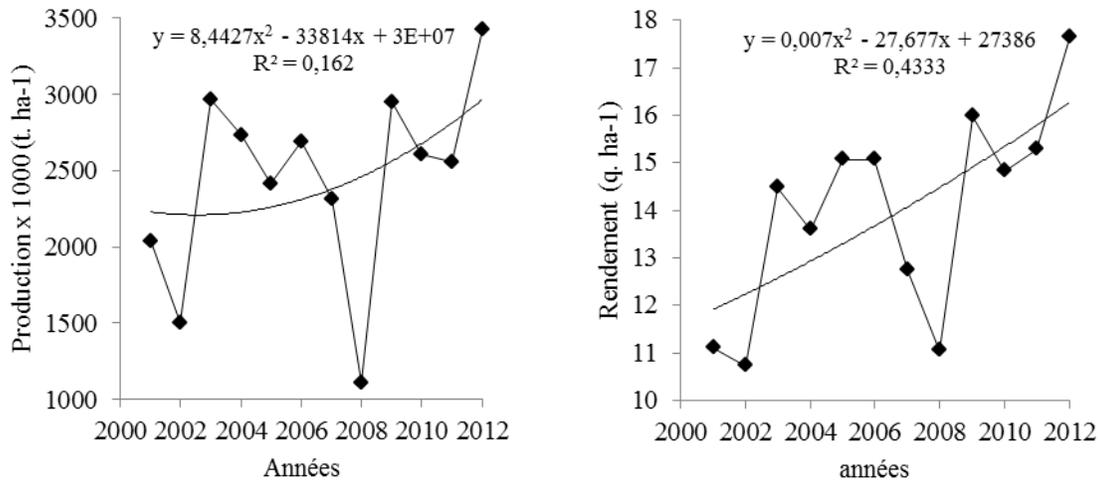


Figure 1. Productions et rendements des blés (*Triticum durum* Desf. et *Triticum aestivum* L.).

Sources : [faostat.org/site/291/default.aspx](http://faostat.org/site/291/default.aspx)

## 2. Possibilités d'amélioration du rendement

L'augmentation des rendements du blé dur peut se faire par des techniques culturales appropriées, mais aussi par la recherche de génotypes performants et adaptés aux différents milieux de culture. L'étude de la diversité agro-morphologique permet de caractériser les génotypes étudiés et d'analyser la relation qui peut exister entre les différents caractères et le rendement en grain, ce dernier étant de nature complexe (Li et Gill, 2004) et ayant une faible héritabilité (Gallais, 1990).

## 3. Effet de l'interaction génotype × environnement

Un cultivar désirable est celui qui n'a pas seulement un bon rendement dans la zone de sélection initiale, mais aussi qui maintient une aptitude de rendement élevée dans une large gamme de milieux (Yahaya *et al.*, 2005). Le phénotype d'un individu est déterminé par son génotype et le milieu dans lequel il se développe, ces deux effets ne sont pas toujours additifs ce qui indique la présence d'une interaction génotype × environnement. Cette interaction est la cause principale des différences entre les génotypes dans leur stabilité du rendement (Benbelkacem et Kellou, 2000). Elle peut être définie comme un changement dans la performance relative de deux ou plusieurs génotypes mesurés dans

deux ou plusieurs environnements (Bowman, 1972). Selon cet auteur, les interactions peuvent impliquer un changement de classement des génotypes entre les environnements et/ou un changement d'amplitude absolue et relative des variances génétiques, environnementales et phénotypiques entre les environnements. Ces deux formes d'interaction ont été définies par Peto (1982) cité par Alberts (2004) comme étant des interactions qualitative (changement de classement) et quantitative (changement d'amplitude entre génotypes). Le changement d'amplitude entre génotypes ne peut pas affecter le choix du sélectionneur car le classement reste le même quel que soit le milieu ; par contre les interactions qualitatives impliquent une étude plus fine pouvant aboutir à une sélection de génotypes selon leur adaptation à un environnement donné. Cette adaptation peut être large, il s'ensuit alors une utilisation des génotypes ayant cette caractéristique dans des zones différenciées sans distinction ou spécifique à un milieu et dans ce cas les génotypes ne peuvent être cultivés que dans ce milieu. Une adaptation large est plus intéressante pour le sélectionneur car ce dernier verra son travail de sélection de génotypes et de multiplication de semences simplifié.

#### **4. Méthodes de mesure de la stabilité**

La mesure de la stabilité relative du rendement des variétés de blé dur dans différents milieux est essentielle pour déterminer si les génotypes étudiés ont une adaptation large ou étroite (Akçura *et al.*, 2009). Les essais multi-locaux ou pluri annuels jouent un rôle important dans la sélection de plantes et la recherche agronomique. Plusieurs méthodes d'étude ont été développées pour estimer la stabilité et l'adaptation des génotypes.

Selon Lin *et al.* (1986), Les stabilités statistiques se divisent en quatre groupes selon qu'elles soient basées sur les déviations de l'effet génotype moyen (DG) ou sur le terme de l'interaction génotype  $\times$  environnement, et si ou non un modèle de régression est incorporé sur un index environnemental. Ces groupes sont reliés à trois concepts, un génotype peut être considéré comme stable si :

- (i) sa variance environnementale est petite,

(ii) si sa réponse aux environnements est parallèle à la réponse moyenne de tous les génotypes dans l'essai, ou

(iii) si le carré moyen de la résiduelle à partir du modèle de la régression sur l'index environnemental est petit.

Cet auteur donne un résumé des équations utilisées par différents auteurs, le groupe et le type de concept de stabilité (tableau 1).

Tableau 1. Résumé des équations pour les neuf stabilités statistiques

Groupe	type	Equations	Auteurs ou utilisateurs
A	1	$S_i^2 = \sum_{j=1}^q \frac{(X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{(q-1)}$	Francis et Kannenberg (1978)
		$CV_i = \frac{S_i}{\bar{X}_i} 100$	
B	2	$\theta_i = \frac{p}{2(p-1)(q-1)} \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_{.j} + \bar{X}_{..})^2 + \frac{SS(GE)^*}{2(p-1)(q-1)}$	Plaisted et Peterson (1959)
		$\theta_{(i)} = \frac{-p}{(p-1)(p-2)(q-1)} \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_{.j} + \bar{X}_{..})^2 + \left( \frac{SS(GE)}{(p-2)(q-1)} \right)$	Plaisted (1960)
		$W_i^2 = \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_{.j} + \bar{X}_{..})^2$	Wricke (1962)
		$\sigma_i^2 = \frac{p}{(p-2)(q-1)} \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_{.j} + \bar{X}_{..})^2 - \frac{SS(GE)}{(p-1)(p-2)(q-1)}$	Shukla (1972 a)
C	2	$b_i = \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i)(\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..}) / \sum_{j=1}^q (\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..})^2$	Finlay et Wilkinson (1963)
		$\beta_i = \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_{.j} + \bar{X}_{..})(\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..}) / \sum_{j=1}^q (\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..})^2$	Perkins et Jinks (1968)
D	3	$\delta_i^2 = \frac{1}{q-2} \left[ \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 - \beta_i^2 \sum_{j=1}^q (\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..})^2 \right]$	Eberhart et Russel (1966)
		$\delta_i^2 = \frac{1}{(q-2)} \left( \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_{.j} + \bar{X}_{..})^2 - \beta_i^2 \sum_{j=1}^q (\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..})^2 \right)$	Perkins et Jinks (1968)

$$* SS(GE) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (X_{ij} - \bar{X}_{i.} - \bar{X}_{.j} + \bar{X}_{..})^2$$

Groupe A : DG et SCE, Groupe B : GE et SCE, Groupe C : DG ou GE et coefficient de régression, Groupe D : DG ou GE et déviation de la régression

Où : DG = déviations de l'effet génotype moyen

SCE = Somme des carrés des écarts

GE = interaction génotype × environnement

Sources : Lin *et al.* (1986)

Les plus largement utilisées sont la régression jointe incluant le coefficient de régression (*bi*) (Finlay et Wilkinson, 1963) et la variance des déviations à partir de la régression ( $S^2di$ ) (Eberhart et Russel, 1966), l'écovalence de Wricke (*Wi*) (Wricke, 1962), la variance de la stabilité de Shukla ( $\sigma_i^2$ ) (Shukla, 1972), la variance de l'hétérogénéité des environnements (% *HV*) et les corrélations incomplètes (% *IC*) (Muir *et al.*, 1992).

#### *Variance de l'hétérogénéité des environnements et corrélations incomplètes*

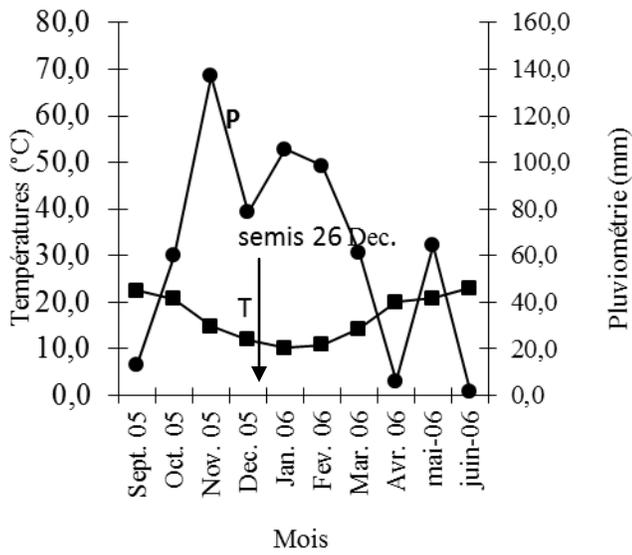
La somme des carrés des écarts de l'interaction génotype × environnement peut être subdivisée en deux composantes : une due à l'hétérogénéité des variances parmi les environnements et une due au manque de corrélations parfaite du même caractère mesuré dans deux environnements (Muir *et al.*, 1992).

L'objectif de cette étude était (i) d'examiner les effets génotypes, environnement et leur interaction sur le rendement en grain et les caractères agro-morphologiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.), (ii) de déterminer les meilleurs génotypes ayant un rendement en grain et une stabilité élevés, (iii) d'évaluer le niveau d'association entre les différents caractères étudiés, entre d'une part le rendement et d'autre part la pluviométrie et la température et entre les différents paramètres de stabilité.

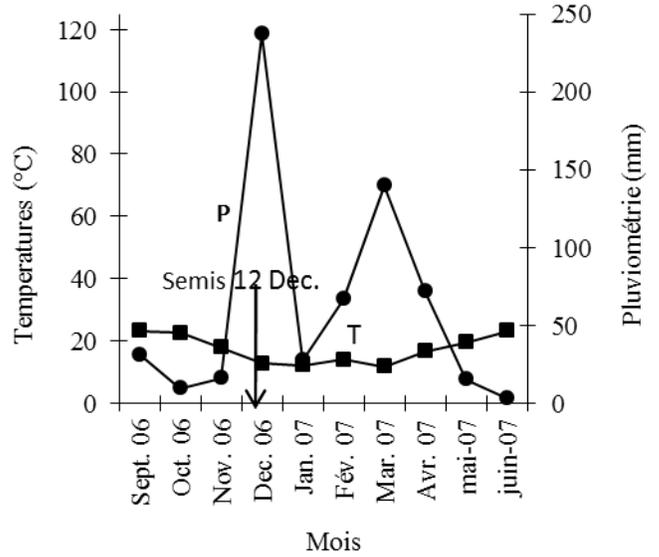
# MATERIEL ET METHODES

## 1. Matériel végétal et localisation de l'expérimentation

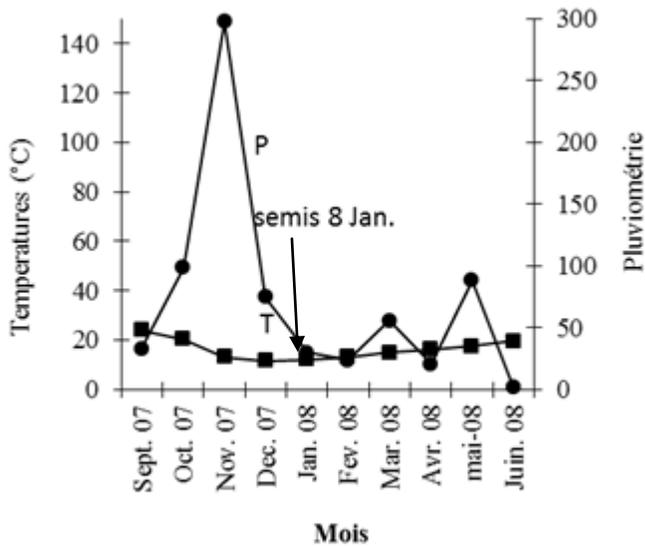
Dix-sept génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) incluant cinq variétés parentales et douze lignées (tableau 1), résultant de croisements entre elles, étaient testés à l'Ecole Nationale Supérieures Agronomique d'Alger (ENSA, Wilaya d'Alger, Nord de l'Algérie) durant les campagnes agricoles 2005/2006 (Bouraine, 2006), 2006/2007 (Mihoub, 2007) et 2007/2008 (Mohamed Yahoui, 2008). L'ENSA est située à une altitude de 48 m, une latitude de 36° 43' Nord et une longitude de 3° 08'. Alger est caractérisé par un climat méditerranéen (hiver doux et humide, été chaud et sec) avec une pluviométrie annuelle moyenne de 600 mm et des risques de sirocco réduits. Cependant, la distribution de la pluviométrie est irrégulière (figure 1). En 2005-2006, la pluviométrie est bien répartie à partir de Novembre à l'exception du mois d'avril où il n'a plu que 6,5 mm ; en 2006-2007, il n'a plu que 27,4 mm en janvier et en 2007-2008, la répartition a été très mauvaise avec 297 mm, 29,7, 23,8 et 29,5 mm respectivement en janvier, février et avril (figure 1).



a) ENSA 2005-2006; Pluviométrie = 627 mm



b) ENSA 2006-2007; Pluviométrie = 618 mm



c) ENSA 2007-2008; Pluviométrie = 724.1 mm

Figure 2. Températures et pluviométrie des différentes campagnes agricoles. T = température; R = Pluviométrie

## 2. Dispositif expérimental

Chaque essai est considéré comme étant un environnement différent du point de vue climat (quantité et répartition de la pluviométrie différentes) et apport d'engrais (quantité NPK).

Tableau 2. Génotypes et origine des variétés parentales.

Ardente (France)	Ardente/Waha L1	Saadi/Waha L6	Vitron (Espagne)
Ardente/Saadi L3	Ardente/Waha L2	Saadi/Waha L7	Waha (ICARDA, Syrie)
Ardente/Siméto L1	Saadi (Maroc)	Siméto (Italie)	
Ardente/Siméto L4	Saadi/Siméto L3	Siméto/Vitron L5	
Ardente/Vitron L1	Saadi/Waha L3	Siméto/Vitron L6	

Les trois essais sont menés selon un dispositif bloc aléatoire complet avec trois répétitions (3 blocs). Pour l'ensemble des essais, la distance entre les blocs est de 1 m et entre les parcelles élémentaires de 0,5 m. Les génotypes ont été semés sur six lignes de 3 m espacées de 0.20 m. La densité de semis est de 70 grains/m linéaire soit 350 grains/m<sup>2</sup>. Les engrais utilisés sont le triple superphosphate (0-46-0) avant le semis dans chaque essai à une dose de 95 unités/ha, de l'agripotash à une dose de 1,44 U/ha de potassium sous forme foliaire et l'urée (35 %) à une dose de 95 U/ha d'azote fractionné en deux apports (1/2 au tallage et 1/2 à la montaison).

## 3. caractères étudiés

Les caractères étudiés sont la hauteur de la tige (HT), la longueur du col de l'épi (LCE), la longueur de l'épi (LE), la longueur des barbes (LB), le nombre total d'épillets par épi (NTE), le nombre d'épillets fertiles (NEF), le nombre de grains par épi (NGE), le poids de mille grains (PMG), la précocité à l'épiaison (EP), la précocité à la floraison (FLO), l'indice de récolte (IR), et le rendement en grain parcellaire (RDT). Les mesures ont été réalisées sur toutes les plantes d'un échantillon d'un mètre carré pour la mesure du rendement en grain, de ses composantes et des caractères morphologiques à l'exception du nombre de jours nécessaires à l'épiaison et à la floraison, qui ont été notés

lorsque 50 % des épis de la parcelle sont sortis pour la précocité à l'épiaison et sont arrivées au stade floraison pour le second caractère. La hauteur de la tige a été mesurée de la surface du sol jusqu'à la base de l'épi, tandis que la longueur de l'épi a été mesurée de la base de l'épi jusqu'au sommet de l'épi (barbes non comprises).

#### 4. Traitement des données

Une analyse de la variance bloc aléatoire complet a d'abord été réalisée au niveau de chaque essai séparément (données non montrées). Pour l'étude de l'interaction génotype  $\times$  environnement, une analyse de la variance selon le modèle 4 où les effets génotypes et lieux sont fixés (Annicchiarico, 2002) a été réalisé. Ce modèle est utilisé pour la signification des différentes sources de variation. Il s'agit d'un modèle à trois facteurs qui sont : le génotype (G), le lieu (L) et le bloc (B).

Où:

Le calcul des composantes de la variance a été effectué selon le modèle 1 et l'analyse de la variance Hardwick et Wood (1972) pour l'étude de l'adaptation de Finlay et Wilkinson (1963) a été réalisée en utilisant le programme « GEST » du Dr. UKAI (2000), basé sur le modèle d'Eberhart et Russel (1966).

La stabilité des génotypes peut être jugée à partir de l'étude des composantes de l'interaction génotypes  $\times$  environnements (Eberhart et Russel, 1966). Le principe de cette méthode est l'utilisation de la régression linéaire jointe où le rendement en grain est régressé sur le rendement moyen environnemental. Selon Eberhart et Russel (1966), la performance d'un génotype est généralement décomposée en environnements (linéaire), génotypes  $\times$  environnements (linéaire) et déviation du modèle de régression. La moyenne, le coefficient de régression ( $bi$ ) et la déviation ( $S^2_{di}$ ) à partir de la régression sont les éléments qui caractérisent chaque génotype.

La signification du coefficient de régression linéaire entre l'index du milieu<sup>1</sup> et la valeur moyenne de chacun des génotypes pour le rendement en grain a été vérifiée à l'aide du test de Student. Les limites de confiance ont été calculées pour déterminer

---

<sup>1</sup> Il s'agit de la moyenne de tous les génotypes dans un milieu donnée.

l'égalité ou non du coefficient de régression avec l'unité. L'écovalence, la stabilité des variances et l'hétérogénéité des variances (Muir, 1992) ont été également réalisés en utilisant le programme Gest. Selon Emebiri *et al.*, (2005), la somme des carré des écarts de l'interaction génotype  $\times$  milieu peut être divisée en deux composantes : une due à l'hétérogénéité des variances à travers les environnements et une due aux corrélations incomplètes d'un même essai mené dans deux environnements.

Des coefficients de corrélations entre les différents caractères étudiés et entre les différents paramètres de stabilité et entre le rendement en grain d'une part et d'autre part la pluviométrie et la température moyenne mensuelle ont été calculés et leur signification a été déterminée en utilisant la table de Fisher et Yates (1963).

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### **1. Etude de la diversité agro-morphologique des génotypes**

#### 1.1. Analyse des essais

L'analyse de la variance de chaque essai a d'abord été réalisée séparément pour l'ensemble des caractères étudiés. Celle-ci indique un effet génotypes significatif pour l'ensemble des caractères, suggérant que des différences de performances existent entre les génotypes testés. Le classement des génotypes change d'un essai à l'autre suggérant la présence d'une interaction génotypes  $\times$  milieux (données non montrées).

#### 1.2. Analyse des différents effets pour les différents caractères

L'analyse combinée de la variance (tableau 3) montre des effets génotypes, environnements et interaction génotypes  $\times$  environnements très hautement significatif ( $P < 0,001$ ) pour l'ensemble des caractères étudiés. Cette étude montre donc une diversité agro-morphologique des génotypes. L'existence de l'interaction génotypes  $\times$  environnements signifie que selon le milieu l'ensemble des gènes d'un génotype ne s'exprime pas de la même façon (Gallais, 1990). Certains génotypes sont plus stables que d'autres. Selon cet auteur, cette situation complique le travail du sélectionneur qui recherche, dans le cas du rendement en grain, une stabilité élevée lui permettant de diminuer le nombre de variétés à sélectionner.

Les effets interaction géotypes × environnements expliquent plus la variation des différents caractères que les effets génétiques et environnements à l'exception de la longueur de l'épi où les effets environnements sont supérieurs aux effets génétiques et interaction géotypes × environnements.

Les coefficients de variation de l'erreur (tableau 3) sont faibles pour la floraison (3,42 %), l'épiaison (3,67 %), la longueur de l'épi (5,73 %), la hauteur de la tige (5,87 %), le nombre total d'épillets par épi (6,39 %), le poids de mille grains (7.98 %), longueur du col de l'épi (8.51 %) et la longueur des barbes (8.70 %) ; moyen pour le nombre de grains/épi (12,70 %), et élevés pour le nombre d'épillets fertiles par épi (20,09 %), le rendement en grain (21,51 %) et l'indice de récolte (23,51 %) Pour ces derniers caractères, il y a une forte hétérogénéité.

Le classement des moyennes des différents caractères sont données dans les tableaux 1 et 2 de l'annexe 2.

Selon Benbelkacem et Kellou (2000), le rendement en grain ne peut pas nous renseigner sur les mécanismes mis en œuvre pour son obtention. Il faut pour cela analyser le comportement des différentes composantes qui le forment et les relations possibles pouvant exister entre ces composantes et le rendement en grain. Nos résultats (tableau 3) montrent que les géotypes ayant les rendements en grain parcellaire les plus élevés sont ceux qui présentent, un nombre de grains/épi (0,426), un poids de 1000 grains ( $r = 0,448$ ) un nombre d'épillets fertiles par épi (0,398), un nombre total d'épillets par épi (0,376), une longueur de l'épi (0,363), une floraison (0,340), une longueur du col de l'épi (0,339) et une épiaison tardive (0,334) (tableau 2).

Tableau 3. Carrés moyens, degrés de liberté et signification des différentes sources de variation pour les différents caractères étudiés.

Caractères	Génotype (G) (ddl = 16)		Environnement (E) (ddl = 2)		intéraction G x E (ddl = 32)		Erreur (ddl = 132)	CV (%)
	CM	%	CM	%	CM	%	CM	
Hauteur de la tige	154,30***	34,68	653,30***	3,66	1,90***	61,66	19,01	5,87
Longueur du col de l'épi	18,71***	22,53	290,51***	43,72	4,52***	10,89	2,30	8,51
Longueur de l'épi	1,74***	29,05	2,56***	13,38	0,33***	57,57	0,15	5,73
Longueur des barbes (cm)	7,32***	10,32	57,81***	1,90	2,55***	87,78	0,96	8,70
Nombre Total d'épillets/épi	20,56***	10,89	40,94***	12,95	2,45***	76,17	1,35	6,39
nombre d'épillets fertiles	9,84 ns	4,11	67,78**	2,72	16,48*	93,17	10,85	20,09
Nombre de grains/épi	271,70***	4,64	630,20***	4,27	63,00***	90,09	33,40	12,70
Epiaison (jours)	117,00***	11,63	3141,00***	8,72	34,00***	79,65	13,29	3,67
Floraison (jours)	60,00***	17,86	4557,00***	21,94	38,00***	60,20	12,94	3,42
Indice de récolte	0,34***	22,12	0,399***	17,08	0,016***	60,81	0,0078	23,51
Poids de 1000 grains	74,70***	16,51	3828,50***	9,88	31,90***	73,61	17,92	7,98
Rendement en grain	486,60***	34,03	8582,80***	3,63	429,00***	62,34	213,4	21,51

\*, \*\*, \*\*\* significatif à  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$  et  $P < 0,001$  respectivement ; ns = non significatif.

Selon Grignac (1981), en conditions méditerranéennes, les deux composantes les plus déterminantes dans la formation du rendement chez cette espèce sont le nombre de grains par épi et le poids de mille grains. L'amélioration du nombre de grains par épi est liée à l'amélioration du nombre total d'épillets des épillets ( $r = 0,548$ ), de la longueur des barbes ( $r = 0,507$ ), de la hauteur de la tige ( $r = 0,219$ ) et de la tardiveté à l'épiaison ( $r = 0,242$ ) (tableau 4). Cependant, l'augmentation de la tardiveté dans les zones présentant des gelées tardives et une sécheresse précoce est néfaste à l'amélioration du rendement en grain telles que les hautes plaines algérienne. Par conséquent, ce caractère doit être

amélioré en prenant en compte la zone dans laquelle la ou les variétés vont être cultivées. De plus, l'augmentation de la hauteur de la tige au-delà d'une certaine valeur peut provoquer une sensibilité à la verse.

Tableau 4. Corrélations entre les différents caractères et entre les paramètres de stabilité

Corrélations entre les caractères (ddl = 151)				Corrélations entre les paramètres de stabilité (ddl = 15)	
RDT-PMG	0,448***	NBRGR-LB	0,507***	$b_i - R_{ij}^2$	0,774***
RDT-NBRGR	0,426***	PMG-LCE	0,365***	$b_i - \%HV$	0,718**
RDT-NTE	0,376***	PMG-LB	0,366***	$b_i - \sigma_i^2$	0,630**
RDT-NEF	0,294***	PMG-EP	0,469***	$b_i - w_i$	0,630**
RDT-LE	0,363***	PMG-FLO	0,540***	$w_i - \%HV$	0,979***
RDT-EP	0,334***	NBRGR-EP	0,242**	$w_i - \%IC$	0,618**
RDT-FLO	0,340***	PMG-NTE	0,262**	$\sigma_i^2 - \%HV$	0,930***
RDT-LCE	0,339***	NBRGR-HP	0,219*	$\sigma_i^2 - \%IC$	0,618**
NBRGR- NTE	0,548***				

RDT = Rendement en grain, NBRGR = nombre de grains/épi, NTE = Nombre total d'épillet/épi, NEF = Nombre d'épillet fertiles, LE = longueur de l'épi, EP = épiaison, FLO = Floraison, LCE = longueur du dernier entre-nœud, LB = longueur des barbes, HP= hauteur de la tige, \*, \*\*, \*\*\* significatif à  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$  et  $P < 0,001$  respectivement.

L'étude des corrélations entre d'une part le rendement en grain et d'autre part la pluviométrie et la température a montré que seules la pluviométrie et la température moyenne du mois de février sont corrélées avec le rendement moyen des différents génotypes ( $r = 0,99^*$ ). Au niveau des génotypes, seuls Ardente, Ardente/Siméto L1, Ardente/Waha L1, Ardente/Siméto L1 et Vitron ont montré une corrélation significative avec la pluviométrie ( $r = 0,99^*$ ). Hanifi-Mekliche *et al.* (2011) ont aussi trouvé une

corrélation entre la quantité d'eau d'une part et d'autre part le nombre de grains et le rendement en grain significative ( $p < 0,05$  à  $p < 0,001$ ) chez 12 génotypes d'orge sur les 19 étudiés pour le nombre de grains et dans 4 cas sur 19 ( $p < 0,05$  à  $p < 0,01$ ) pour le rendement en grain. Pour ces auteurs, l'orge est particulièrement affectée par le milieu, des pourcentages de variation expliqués par le milieu particulièrement élevés (allant de 62,52 % à 32,03 %) ont été trouvés au niveau des caractères hauteur de la tige, l'épiaison le nombre de d'épis/plante, le rendement en grain, grains/épi, le poids de 1000 grains et l'indice de récolte. Selon Balaghi *et al.* (2008), la pluviométrie et la température sont les variables explicatives les plus importantes dans les zones arides. Nos essais ayant été réalisés à Alger qui est une zone subhumide explique le faible nombre de génotypes présentant des corrélations significatives. Cette signification montre l'importance de la quantité d'eau reçue et de la température moyenne pendant le mois de Février correspondant à la mise en place des organes reproducteurs. Selon Devendra *et al.* (1983), la surface foliaire, au stade précoce GS1 (tallage), est corrélée au rendement en grain du riz. En effet, l'eau et la température moyenne à ce stade permettent une meilleure croissance de la plante et une plus grande surface photosynthétique.

## **2. Etude de l'interaction génotype × environnement du rendement en grain**

L'interaction génotypes × environnements (linéaire) est très hautement significative indiquant qu'il y a des différences entre les coefficients de régression (tableau 4). Le carré moyen dû à la déviation groupée à partir de la régression (non linéarité) est très hautement significatif montrant ainsi l'instabilité de la performance de certains génotypes à travers les environnements (tableau 5). La variation du rendement sous l'effet du milieu peut s'expliquer en grande partie par le fait que la compensation entre différentes composantes n'est pas totale (Triboi, 1987).

Tableau 5. Analyse de la variance de Finlay-Wilkinson pour stabilité du rendement en grain parcellaire (q.ha<sup>-1</sup>)

Source de variation	ddl	CM	% de variation de la SCE en fonction de la SCE total
Génotypes (G)	16	162,20***	16,50
Environnements (E)	2	2860,98***	36,37
Interaction G X E	32	143,00***	29,09
Hétérogénéité (linéarité)	16	197,69***	20,11
Résiduelle	16	88,31***	8,98
Erreur groupée	132	21,51	

Tableau 6. Moyennes du rendement en grain de chaque génotype et chaque année

Génotypes	Années			
	2005-2006	2006/2007	2007/2008	moyennes
1 Ardente	115,17	<b>78,91</b>	<b>47,64</b>	80,57
4 Ardente/Saadi L3	79,17	<b>49,27</b>	59,33	62,59
7 Ardente/Siméto L1	86,17	68,19	49,82	68,06
9 Ardente/Siméto L4	69,79	70,14	59,44	66,46
10 Ardente/Vitron L1	80,54	68,71	62,42	70,56
13 Ardente/Waha L1	101,58	88,06	60,11	<b>83,25</b>
14 Ardente/Waha L2	<b>118,53<sup>3</sup></b>	64,05	45,67	76,08
17 Saadi	82,17	56,16	52,14	63,49
19 Saadi/Siméto L3	<b>56,25</b>	54,02	61,28	<b>57,18</b>
29 Saadi/Waha L3	59,84	71,56	45,11	58,84
31 Saadi/Waha L6	73,52	54,08	51,25	59,62
32 Saadi/Waha L7	67,34	73,57	58,50	66,47
34 Siméto	90,78	68,10	<b>64,00</b>	74,29
39 Siméto/Vitron L5	76,38	77,52	61,08	71,66
40 Siméto/Vitron L6	73,06	68,69	55,31	65,69
49 Vitron	79,44	64,42	51,39	65,09
51 Waha	65,79	78,59	49,97	64,79

<sup>3</sup> en gras valeurs extrêmes.

Les coefficients de détermination ( $R^2_{ij}$ ) entre la moyenne des géotypes et l'index environnemental varient de 0,008 à 0,926 (tableau 7). Ces coefficients confirment l'effet de l'environnement sur le comportement des différents géotypes.

Les valeurs de la pente de la droite de régression varient de -0,193 à 2,810 (tableau 6). L'analyse de l'écovalence ( $W_i$ ) et de la stabilité des variances ( $\sigma^2_i$ ) (tableau 6) montrent que Vitron ( $W_i = 2,81$  et  $\sigma^2_i = -7,94$ ), Siméto/Vitron L6 ( $W_i = 47,40$  et  $\sigma^2_i = 17,33$ ), Siméto ( $W_i = 57,24$  et  $\sigma^2_i = 22,90$ ), Ardente/Vitron L1 ( $W_i = 35,46$  et  $\sigma^2_i = 10,56$ ), Saadi/Waha L6 ( $W_i = 52,08$  et  $\sigma^2_i = 19,98$ ) et Ardente/Siméto L1 ( $W_i = 54,13$  et  $\sigma^2_i = 21,14$ ) sont ceux qui contribuèrent le moins à la somme des carrés des écarts de la variation de l'interaction géotype  $\times$  environnement et sont les plus stables (tableau 6). Selon Emebiri *et al.* (2005), les hétérogénéités des variances sont observées lorsque la différence de la valeur attendue entre deux géotypes quelconques n'est pas constante sans entraîner une modification de classement des variétés cultivées. D'autre part, la présence de corrélations incomplètes (Muir *et al.*, 1992) aboutirait au reclassement des variétés cultivées. Selon ces auteurs, c'est la composante qui peut compliquer la sélection parce qu'elle mesure le degré auquel la performance dans un environnement échoue dans la précision de la performance dans l'autre. Les résultats montrent que l'hétérogénéité de la variance est plus importante que la corrélation imparfaite (56,94 % et 43,06 %, respectivement) (tableau 7), indiquant un changement de classement des géotypes. Ardente/Waha L2 a le plus grand pourcentage d'hétérogénéité de la variance (22,99 %) et une corrélation incomplète élevée (9,85 %), c'est donc un géotype instable. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus en utilisant l'écovalence ( $W_i = 1316,75$ ) et la stabilité de la variance de Shukla ( $\sigma^2_i = 736,62$ ) (tableau 6). Vitron a une bonne stabilité en termes d'écovalence ( $W_i = 2,81$ ) (Wricke, 1962) et de stabilité de la variance de Shukla ( $\sigma^2_i = -7,94$ ) (tableau 7), et il a aussi un très petit pourcentage d'hétérogénéité de la variance (2,98 %) et le plus petit pourcentage de corrélation incomplète (2,96 %), qui expliquent la stabilité de ce géotype à travers les différents environnements.

Tableau 7. Moyennes (Moy), coefficients de détermination ( $R^2_{ij}$ ), pentes ( $bi$ ), non linéarité ( $S^2_{di}$ ), écovalence de Wricke ( $W_i$ ), stabilité de Shukla ( $\sigma^2_i$ ), hétérogénéité des variances (%  $HV$ ) et corrélation incomplète (%  $IC$ ) du rendement en grain.

Génotypes	Rendement en grain						
	$R^2_{ij}$	$bi = l$	$S^2_{di}$	$W_i$	$\sigma^2_i$	% ( $HV$ )	% ( $IC$ )
Ard	0,762	2,603=1	578,06ns	868,59	<b>482,67</b>	<b>16,44</b>	7,13
Ard/Sa L3	0,207	0,767=0	1006,45*	283,34	151,02	294	10,13
Ard/Sim L1	<b>0,778</b>	1,401=1	-164,17ns	54,13	21,14	3,32	3,82
Ard/Sim L4	0,383	0,398=0	-78,72ns	142,36	71,14	6,03	2,47
Ard/Vit L1	0,511	0,699=1	-61,65ns	35,46	10,56	4,25	2,11
Ard/Wah L1	0,566	<b>1,598=1</b>	789,89ns	155,78	78,74	4,32	<b>5,00</b>
Ard/Wah L2	0,926	<b>2,810&gt;1</b>	-919,67ns	<b>1316,75</b>	<b>736,62</b>	<b>22,99</b>	<b>9,85</b>
Sa	0,753	1,159=1	144,95ns	88,03	40,40	3,00	5,09
Sa/Sim L3	0,008	-1,193=0	74,07ns	494,31	270,58	7,86	8,98
Sa/Wah L3	0,217	0,566=0	740,03ns	307,05	164,46	3,06	10,57
Sa/Wah L6	0,549	0,859=1	-91,10ns	52,08	19,98	3,27	3,83
Sa/Wah L7	0,201	0,339=0	36,98ns	222,83	116,74	5,08	5,77
Sim	0,731	1,033=1	-237,51ns	57,24	22,90	2,96	4,37
Sim/Vit L5	0,425	0,588=0	-184,56ns	108,94	52,20	<b>4,26</b>	3,96
Sim/Vit L6	0,690	0,684=0	-179,77ns	47,40	17,33	4,23	2,44
Vit	<b>0,328</b>	1,081=0	327,64ns	<b>2,81</b>	<b>-7,94</b>	2,98	<b>2,96</b>
Wah	0,258	0,608=0	416,73ns	338,75	182,42	2,96	11,51
total						<b>56,94</b>	<b>43,06</b>

En gras les valeurs extrêmes.

Le plus grand nombre de corrélations significatives (4 corrélations) a été trouvé entre d'une part  $bi$  et d'autre part  $R^2_{ij}$  ( $r = 0,774$ ),  $W_i$  ( $r = 0,630$ ),  $\sigma^2_i$  ( $r = 0,630$ ) et %  $HV$  ( $r = 0,718$ ), viennent ensuite les corrélations entre d'une part  $\sigma^2_i$  et d'autre part  $bi$  ( $r = 0,630$ ), %  $HV$  ( $r = 0,939$  et  $IC$  ( $r = 0,618$ )) et les corrélations entre %  $HV$  et  $W_i$  ( $r = 0,939$ ),  $\sigma^2_i$  ( $r = 0,939$ ) et  $bi$  ( $r = 0,718$ ). Les autres paramètres présentent un nombre faible de corrélations significatives avec 2 corrélations pour %  $IC$  (%  $IC - \sigma^2_i = 0,618$  et %  $IC - W_i = 0,618$ ) et une pour  $S^2_{di}$  ( $S^2_{di} - R^2_{ij} = -0,483$ ). Ces résultats impliquent une similarité dans la détection de génotype stable. Il suffit donc d'utiliser un paramètre en l'occurrence  $bi$ , %  $HV$  ou  $\sigma^2_i$  pour déterminer la stabilité des génotypes. Letta (2007) a

trouvé, sur blé dur, des corrélations significatives entre  $S^2di$ ,  $Wi$ ,  $S^2xi$  et  $ASV$ . Cependant, nos résultats ne montrent aucune corrélation significative entre  $S^2di$  et  $R^2ij$ .

Selon Bell (2008), il est intéressant de choisir des variétés ou de sélectionner des génotypes dotés d'une large gamme d'adaptation plutôt que ceux bien adaptés à un environnement donné. En raison des fluctuations qui caractérisent le climat méditerranéen de l'Algérie, et afin d'optimiser la sélection sur un grand nombre d'environnements, car cela peut constituer l'une des solutions pour pallier aux contraintes climatiques entravant le développement de la production de blé dur. Les génotypes Ardente/Waha L1 (83,25 q.ha<sup>-1</sup>, classé 1<sup>er</sup>), Siméto 74,29 q.ha<sup>-1</sup>, classé 4<sup>ème</sup>) et Ardente/Vitron L1 (70,50 q.ha<sup>-1</sup>, classé 6<sup>ème</sup>) présentent un rendement élevé et sont stables quelle que soit la méthode utilisée ( $bi$ ,  $S^2di$ ,  $Wi$ ,  $\sigma^2i$ , %  $HV$  et %  $IC$  sont faibles). Pour Benmahammed *et al.* (2009), Siméto est une variété stable lorsqu'ils considèrent la pente  $bi$  et instable lorsqu'ils considèrent l'indice P de Lin *et al.* (1988). La variété Waha est moyennement stable (%  $IC = 2,96$  et %  $IC = 11,51$ )), ces résultats sont en accord avec ceux de Benmahammed *et al.* (2009), qui analysèrent sa performance à partir des résultats de  $Wi$ . Cependant, les génotypes adaptés à une large gamme de milieux présentent généralement des performances plus faibles que celles des génotypes adaptés à des environnements plus spécifiques. L'adaptation spécifique permet la sélection de lignées spécifiquement adaptées aux environnements défavorables (Ceccarelli, 1994) ou spécifiquement adaptées aux environnements favorables. Les lignées spécifiquement adaptées aux environnements favorables peuvent être cultivées dans une agriculture intensive, où l'eau n'est pas un facteur limitant (par exemple là où l'apport d'eau par irrigation est possible) et / ou l'agriculteur peut apporter les intrants nécessaires à la culture (céréaliculture sous pivot au sud de l'Algérie).

## CONCLUSION GENERALE

L'étude de la tolérance à la sécheresse a montré une réduction de tous les caractères relatifs à la plante (rendement et composantes, matière sèche à la floraison et à la récolte, LAI, états hydriques de la plante et NDVI). L'effet régimes hydriques explique plus la variation observée des différents caractères par rapport à l'effet variétés pour les deux essais et pour la majorité des caractères à l'exception des caractères relatifs à la plante de l'essai 1991 où l'effet variétés est supérieur à l'effet régimes hydriques car le nombre de variétés (6 et 4 respectivement en 1991 et 1992) et de régimes hydriques (2 et 3 respectivement en 1991 et 1992) étudiées est différent qui induit des variances de l'effet variétés (1991) et de l'effet régimes hydrique (1992) plus importantes.

Les stress hydriques modéré et sévère ont provoqué une réduction des disponibilités en eau dans le sol et une augmentation du potentiel hydrique foliaire. La diminution du LAI provoquée par la sénescence précoce des feuilles due au stress hydrique a entraîné une réduction de la différence normalisée (NDVI) et de la translocation au profit de la remobilisation.

Pour tous les caractères la variété Ambral de blé dur (*Triticum durum* Desf.) a donné les réductions les plus élevées dans les conditions de stress par rapport au variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en 1992, tandis qu'en 1991 toutes les variétés ont présenté des réductions équivalentes.

L'étude des corrélations révèle que le rendement en grain, le nombre de grains/m<sup>2</sup>, le poids de 1000 grains, le LAI (Leaf Area Indice) et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) étaient corrélés à l'exception des corrélations entre d'une part le poids de 1000 grains et d'autre part le rendement en grain (1992) et le nombre de grains/m<sup>2</sup> (1991). 51,55 %, 27,88 %, 4,12 % (1991) et 75 %, 43 % et 20,2 % (1992) de la variabilité du rendement en grain, du nombre de grains et du poids de 1000 grains sont expliqués par la variabilité de NDVI. 69,75 %, 52,37 %, 28,4 % et 23,20 % de la variabilité de NDVI, du rendement en grain, du poids de 1000 grains et du nombre de grains/m<sup>2</sup> sont expliqués par la variabilité du LAI. Par conséquent, le rendement en grain, le poids de 1000 grains et le nombre de grains/m<sup>2</sup> peuvent être prédit par NDVI et LAI.

La multiplicité des environnements et des objectifs de production en agriculture impose une connaissance de la diversité agro-morphologique pour une meilleure utilisation dans les programmes d'amélioration et de sélection. La prise en compte des interactions génotype  $\times$  environnement permet la sélection de génotypes peu sensibles aux fluctuations du milieu et d'éviter des pertes économiques pouvant être importantes.

L'étude de la diversité agro-morphologique a montré une variabilité importante pour l'ensemble des caractères étudiés et des environnements, à l'exception du nombre d'épillets fertiles/épi. Sur les différentes années, un haut rendement en grain est issu de la réalisation d'une grande longueur de l'épi, d'un grand nombre de grains, d'une grande hauteur de la tige, d'un nombre total d'épillets/épi élevée et d'une tardiveté (Ardente/Waha L2), d'un nombre de grains/épi (Siméto/Vitron L5) ou d'un indice de récolte élevé (Saadi/Waha L7) dans tous les milieux.

L'étude des corrélations entre d'une part la quantité d'eau reçue et la température moyennes pendant le mois de Février correspondant à la mise en place des organes reproducteurs et d'autre part le rendement en grain montrent l'importance de ces deux paramètres climatiques sur ce caractère.

L'interaction génotypes  $\times$  environnements était significative pour le rendement en grain. La pente était égale à l'unité pour sept génotypes, et  $S^2di$  était non significatif pour la majorité des génotypes. Les différentes méthodes utilisées ( $Wi$ ,  $\sigma^2i$ , %  $HV$  et %  $IC$ ) ont permis de faire un screening des génotypes. La décomposition de la variance et l'analyse de la régression (linéaire et non linéaire) ont montré que tous les génotypes avaient une stabilité moyenne, à l'exception de Ardente/Saadi L3 ( $S^2di > 0$ ).

Le choix des génotypes doit tenir compte de la performance du rendement en grain et de sa stabilité. Un compromis doit être trouvé entre ces deux paramètres. Par conséquent, Ardente/Waha L1 (83,25 q.ha<sup>-1</sup>, classé 1<sup>ère</sup>), Siméto (70,29 q.ha<sup>-1</sup>), classé 4<sup>ème</sup>) et Ardente/Vitron L1 (70,56 q.ha<sup>-1</sup>, classé 5<sup>ème</sup>) ont un rendement en grain élevé, une stabilité moyenne et ont une écovalence ( $Wi$ ), une variance de Shukla ( $\sigma^2i$ ), une hétérogénéité de la variance (%  $HV$ ) et une corrélation incomplète (%  $IC$ ) faibles.

Ardente/Siméto L4 (tolérant aux environnements défavorables), Siméto/Vitron L5 (potentiel élevé) et Saadi/Waha L7 (tolérants aux conditions environnementales difficiles) ont un rendement en grain stable. Ces génotypes ont un parent stable pour ce

caractère (Vitron, Saadi et Siméto, respectivement). Par contre, Ardente/Waha L2 a montré une performance variable à travers les environnements. Le parent Ardente a un rendement en grain élevé mais il était instable, tandis que Waha était assez stable et tolérant aux conditions environnementales difficiles.

Des corrélations significatives ont été trouvées entre les paramètres de stabilité (% HV  $R^2_{ij}$ ,  $b_i$ ,  $W_i$ ,  $\sigma^2_i$ , et % IC). La stabilité des génotypes peut donc être déterminée à partir d'un seul de ces paramètres, en particulier  $b_i$ ,  $W_i$ , ou  $\sigma^2_i$  pour sélectionner des génotypes intéressants dans un programme d'amélioration de blé dur.

## RÉFÉRENCES

- Abd El Moneim D.A., Mohamed I.N., Belal A.H. et Atta M.E. 2010. Screening bread wheat genotypes for drought tolerance: Germination, radical growth and mean performance of yield and its components. In: López-Francos, A, (comp.); López-Francos A, (collab.). Economics of drought and drought preparedness in a climate change context. Zaragoza: CIHEAM / FAO / ICARDA / GDAR / CEIGRAM / MARM, pp. 301-305 (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens n° 95).
- Acevedo E., 1988. Morphophysiological traits of adaptation of cereals to mediterranean environment. In: Proceeding of the International Symposium on Improving Winter Cereals under temperature and salinity stresses, Cordoba (Spain), 26-29 oct. 1988.
- Acreche M. M. et Slafer G.A., 2009. Grain weight, radiation interception and use efficiency as affected by sink-strength in Mediterranean wheats released from 1940 to 2005. Field Crops Research Volume 110, Issue 2, 10 February 2009 : 98–105.
- Akçura M., Kaya Y. et Taner S., 2009. Evaluation of durum wheat genotypes using parametric and non parametric stability statistics. Turkish J. of Field Crops 14 (2): 111 - 122.
- Alberts M. J. A., 2004. Acomparision of statistical methods to describe genotype × environment interaction and yield stability in multi-location maize trials. Thèse de magister. University of the free state Bloemfontein, Afrique du sud. 96 p.
- Anniccharico P., 2002. Génotype by environment interactions: challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. FAO. Italy. 174 p.
- Ali Dib T. et Monneveux P., 1992. Adaptation à la sécheresse et notion d'idéotype chez le blé dur. I Caractères morphologiques d'enracinement. Agronomie 12 : 371 – 379.
- Anonyme, non daté. A database for remote sensing indices. Index Database.  
<http://www.orfeo-toolbox.org/SoftwareGuide/SoftwareGuidech12.html>

- Aprile A., Mastrangelo M., De Leonardis A.M., Galiba G., Roncaglia E., Ferrari F., De Bellis L., Turchi L., Giuliano G. et Cattivelli. L., 2009. Transcriptional profiling in response to terminal drought stress reveals differential responses along the wheat genome. *BMC Genomics* 10: 279. doi:10.1186/1471-2164-10-279. <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/10/279>
- Araus J.L., Casadesus J. et Bort J., 2001. Recent tools for the screening of physiological traits determining yield. In: Reynolds MP. (ed). *Application of Physiology in Wheat Breeding*. CYMMIT, Mexico, DF. pp. 59-77,
- Araus J.L., Slafer G.A., Reynolds M., et Royo C., 2002. Plant breeding and drought in C3 cereals : What should we breed for ? *Ann Bot* 89: 925-940.
- Austin R.B., Morgan C.L., Ford M.A. et Blackwell R.D., 1980. Contributions to grain yield from pre-anthesis assimilation in tall and dwarf barley phenotypes in two contrasting seasons. *Ann Bot.* 45(3): 309 – 319.
- Balaghi R., Tychon B., Eerens H. et Jlibene M. 2008. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for early prediction of wheat grain yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10: 438-452.
- Bányai J., Láng É.J., Bognár Z., Kuti C. et Spitzkó T., 2012. Changes in the yield components of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) during irrigation controlled by soil sensors. *Acta Agronomica Hungarica*, 60: 309-317, DOI: 10,1556/AAgr. 60.2012.
- Barnabás B. Jäger K. et Fehér A. 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals, *Plant Cell Environ*, 31:11-38.
- Beheshti A.R. et Behboodi fard B., 2010. Dry matter accumulation and remobilization in grain sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* L. Moench) under drought stress. *Australian Journal of Crop Science AJCS* 4(3):185-189.
- Belkadi B., Assali N., Benlhabib O. 2003. Variation of specific morphological traits and ploidy level of five *Aegilops* L. species in Morocco. *Acta Botanica Malacitana* 28: 47-58.
- Bell G., 2008. *Selection, the mechanism of evolution*. Ed. Oxford university press. 568 p.

- Benbelkacem A. et Kellou K., 2000. Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) cultivées en Algérie. Actes du premier symposium international sur la filière blé : enjeux et stratégies. ITGC. Février 2000 : 123-131.
- Benlaribi M., Monneveux P., 1988. Etude comparée du comportement, en situation de déficit hydrique, de deux variétés algériennes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) adaptées à la sécheresse. C R Acad Agric Fr 74 (5) : 73-83.
- Benmahammed A., Nouar H., Haddad L., Laala Z., Oulmi A. et Bouzerzour H., 2009. Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 14 (1), 177-186.
- Ben Naceur M., Nailly M. et Selmi M., 1999. Effet d'un déficit hydrique, survenant à différents stades de développement du blé, sur l'humidité du sol, la physiologie de la plante et sur les composantes du rendement. Medit 2 : 53 – 60.
- Bouraine S., 2006. Etude comparative de quelques lignées F<sub>9</sub> de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mém. Ing. INA. El Harrach. Alger. 78p.
- Bowman J.C., 1972. Genotype × environment interactions. Ann. Génét. Sél. Anim. 4(1): 117 – 123.
- Dagnelie P, 1970. Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Gembloux, Presses Agron., Vol. 2 : 451 p.
- Debaek P., Puech J. et Casals M.L., 1996. Elaboration du rendement du blé d'hiver en condition de déficit hydrique. Etude en lysimètres. Agronomie 16 : 3-23.
- Demarly Y., 1977. Génétique et amélioration des plantes. Collection sciences agronomiques. Ed. Masson. 287 p.
- Dembele Y., 1989 : Dynamique de la réflectance de différents couverts prairiaux, Problème d'estimation du rayonnement intercepté. Mémoire de D.A.A. Chaire de Génie Rural Hydraulique et Climatologie Agricole et Station d'Agronomie de l'INRA Toulouse, 61 p.
- Demirevska K. Simova-Stoilova L., Vassileva V, Vaseva I., Grigorova B. et Feller U., 2008. Drought-induced leaf protein alterations in sensitive and tolerant wheat varieties. Gen. Appl. Plant Physiology, n° special, 34 (1-2) : 79-102.

- Devendra R., veeraraj urs Y.S., Udaya Kumar M. et Krishna Sastry K., 1983. Leaf area duration and its relationship to productivity in early cultivars of rice. Proc. Indian natn. Sci. Acad. B49 (6):692 -696.
- Dordas C., 2012. Variation in dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in barley affected by fertilization, cultivar, and source-sink relations. European Journal of Agronomy 37: 31-42.
- Eberhart, S.A. et Russell, W.A., 1966. Stability parameters for comparing varieties. Crop Sci. 6: 36-40.
- Elhani S., Martos V., Rharrabti Y., Royo C. et Garcia del Moral L.F., 2007. Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L, var, durum) grain yield and its components grown in Mediterranean environments. Field Crops Research 103 : 25-35.
- Emebiri L.C., Matassa V. et Moody D.B, 2005. GENSTAT Programs for Performing Muir's Alternative Partitioning of Genotype-by-Environment Interaction. Journal of Heredity 96 (1):78–79.
- Fábián A., Jäger K., Barnabás B., 2013. Developmental stage dependency of the effect of drought stress on photosynthesis in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. Acta Agronomica Hungarica 61: 13-21.  
<http://www.akademiai.com/content/b48383mh91q42151/>
- FAOSTAT, 2014. Date d'accès : le 26/04/2014.  
<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>
- Fernandez G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other food Crops in Temperature and Water Stress. Aug, 13-16, Shanhua, Taiwan, pp: 257-270.
- Finlay, K.W. et Wilkinson G.N., 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. Aust. J. Agric. Res. 14: 742-754.
- Fisher R.A. et Yates F., 1963. Statistical tables for biological, agricultural and medical research. Edingurgh, Oliver and Boyd, 146 p.
- Fischer R.A. et Maurer R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain

- yield response. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 897-907.
- Gallais A. 1990. Théorie de la sélection en amélioration des plantes. Collection sciences agronomiques. Ed. Masson, Paris, Milan, Barcelone, Mexico. 588 p.
- Grignac P., (1981) Rendement et composantes du rendement de blé d'hiver dans l'environnement méditerranéen français. In. Limites de potentialités de production de blé dans différents systèmes de culture et dans différentes zones méditerranéennes. Ed 11. Les colloques, 1178:185-195.
- Gruber J., 1983. Utilisation de l'indice de végétation dans les domaines agricole et forestier. Mémoire de fin d'études. 132 p. Etude réalisée pour la région d'ile-de-France, Institut d'Aménagement et d'urbanisme de la région d'Ile-de-France, Division Environnement Urbain et Rural.
- Gutiérrez-Rodríguez M., Reynolds M.P., Escalante-Estrada J.A. et Rodríguez-Gonzalez M.T., 2004. Association between canopy reflectance indices and yield and physiological traits in bread wheat under drought and well-irrigated conditions, *Australian Journal of Agricultural Research* 55: 1139-1147, <http://dx.doi.org/10.1071/AR04214>
- Guyot G., Hanocq J.F., Buis J.P. et Saint G., 1983, Mise au point d'un radiomètre de simulation SPOT. 2<sup>ème</sup> coll. Int. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, 12-16 sept, 1983, INRA (Ed), pp. 233-242.
- Guyot G., 1984. Caractérisation spectrale des couverts végétaux, application à la télédétection. *Bul. Soc. Franc. Photogram. et Télédétection*, 95 (3), 5-22.
- Guyot G., 1989. Signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection satellitaire. Collection dirigée par Fernand Verger. 178 p.
- Hanifi L., 1999. Contribution à l'étude de l'hétérosis et de l'intérêt des F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et lignées haploïdes doublées chez l'orge. Thèse de Docteur d'Etat en Sciences Naturelles. Université des sciences et technologies de Lille, France. 177 p.
- Hanifi – Mekliche L. et Gallais A., 1999. Heterosis, genetics effects and value of F<sub>2</sub>s and doubled-haploid lines in barley breeding. *Agronomie* 19 P. 509-520. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1207558>
- Hanifi-Mekliche L., Mekliche A. et Monneveux Ph., 2011. Genotype × environment

- interaction and stability analysis on barley (*Hordeum vulgare* L.) lines in Algeria. Acta Agronomica Hungarica, 59(4), pp. 325–336 (2011) DOI: 10.1556/AAgr.59.2011.4.4 0238–0161/\$ 20.00©2011 Akadémiai Kiadó, Budapest. <http://www.akademiai.com/content/b48383mh91q42151/>
- Hajzler M., Klimešová J. et Středa T., 2012. Biomass production of white mustard (*Sinapis alba* L.) varieties in relation to the root system size. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2011: 105 – 108.
- Hanifi-Mekliche L., Mekliche A. et Monneveux Ph., 2011. Genotype × environment interaction and stability analysis on barley (*Hordeum vulgare* L.) lines in Algeria. Acta Agronomica Hungarica 59(4): 325-336. DOI: 10.1556/AAgr.59.2011.4.4.
- Hardwick RC, Wood JT, 1972, Regression methods for studying genotype – environment interactions. Heredity, 28, 209-222.
- Isanloo A., Condon A.G., Langridge P, Tester M. et Thorsten Schnurbusch T., 2008. Different mechanisms of adaptation to cyclic water stress in two South Australian bread wheat cultivars. Journal of Experimental Botany 59(12) : 3327-3346. doi:10.1093/jxb/ern199
- ITGC., 1999. Analyse des contraintes liées à la céréaliculture. Programme de développement de la filière céréale, pp 8-10.
- Kumar R., Sarawgi A.K., Ramos C. Amarante S.T., Ismail A.M. et Wade L. J., 2006. Partitioning of dry matter during drought stress in rainfed lowland rice. Field Crops Research 98: 1-11.
- Letta T. 2007. Genotype-environment interactions and correlation among some stability parameters of yield in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes grown in south east Ethiopia. African Crop Sciences Conference Proceedings Vlo. 8. Pp 693-698.
- Li W. et Gill B.S. 2004. Genomics for cereal improvement. In : P.K. Gupta, R.K. Varshney (Eds), Cereal Genomics, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands. Pp. 585-634.
- Lillesand T.M. et Kiefer W., 1987. Remote sensing and image interpretation. Ed. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapor. 2ème édition.

- Lin C.S., Binns M.R. et Lefkovitch L.P., 1986. Stability analysis: where do we stand? *Crop Science* 26 : 894 – 900.
- Lobos G.A., Matus I., Rodriguez A., Romero-Bravo S., Araus J.L. et del Pozo A., 2014. Wheat genotypic variability in grain yield and carbon isotope discrimination under Mediterranean conditions assessed by spectral reflectance. *Journal of Integrative Plant Biology* 56.  
[www.jipb.net/pubsoft/content/2/10,1111/jipb,12114.pdf](http://www.jipb.net/pubsoft/content/2/10,1111/jipb,12114.pdf)
- MADR 2006 Rapport sur la situation du secteur agricole. Direction des statistiques agricoles et des systèmes d'information, 78 p.
- Marty J., Slafer G.A., 2007. Differences in sink-strength determining differences in yield between durum and bread wheat. Poster, Universitat de Lleida, Spain.
- Mazoni A., Ercoli L., Mariotti M. et Arduini I., 2007. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type. *Europ. J. Agronomy* 26 : 179-186.
- Mekliche A., Dahlia F. et Hanifi-Mekliche L., 2013. Agro-morphological diversity and stability of durum wheat lines (*Triticum durum* Desf.) in Algeria. *Acta Agronomica Hungarica* 61(2) : 149-159. DOI: 10.1556/AAgr.61.2013.2.6 0238–0161/\$ 20.00©2013 Akadémiai Kiadó, Budapest  
<http://www.akademiai.com/content/b48383mh91q42151/>
- Mihoub I., 2007. Etude comparative de quelques lignées F<sub>10</sub> de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mém. Ing. INA. El Harrach. Alger. 93 p.
- Mohamed Yahiaoui L., 2008. Etude comparative de quelques lignées généalogiques de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en Mitidja. Mém. Ing. INA. El Harrach. Alger. 82p.
- Monneveux Ph., 1991. Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver? L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris©1991. pp. 165-186.
- Morgan J.M., 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 35: 299-550.
- Muir W, Nyquist WE, and Xu S, 1992. Alternative partitioning of the genotype-by-

- environment interaction. *Theor Appl Genet*, 84 :193–200.
- O'Brien L., 1979. Genetic variability of root growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Australian Journal of Agricultural Research* 30 (4): 587- 595.
- Passioura J.B., 1996. Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation* 20: 79 – 83, Kluwer Academic Publishers.
- Peñuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L. et Savé R. 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *Int. J. Remote Sens.* 14: 1887-1905.
- Pourdad S.S., 2008. Study on drought resistance indices in spring safflower. *Acta Agronomica Hungarica* 56(2) : 203-2012.DOI: 10.1556/AAgr.56.2008.2.9 <http://www.akademiai.com/content/b48383mh91q42151/>
- Power J.F., Willis W.O., Grunes D.L. et Reichman G.A., 1967. Effect of soil temperature, phosphorus and plant age on growth analysis of barley. *Agron. J.* 59: 231-234.
- Rajala A., Hakala K., Mäkelä P., Muurinen S. et Peltonen-Sainio P., Spring wheat response to timing of water deficit through ink and grain filling capacity. *Field Crops Research* 114: 263-271.
- Rajaram S., Braun, H.J. et Ginkel M.V. 1996. CIMMYT's approach to breed for drought Tolerance. *Euphytica* 92: 147-153.
- Riou C., 1993. L'eau et la production végétale. *Sécheresse* 4: 75 – 83.
- Rosielle A.A. et Hamblin J., 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments, *Crop Sci*, 21: 943-946.
- Royo C., Villegas D., 2011. Field measurements of canopy spectra for biomass assessment of small-grain cereals, *Biomass – Detection, Production and Usage*, Dr Darko Mtovic (Ed.), ISBN: 978-953-307-492-4, In: Tech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/biomass-detection-production-and-usage/field-measurements-of-canopy-spectra-for-biomass-assessment-of-small-grain-cereals>
- Shamsi. K. et Kobraee, S., 2011, Bread wheat production under drought stress conditions, *Annals of Biological Research* 2: 352-358.
- Sharma, R,C., Islomov S., Yulshadev T., Khalikulov Z., Ziyadullaev Z., 2011.

- Diversity among winter wheat germplasm for NDVI (normalized difference vegetation index) under terminal heat stress in central asia, In: Diversity, characterization and utilization of plant genetic resources for enhanced resilience to climate change, Baku-2011, In frame of the FAO project.  
<http://www.genres.az/uploads/files/Abstracts.pdf>
- Shukla GK, 1972. Some statistical aspects of partitioning genotypes environmental components of variability. *Heredity*, 29, 237-245 .
- Siddique M.R.B., Hamid A. et Islam M.S., 2000. Drought stress effects on water relations of wheat, *Bot, Bull, Acad, Sin*, 41: 35-39.
- Soudani K., 2005. Introduction générale à la télédétection. 25 p.  
[http://www.ese.u-psud.fr/IMG/pdf/doc\\_cours\\_teledec.pdf](http://www.ese.u-psud.fr/IMG/pdf/doc_cours_teledec.pdf)
- Tardieu F., 1996. Drought by plants. Do cells of droughted plants experience water? *Plant Growth Regulation* 20: 93-104.
- Talamali L., 2004. La libération du marché des céréales en Algérie. Office Algérien Interprofessionnel des Céréales OAIC. La Nouvelle République. Algérie. pp :14-16.
- Triboi E., 1987. Etude du potentiel génétique de production du blé tendre à travers la structure et le fonctionnement du peuplement. In. A.T.P écophysiologie du blé. Rapport intermédiaire. INRA, France. pp : 91-105.
- Truhlářová E., Ryšková T., Sutná P., Holková L. et Klimešová J., 2011. Differences in the drought stress response of winter wheat. *Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2011*: 121 – 124.
- UKAI Y., 2000. Analysis of the interaction between Genotypes and Environment.  
<http://lbm.ab.a.u-tokyo.ac.jp/~ukai/gest98.html>
- Wachira F, Wilson NG, Omolo J, Mamati G, 2002. Genotype x environment interactions for tea yields. *Euphytica*, 127, 289-296.
- Wricke G, 1962. Ueber eine methode zur erfassung der oekologischen streubreite in feldversuchen. *Z. Pflanzenzucht.*, 47, 92-96.
- Yahaya Y., Echekwu CA. Et Mohammed S.G., 2005. Yield stability analysis of pear millet hybrids in Nigeria. *Afr. J. Biotechnol.* 5 (3); 249-253.
- Yang J., Zhang J., Wang K., Zhu Q. et Wang W., 2001. Remobilization of carbon

reserves in response to water deficit during grain filling of rice. *Field Crops Research* 71/ 47-55.

Zhang H.J., Yu Z.W., Wang D. et Zhang Y.L., 2010. Effects of supplemental irrigation based on testing soil moisture on dry matter accumulation and distribution and water use efficiency in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* 36 (3) : 457-465.

## ANNEXE 1

Tableau 1. Carrés moyens (CM) de l'analyse de la variance du rendement, de ses composantes, de la biomasse et de l'indice de récolte (essai réalisé en 1991)

Caractères	Sources de variation							CV %	
	variétés (G) (ddl = 5)		Irrigation (I) (ddl = 1)		Blocs (ddl = 3)	Interaction (G*I) (ddl = 5)			Résiduelle (ddl = 33)
	CM	% de variation	CM	% de variation		CM	% de variation		
Rendement en grain	254,67***	54,83	399,17***	17,19	37,65*	33,51*	7,21	11,19	4,2
Pieds/m <sup>2</sup>	7960,70***	61,37	498,84 ns	0,77	123,07 ns	842,30 ns	6,49	605,36	7,4
Nombre d'épis/plante	0,90***	82,12	0,11*	2,01	0,02 ns	0,03 ns	2,74	0,02	7,5
Nombre d'épis/m <sup>2</sup>	58899,93***	89,88	6178,31**	1,89	2050,13*	389,49 ns	0,59	572,43	4,6
Nombre de grains/épi	85,88***	85,93	12,39**	2,48	0,46 ns	2,60 ns	2,60	1,32	3,1
Grains/m <sup>2</sup>	69551080,00***	87,01	20783552,00***	5,20	1882698,62 ns	179202,38 ns	0,22	745747,38	4,6
Poids de 1000 grains	287,58***	94,35	0,16 ns	0,01	3,38 ns	1,05 ns	0,34	2,14	3,4
Biomasse aérienne MS (récolte)	3547,62**	25,48	13154,61***	18,89	1884,60 ns	1159,14 ns	8,32	826,69	4,7
Indice de récolte	0,00431***	41,27	0,00025ns	0,48	0,00016ns	0,00489***	46,82	0,00017	2,82

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 2. Carrés moyens (CM) de l'analyse de la variance de la matière sèche à la floraison et à la récolte (essai réalisé en 1991)

Stades	Caractères (1991)	Sources de variation							CV %	
		variétés (G) (ddl = 5)		Irrigation (I) (ddl = 1)		Blocs (ddl = 3)	Interaction (G*I) (ddl = 5)			Résiduelle (ddl = 33)
		CM	% de variation	CM	% de variation		CM	% de variation		
Floraison	MS 1 Tige	0,37***	96,86	0,01 ns	0,52	0,00 ns	0,01 ns	2,62	0,00	4,7
	MS feuilles/0,35 m <sup>2</sup> (g)	281,62 ns	16,82	25,72 ns	0,31	55,08 ns	276,35 ns	16,51	163,30	14,12
	MS épis/0,35 m <sup>2</sup> (g)	414,65***	90,12	56,92***	2,47	5,77 ns	1,22 ns	0,27	4,45	3,90
	MS (T+F+épi)	5954,00***	47,74	26,79 ns	0,04	197,77 ns	1083,60 ns	8,69	804,73	6,5
	Indice foliaire (LAI)	4,81***	61,13	1,07 ns	2,72	0,02	0,72 ns	9,75	0,32	13,8
Récolte	MS d'un épi	0,01***	100	0,00***	0,00	0,00 ns	0,00 ns	0,00	0,00	4,6
	MS 1 Tige (g)	0,34***	92,39	0,11***	5,98	0,01 ns	0,00 ns	0,00	0,00	5,1
	MS tige/0,35 m <sup>2</sup>	1605,54***	63,51	558,57*	4,42	223,19 ns	67,38 ns	2,67	92,37	4,5
	MS Feuilles/0,35 m <sup>2</sup>	220,60**	32,72	9,28 ns	0,28	80,78 ns	3,39 ns	0,50	60,59	10,8

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 3. Carrés moyens (CM) de l'analyse de la variance des assimilâts provenant de la tige (remobilisation) et ceux provenant de la photosynthèse nette (translocation) (essai réalisé en 1991)

Caractères	Sources de variation							CV %	
	Géotypes (G) (ddl = 5)		Irrigation (I) (ddl = 1)		Blocs (ddl = 3)	Interaction (G*I) (ddl = 5)			Résiduelle (ddl = 33)
	CM	% de variation	CM	% de variation		CM	% de variation		
Remobilisation (%)	82,24***	37,70	433,98***	39,79	4,65 ns	10,79 ns	4,95	5,38	18,6
Translocation (%)	285,90***	27,05	2351,86***	44,50	30,29 ns	53,76 ns	5,09	34,66	20,1

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 4. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la sénescence de la feuille étandard (surface verte en %) (essai réalisé en 1991)

Source de variation	Dates						
	14 Juin	18 Juin	23 Juin	25 Juin	29 Juin	1-Juillet	3 Juillet
Variétés (G) (ddl = 5)	72,08*** (3,17) <sup>1</sup>	92,08*** (77,82) <sup>1</sup>	513,33*** (17,34) <sup>1</sup>	661,77*** (15,64) <sup>1</sup>	1235,52*** (11,75) <sup>1</sup>	857,08*** (14,91) <sup>1</sup>	925,52*** (21,49) <sup>1</sup>
Régimes (I) (ddl = 1)	18,75 ns (60,92) <sup>1</sup>	352,08*** (59,51) <sup>1</sup>	9633,33*** (65,10) <sup>1</sup>	13500,52*** (63,80) <sup>1</sup>	41125,52*** (78,24) <sup>1</sup>	20008,33*** (69,60) <sup>1</sup>	10950,52*** (50,85) <sup>1</sup>
Blocs (B) (ddl = 3)	1,39	3,47	13,19	10,24	22,74	63,19	122,74
G x I (ddl = 5)	5,00 ns (4,23) <sup>1</sup>	19,58 ns (16,55) <sup>1</sup>	264,58*** (8,94) <sup>1</sup>	341,77** (8,08) <sup>1</sup>	405,52** (3,86) <sup>1</sup>	270,83* (4,71) <sup>1</sup>	568,02*** (13,19) <sup>1</sup>
G x B (ddl = 15)	3,47	10,14	34,44	72,33	91,91	74,86	76,91
I x B (ddl = 3)	0,69	3,47	47,22	39,41	179,69	47,22	124,13
G x I x B (ddl = 15)	8,61	17,64	38,47	93,99	83,02	109,72	81,63
Résiduelle (ddl = 33)	5,56	12,94	37,44	79,18	95,85	88,19	83,35
CV %	2,61	4,10	8,27	13,45	22,01	35,49	55,82

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 5. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la sénescence de la deuxième feuille (surface verte en %) (essai réalisé en 1991)

Source de variation	Dates						
	14 Juin	18 Juin	23 Juin	25 Juin	29 Juin	1-Juillet	3 Juillet
Variétés (G) (ddl = 5)	45,52 ns (12,48) <sup>1</sup>	159,69* (12,91) <sup>1</sup>	813,44*** (11,93) <sup>1</sup>	660,52** (7,42) <sup>1</sup>	732,94*** (7,65) <sup>1</sup>	988,33*** (20,01) <sup>1</sup>	446,25** (20,60) <sup>1</sup>
Régimes (I) (ddl = 1)	792,19*** (43,42) <sup>1</sup>	3588,02*** (58,03) <sup>1</sup>	25900,52*** (75,99) <sup>1</sup>	36575,52*** (82,22) <sup>1</sup>	39273,52*** (81,98) <sup>1</sup>	12675,00*** (51,33) <sup>1</sup>	3168,75*** (29,26) <sup>1</sup>
Blocs (B) (ddl = 3)	18,58	10,24	18,58	26,91	39,35	113,89	75,69
G x I (ddl = 5)	9,69 ns (2,65) <sup>1</sup>	35,52 ns (2,87) <sup>1</sup>	351,77** (5,16) <sup>1</sup>	343,02* (3,86) <sup>1</sup>	463,77*** (4,84) <sup>1</sup>	755,00*** (15,29) <sup>1</sup>	446,25** (20,60) <sup>1</sup>
G x B (ddl = 15)	16,91	34,41	39,83	42,74	81,27	93,89	91,53
I x B (ddl = 3)	40,80	14,41	79,69	189,41	44,63	102,78	75,69
G x I x B (ddl = 15)	21,63	68,58	97,60	106,91	78,55	82,78	91,53
Résiduelle (ddl = 33)	21,23	48,12	69,71	85,24	76,70	89,65	90,09
CV %	5,43	8,77	14,14	18,98	26,00	52,85	116,82

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 6. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la sénescence de la troisième feuille (surface verte en %). (essai réalisé en 1991)

Source de variation	Dates			
	14 Juin	18 Juin	23 Juin	25 Juin
Variétés (G) (ddl = 5)	461,20* (17,36) <sup>1</sup>	1011,25** (16,40) <sup>1</sup>	615,83* (7,98) <sup>1</sup>	958,33*** (13,55) <sup>1</sup>
Régimes (I) (ddl = 1)	5208,30*** (39,22) <sup>1</sup>	16133,33*** (52,33) <sup>1</sup>	26133,33*** (67,71) <sup>1</sup>	20833,33*** (58,91) <sup>1</sup>
Blocs (B) (ddl = 3)	59,00	67,36	25,69	50,00
G x I (ddl = 5)	188,30 ns (7,09) <sup>1</sup>	380,83 ns (6,18) <sup>1</sup>	629,58* (8,16) <sup>1</sup>	958,33*** (13,55) <sup>1</sup>
G x B (ddl = 15)	168,20	173,19	202,78	155,00
I x B (ddl = 3)	306,90	426,39	34,72	50,00
G x I x B (ddl = 15)	80,30	243,89	200,97	155,00
Résiduelle (ddl = 33)	140,85	228,35	186,68	145,45
CV %	24,04	43,96	58,04	57,89

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 7. Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'ETR à différentes périodes (eau consommée à partir du sol) (essai réalisé en 1991)

Sources de variation	ETR Avril - Mai	%	ETR Mai - Juillet	%	ETR Avril - Juillet	%
Régimes (ddl = 1)	47,54 ns	0,82	100483,47***	92,68	257303***	90,92
Variétés (ddl = 5)	810,55***	69,56	648,09***	2,99	542*	0,19
Blocs (ddl = 3)	38,78 ns		138,29 ns		631*	
Régimes*variétés (ddl = 5)	46,68 ns	4,01	245,67***	1,13	608**	1,07
Régimes*serres (ddl = 3)					1140***	
variétés*serres (ddl = 15)					397*	
Régimes*variétés*serres (ddl = 15)					773***	
Residuelle (ddl = 33)	41,70		92,66		188 (ddl = 96)	
CV %	10,92		6,42		6,54	

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 8. Carrés moyens de l'analyse de la variance du potentiel hydrique foliaire de base ( $\psi$ ) mesuré à différentes dates et potentiel hydrique foliaire moyen ( $\bar{\psi}$ ) (essai réalisé en 1991)

Source de variation	Dates									$\bar{\psi}$ ( $\bar{\psi}$ )
	5-juin	7-juin	12-juin	14-juin	17-juin	19-juin	21-juin	24-juin	27-juin	
Régimes (I) (ddl = 1)	368,511*** (65,91) <sup>1</sup>	412,686*** (87,70)	352,380*** (76,97)	1252,945*** (83,88)	899,141*** (87,89)	1375,643*** (76,57)	1730,730*** (78,98)	1958,221*** (70,67)	2220,78*** (77,26)	1065,184*** (90,94)
Génotypes (G) (ddl = 3)	1,415 ns (0,76)	6,541*** (4,17)	8,813*** (5,78)	18,512*** (3,72)	8,392*** (2,46)	22,285*** (3,72)	35,919*** (4,92)	98,191*** (10,63)	28,68** (2,99)	15,345*** (3,93)
Blocs (B) (ddl = 1)	7,381 ns	0,666 ns	8,128***	1,200 ns	7,813**	8,620 ns	0,666 ns	0,450 ns	0,50 ns	1,907*
G x I (ddl = 3)	4,920 ns (2,64)	1,380** (0,88)	2,455*** (1,61)	5,006* (1,01)	3,546* (1,04)	4,930 ns (0,82)	21,507** (2,94)	72,213*** (7,82)	4,80 ns (0,50)	3,616*** (0,93)
I x B (ddl = 1)	3,741 ns	4,950***	2,926***	46,512***	1,922 ns	35,564***	0,210 ns	2,312 ns	176,72***	12,345***
G x B (ddl = 3)	2,320 ns	0,475 ns	9,135***	2,748 ns	2,195 ns	13,426**	5,998 ns	13,373*	3,48 ns	1,839***
G x I x B (ddl = 3)	1,838 ns	1,843**	3,050***	8,035**	0,296 ns	25,131***	14,119*	9,560 ns	2,55 ns	3,756***
Résiduelle (ddl = 64)	2,313	0,337	0,375	1,409	1,107	2,803	3,551	3,594	5,59	0,285
CV %	24,97	11,92	8,56	14,11	15,18	18,46	21,59	21,62	18,17	6,77

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 9. Carrés moyens de l'analyse de la variance du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi$  ms) mesuré à différentes dates et moyennes ( $\bar{\psi}$  ms) (essai réalisé en 1991)

Sources de variation	Dates								$\bar{\psi}$ (ms)
	27/5	30/5	1/6	3/6	12 juin	19-juin	26-juin	27-juin	
Régimes (I) (ddl = 1)	106,02*** (30,52) <sup>1</sup>	26,40*** (18,75)	112,89*** (34,53)	178,54*** (36,13)	463,20*** (44,25)	399,17*** (58,33)	448,88*** (57,20)	669,90*** (67,14)	388,68*** (83,21)
Génotypes (G) (ddl = 2)	39,49*** (ddl = 3) (34,10)	0,63 ns (0,89)	0,14ns (0,09)	47,36*** (19,17)	33,27*** (6,36)	11,85* (3,46)	13,71* (3,49)	15,93* (3,19)	10,92*** (4,68)
Blocs (B) (ddl = 1)		3,75 ns	37,29ns	20,30ns	169,07ns	1,43ns	1,60ns	0,28ns	1,38
G x I (ddl = 2)	2,48ns (ddl = 3) (2,14)	2,82 ns (4,01)	29,60*** (18,11)	63,94*** (25,88)	4,48ns (0,86)	1,81ns (0,53)	17,27* (4,40)	5,72ns (1,15)	4,76*** (2,04)
I x B (ddl = 1)		2,09 ns	2,13ns	0,05ns	9,73ns	25,20ns	0,28ns	9,45ns	4,30
G x B (ddl = 2)		3,71 ns	21,76ns	2,36ns	43,12ns	21,77ns	5,20ns	3,94ns	0,76
G x I x B (ddl = 2)		1,04 ns	1,24ns	0,36ns	18,52ns	16,06ns	18,27ns	3,19ns	6,25
Résiduelle (ddl = 48)	3,47 (ddl = 34)	1,92	1,44	1,40	4,29	3,24ns	4,69	5,43	0,57
CV %	10,12	6,53	5,88	6,62	10,95	7,89	10,07	11,15	3,67

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 10. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en eau relative de base (RWC) mesuré à différentes dates et moyenne ( $\overline{RWC}$ ) (essai réalisé en 1991)

Source de variation	Dates												$\overline{RWC}$
	30 mai	3 juin	5 juin	7 juin	10 juin	12 juin	14 juin	17 juin	19 juin	21 juin	24 juin	27 juin	
Régimes (I) (ddl = 1)	90,218*** (ddl = 1) (16,48)	57,735*** (17,69)	89,271*** (40,44)	50,861*** (43,41)	21,776*** (6,97)	197,722*** (63,05)	96,390*** (29,60)	288,708*** (63,86)	289,395 (53,85)	137,871*** (68,63)	451,107*** (59,09)	1135,199*** (48,22)	197,895** * (84,25)
Variétés (G) (ddl = 3)	2,545 ns (ddl = 2) (4,12)	14,384** (13,22)	4,899* (6,66)	3,253** (8,33)	23,747*** (22,80)	7,598*** (7,27)	22,065*** (20,33)	13,448* (8,92)	7,695* (4,30)	1,349* (2,01)	8,539* (3,36)	19,295 ns (2,46)	4,165*** (5,32)
Blocs (B) (ddl = 1)	0,511 ns	1,113	12,979**	3,669*	46,276***	10,472**	2,576 ns	0,521 ns	5,658	3,292**	0,207 ns	21,187 ns	1,038*
G x I (ddl = 3)	16,562** (ddl = 2) (26,83)	16,372** (15,05)	1,141 ns (1,55)	2,162* (5,54)	13,077*** (12,55)	3,815* (3,65)	6,357* (5,86)	2,012 ns (1,34)	4,931 (2,75)	5,376*** (8,03)	12,272** (4,82)	37,345* (4,76)	0,671* (0,86)
I x B (ddl = 1)	0,290 ns (ddl = 1)	6,803	0,002 ns	1,018 ns	0,009 ns	0,235 ns	7,584*	2,980 ns	0,859	1,821*	4,845 ns	26,626 ns	1,872**
G x B (ddl = 3)	0,578 ns (ddl = 2)	2,204	1,435 ns	1,512 ns	8,846**	3,513*	5,626*	2,532 ns	0,281	2,209**	9,523**	87,061***	0,860*
G x I x B (ddl = 3)	2,157 ns (ddl = 2)	7,254	3,166 ns	0,662 ns	5,559*	2,271 ns	1,526 ns	2,052**	12,459	1,921**	28,226***	67,495***	1,509***
Résiduelle (ddl = 64)	1,973 (ddl = 24)	2,190	1,353	0,607	1,418	0,837	1,756	1,559	2,585	0,396	2,057	8,402	0,195
CV %	1,55	1,27	1,27	0,83	1,30	0,95	1,47	1,35	1,74	0,66	1,57	3,24	3,14

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

NB : Les mesures effectuées le 30 mai ne concernent que 3 variétés, tandis que pour les autres dates 4 variétés ont été mesurées.

Tableau 11. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en eau relative midi solaire  $\overline{RWC}$  ms (essai réalisé en 1991)

Source de variation	dates						$\overline{RWC}$ ms
	29 mai	30 mai	3 juin	12 juin	19 juin	26 juin	
Régimes (I) (ddl = 1)	116,9*** (42,91) <sup>1</sup>	279,3*** (48,25) <sup>1</sup>	124,8*** (39,12)	275,4*** (46,68) <sup>1</sup>	754,9*** (76,45)	2626,3*** (ddl = 1) (43,36) <sup>1</sup>	612,078*** (71,01)
Génotypes (G) (ddl = 2)	29,0** (21,29) <sup>1</sup>	28,9 (4,99) <sup>1</sup>	12,5** (3,92) <sup>1</sup>	23,6** (4,00) <sup>1</sup>	5,4 (0,55) <sup>1</sup>	258,0*** (ddl = 3) (12,78) <sup>1</sup>	14,564*** (5,07)
Blocs (B) (ddl = 1)	4,4	35,8	0,8	55,5	38,3	1624,5 (ddl = 1)	87,722
G × I (ddl = 2)	13,8 (5,07) <sup>1</sup>	41,8 (7,22) <sup>1</sup>	33,5*** (10,50) <sup>1</sup>	4,2 (0,71) <sup>1</sup>	12,3 (1,25) <sup>1</sup>	87,7*** (2,90) <sup>1</sup>	5,096 (ddl = 3) (1,77) <sup>1</sup>
I × B (ddl = 1)	0,5	3,2	0,8	8,9	10,4	380,2	13,373 (ddl = 1)
G × B (ddl = 2)	1,7	9,8	4,6	16,7	8,9	97,9	5,300 (ddl = 3)
G × I × B (ddl = 2)	4,4	10,2	6,1	1,4	12,5	200,0	7,171 (ddl = 3)
Résiduelle (ddl = 24)	3,3 (ddl = 16)	15,0 (ddl = 24)	2,0 (ddl = 24)	4,3 (ddl = 32)	5,9 (ddl = 32)	15,4 (ddl = 48)	2,091 (ddl = 32)
CV %	2,19	4,67	1,59	2,37	2,82	4,71	1,69

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 12. Carrés moyens de l'analyse de la variance de NDVI de toutes les dates et de  $\overline{NDVI}$  (essai réalisé en 1991)

Sources de variation	dates												$\overline{NDVI}$
	3 juin	11 Juin	13 Juin	18 Juin	23 Juin	25 Juin	29 Juin	30 Juin	1 Juillet	3 Juillet	7 Juillet	9 Juillet	
Régimes hydriques (I) (ddl = 1)	0,00021ns (1,20) <sup>1</sup>	0,00400*** (18,80) <sup>1</sup>	0,00298*** (13,33) <sup>1</sup>	0,011*** (25,70) <sup>1</sup>	0,147*** (69,83) <sup>1</sup>	0,261*** (78,33) <sup>1</sup>	0,5385*** (81,62) <sup>1</sup>	0,560*** (81,33) <sup>1</sup>	0,475*** (76,77) <sup>1</sup>	0,3368*** (74,53) <sup>1</sup>	0,060*** (41,78) <sup>1</sup>	0,0305*** (38,71) <sup>1</sup>	0,1285*** (78,02) <sup>1</sup>
Variétés (G) (ddl = 5)	0,00122** (34,80) <sup>1</sup>	0,00300*** (70,49) <sup>1</sup>	0,00195*** (43,60) <sup>1</sup>	0,003** (35,05) <sup>1</sup>	0,007*** (16,63) <sup>1</sup>	0,007*** (10,50) <sup>1</sup>	0,0157*** (11,90) <sup>1</sup>	0,016*** (11,62) <sup>1</sup>	0,014** (11,31) <sup>1</sup>	0,0130*** (14,38) <sup>1</sup>	0,009** (31,34) <sup>1</sup>	0,0078*** (49,49) <sup>1</sup>	0,0053*** (16,09) <sup>1</sup>
Blocs (B) (ddl = 3)	0,00056ns	0,0001 ns	0,00007	0,001	0,0003 ns	0,0005 ns	0,0003 ns	0,0014 ns	0,003 ns	0,0014 ns	0,002 ns	0,0002 ns	0,000. ns
Interaction (G * I) (ddl = 5)	0,00042ns (11,98) <sup>1</sup>	0,00007 ns (1,64) <sup>1</sup>	0,00057* (12,75) <sup>1</sup>	0,0006 (7,01) <sup>1</sup>	0,0034* (8,08) <sup>1</sup>	0,0047** (7,05) <sup>1</sup>	0,0055* (4,17) <sup>1</sup>	0,0051** (3,70) <sup>1</sup>	0,009* (7,27) <sup>1</sup>	0,0054** (5,97) <sup>1</sup>	0,002 ns (6,96) <sup>1</sup>	0,0007 ns (4,40) <sup>1</sup>	0,0012 ns (3,64) <sup>1</sup>
I * B (ddl = 3)	0,00003ns	0,00006 ns	0,00018	0,0004	0,0002 ns	0,0008 ns	0,0004 ns	0,0004 ns	0,0008 ns	0,0004 ns	0,0006 ns	0,0001 ns	0,0001 ns
G * B (ddl = 15)	0,00049ns	0,00009 ns	0,00039	0,0006	0,0006 ns	0,0006 ns	0,0008 ns	0,0011 ns	0,001 ns	0,0011 ns	0,0013 ns	0,0003 ns	0,0002 ns
Résiduelle (ddl = 15)	0,00023	0,00010	0,00018	0,0006	0,0010 ns	0,0008 ns	0,0012	0,00114	0,0023	0,0012	0,0013	0,0004	0,0004
CV %	1,83	1,23	1,68	3,10	4,36	1,83	4,76	6,21	10,55	7,80	10,56	5,94	3;26

\*, \*\* et \*\*\* : significatif respectivement à  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et à  $p < 0,001$  ; <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 13. Carrés moyens et de l'analyse de la variance du rendement en grain, de ses composantes, de la biomasse aérienne et de l'indice de récolte (essai réalisé en 1992)

Sources de variation sources	ddl	caractères							
		Rendement en grain	Nombre de pieds/m <sup>2</sup>	Nombre d'épis/m <sup>2</sup>	Nombre de grains/épi	Nombre de grains/m <sup>2</sup>	Poids de 1000 grains	Biomasse aérienne MS (récolte)	Indice de récolte
Variétés (G)	3	136,86** (7,24) <sup>1</sup> (4,2) <sup>2</sup>	3286,99* (36,91) <sup>1</sup> (6,60) <sup>2</sup>	143164,08*** (93,71) <sup>1</sup> (4,7) <sup>2</sup>	157,73*** (64,65) <sup>1</sup> (3,8) <sup>2</sup>	70464048,00*** (20,54) <sup>1</sup> (5,1) <sup>2</sup>	239,12*** (65,28) <sup>1</sup> (1,7) <sup>2</sup>	4169,55 ns (23,19) <sup>1</sup> (21,18) <sup>2</sup>	0,0246* (41,10) <sup>1</sup> (7,72) <sup>2</sup>
Régimes hydriques (I)	2	2121,05** (74,83) <sup>1</sup> (6,2) <sup>2</sup>	500,33 ns (3,75) <sup>1</sup> (3,61) <sup>2</sup>	2251,55 ns (0,98) <sup>1</sup> (8,1) <sup>2</sup>	84,46** (23,08) <sup>1</sup> (5,0) <sup>2</sup>	47489696,00* (13,84) <sup>1</sup> (7,4) <sup>2</sup>	120,30*** (21,93) <sup>1</sup> (2,8) <sup>2</sup>	14851,30* (55,07) <sup>1</sup> (12,81) <sup>2</sup>	0,0403** (44,89) <sup>1</sup> (1,73) <sup>2</sup>
Blocs	2	118,45 ns	2527,00 ns	574,42 ns	8,80 ns	5500640,00 ns	1,95 ns	31,91 ns (ddl = 1)	0,0018 ns (ddl = 1)
Interaction (G*I)	6	81,93** (8,67) <sup>1</sup> (4,3) <sup>2</sup>	297,96 ns (9,15) <sup>1</sup> (7,37) <sup>2</sup>	297,57 ns (0,39) <sup>1</sup> (3,8) <sup>2</sup>	5,45* (4,46) <sup>1</sup> (3,5) <sup>2</sup>	447576,00 ns (0,78) <sup>1</sup> (3,6) <sup>2</sup>	19,28*** (10,53) <sup>1</sup> (3,0) <sup>2</sup>	979,68* (10,90) <sup>1</sup> (7,52) <sup>2</sup>	0,0022 ns (7,35) <sup>1</sup> (6,43) <sup>2</sup>
Erreur G	6	10,62	407,30 ns	843,11	1,73	1114192,00	0,38	1294,96* (ddl = 3)	0,0014 ns (ddl = 3)
Erreur I	4	22,90	121,83 ns	2474,13	2,91	2362646,00	1,12	473,82 ns (ddl = 2)	0,00007 ns (ddl = 2)
Erreur (G*I)	12	11,06	506,85	536,79	1,46	571780,00	1,22	163,41 ns (ddl = 6)	0,00097*** (ddl = 6)

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation

<sup>2</sup> : CV en %

Tableau 14. Carrés moyens de l'analyse de la variance des différents caractères relatifs à la matière sèche à la floraison (essai réalisé en 1992)

Sources de variation sources	ddl	caractères						
		MS tiges (q.ha <sup>-1</sup> )	MS feuilles vertes (q.ha <sup>-1</sup> )	MS épis (q.ha <sup>-1</sup> )	MS feuilles mortes (q.ha <sup>-1</sup> )	MS 1 tige (g)	MS 1 épi (g)	MS biomasse aérienne (q.ha <sup>-1</sup> )
Variétés (G)	3	993,45*** (60,55) <sup>1</sup> (14,37) <sup>2</sup>	50,45 ns (29,03) <sup>1</sup> (27,23) <sup>2</sup>	1101,34** (90,80) <sup>1</sup> (15,74) <sup>2</sup>	233,87** (62,87) <sup>1</sup> (44,05) <sup>2</sup>	2,725** (95,98) <sup>1</sup> (11,93) <sup>2</sup>	0,3086* (89,90) <sup>1</sup> (16,05) <sup>2</sup>	1281,35*** (52,01) <sup>1</sup> (0,40) <sup>2</sup>
Régimes hydrique (I)	2	319,29 ns (12,97) <sup>1</sup> (2,20) <sup>2</sup>	42,38 ns (16,26) <sup>1</sup> (13,15) <sup>2</sup>	12,75 ns (0,70) <sup>1</sup> (24,54) <sup>2</sup>	12,20 ns (0,50) <sup>1</sup> (34,33) <sup>2</sup>	0,069 ns (1,62) <sup>1</sup> (14,75) <sup>2</sup>	0,0033 ns (0,64) <sup>1</sup> (43,53) <sup>2</sup>	675,07 ns (18,27) <sup>1</sup> (13,48) <sup>2</sup>
Blocs	1	630,66 ns	64,59 ns	132,20 ns	7,15 ns	0,050 ns	0,0216 ns	1522,60 ns
Interaction (G*I)	6	51,76 ns (1,69) <sup>1</sup> (8,03) <sup>2</sup>	13,85 ns (15,94) <sup>1</sup> (14,65) <sup>2</sup>	3,15 ns (24,54) <sup>1</sup> (14,23) <sup>2</sup>	23,17 ns (0,52) <sup>1</sup> (100,45) <sup>2</sup>	0,004 ns (12,46) <sup>1</sup> (109,00) <sup>2</sup>	0,0021 ns (0,28) <sup>1</sup> (31,17) <sup>2</sup>	142,96 ns (11,61) <sup>1</sup> (5,09) <sup>2</sup>
Erreur G	3	2,15 ns	6,43 ns	29,54 ns	4,35 ns	0,026*	0,0184***	0,20 ns
Erreur I		91,79 ns	27,57 ns	12,16 ns	7,16 ns	0,017*	0,0025 ns	235,99*
Erreur (G*I)	6	28,69 ns	10,53*	7,53 ns	37,26***	0,003 ns	0,0005 ns	33,59 ns

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation, <sup>2</sup> : CV en %

Tableau 15. Carrés moyens de l'analyse de la variance des différents caractères relatifs à la matière sèche à la récolte (essai réalisé en 1992)

Sources de variation sources	ddl	caractères			
		MS tiges (q.ha <sup>-1</sup> )	MS feuille (q.ha <sup>-1</sup> )	MS balles (q.ha <sup>-1</sup> )	MS 1 tige
Variétés (G)	3	871,23* (60,27) <sup>1</sup> (19,37) <sup>2</sup>	173,35 ns (45,21) <sup>1</sup> (19,65) <sup>2</sup>	232,80* (36,25) <sup>1</sup> (23,99) <sup>2</sup>	0,904*** (81,83) <sup>1</sup> (7,86) <sup>2</sup>
Régimes hydriques (I)	2	336,61 ns (15,52) <sup>1</sup> (15,57) <sup>2</sup>	7,60 ns (1,32) <sup>1</sup> (4,04) <sup>2</sup>	169,19 ns (7,80) <sup>1</sup> (42,80) <sup>2</sup>	0,0467 ns (2,82) <sup>1</sup> (28,68) <sup>2</sup>
Blocs	1	30,14 ns	313,92 ns	8,61 ns	0,035 ns
Interaction (G*I)	6	69,81 ns (1,89) <sup>1</sup> (13,79) <sup>2</sup>	13,69 ns (7,14) <sup>1</sup> (21,18) <sup>2</sup>	85,27 ns (26,54) <sup>1</sup> (37,12) <sup>2</sup>	0,013 ns (2,35) <sup>1</sup> (15,14) <sup>2</sup>
Erreur G	3	81,89 ns	21,80 ns	15,95 ns	0,0035 ns
Erreur I	2	52,95	0,92 ns	50,74 ns	0,0096 ns
Erreur (G*I)	6	41,53 ns	25,31**	38,16***	0,0061***

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation, <sup>2</sup> : CV en %

Tableau 16. Carrés moyens de l'analyse de la variance des assimilats provenant de la tige (remobilisation) et ceux provenant de la photosynthèse nette (translocation) (essai réalisé en 1992)

Caractères	Sources de variation						
	Variété (G) (ddl = 3)	Irrigation (I) (ddl = 2)	Blocs (ddl = 1)	Interaction (G*I) (ddl = 6)	Résiduelle G (ddl = 3)	Résiduelle I (ddl = 2)	Résiduelle G * I (ddl = 6)
Remobilisation	90,192 ns (4,63) <sup>1</sup> (70,71) <sup>2</sup>	1319,023* (45,15) <sup>1</sup> (20,29) <sup>2</sup>	1223,691	84,002 ns (8,63) <sup>1</sup> (21,13) <sup>2</sup>	325,979	26,851	29,115
Translocation	90,192 ns (4,63) <sup>1</sup> (24,25) <sup>2</sup>	1319,023* (45,15) <sup>1</sup> (6,95) <sup>2</sup>	1223,691	84,002 ns (8,63) <sup>1</sup> (7,25) <sup>2</sup>	325,979	26,851	29,115

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement,  
<sup>1</sup> : % de variation, <sup>2</sup> : CV en %

Tableau 17. Carrés moyens de l'analyse de la variance du LAI à différentes dates (essai réalisé en 1992)

Sources de variation sources	ddl	dates			
		18 Mai	1 Juin	15 Juin	25 Juin
Variétés (G)	3	0,628* (15,57) <sup>1</sup> (4,47) <sup>2</sup>	0,905 ns (16,36) <sup>1</sup> (9,70) <sup>2</sup>	2,225 ns (18,06) <sup>1</sup> (23,84) <sup>2</sup>	0,259 ns (8,60) <sup>1</sup> (86,60) <sup>2</sup>
Régimes hydriques (I)	2	3,722* <b>(61,51)</b> <sup>1</sup> (7,94) <sup>2</sup>	6,042** <b>(72,80)</b> <sup>1</sup> (4,70) <sup>2</sup>	12,667* <b>(68,55)</b> <sup>1</sup> (30,57) <sup>2</sup>	2,836* <b>(62,78)</b> <sup>1</sup> (84,73) <sup>2</sup>
Blocs	1	0,429	0,034	1,41	0,083
Interaction (G*I)	6	0,242 ns (12,00) <sup>1</sup> (4,76) <sup>2</sup>	0,197* (7,12) <sup>1</sup> (4,72) <sup>2</sup>	0,200 ns (3,25) <sup>1</sup> (15,01) <sup>2</sup>	0,259 ns (17,20) <sup>1</sup> (86,60) <sup>2</sup>
Erreur G	3	0,055	0,122	0,270	0,087
Erreur I	2	0,175	0,022	0,444	0,083
Erreur (G*I)	6	0,063	0,029	0,107	0,087

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement, <sup>1</sup> : % de variation, <sup>2</sup> : CV en %.

Tableau 18. Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'eau consommée du stade un nœud- floraison et stade 1 nœud- maturité (essai réalisé en 1992)

Sources de variation sources	ddl	Consommation de l'eau par la culture	
		Stade 1 nœud- floraison	Stade 1 nœud- maturité
Régimes hydriques (I)	2	967,78 ns (28,37) <sup>1</sup> (8,2) <sup>2</sup>	36206,02*** (91,38) <sup>1</sup> (2,2) <sup>2</sup>
Variétés (G)	3	424,12* (18,45) <sup>1</sup> (3,02) <sup>2</sup>	606,89 ns (2,30) <sup>1</sup> (5,7) <sup>2</sup>
Blocs	2	742,59	194,11
Interaction (G*I)	6	208,64 ns (18,16) <sup>1</sup> (6,7) <sup>2</sup>	214,81 ns (1,63) <sup>1</sup> (3,9) <sup>2</sup>
Erreur G	6	35,76	272,56
Erreur I	4	262,16	42,32
Erreur (G*I)	12	176,74	127,43

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement ; <sup>1</sup> : % de variation, <sup>2</sup> : CV en %.

Tableau 19. Carrés moyens de l'analyse de la variance du potentiel hydrique foliaire de base ( $\psi$ ) mesuré à différentes dates (essai réalisé en 1992)

Source de variation	Dates											
	9 mai	9 Mai	13 mai	13 Mai	17 Mai	19 Mai	22 mai	26 mai	2 Juin	5 Juin	10 Juin	10 Juin
Régime (I) (ddl = 1)	959,42*** (77,96) <sup>1</sup>	-	18,77** (7,27) <sup>1</sup>	-	26,57*** (ddl = 2)	464,70*** (74,44) <sup>1</sup>	467,72*** (85,83) <sup>1</sup>	450,76*** (54,10) <sup>1</sup>	817,13*** (42,82) <sup>1</sup> (ddl = 2)	1102,20*** (68,42) <sup>1</sup> (ddl = 2)	1508,04*** (71,03) <sup>1</sup>	-
Variété (G) (ddl = 3)	23,635** (5,76) <sup>1</sup>	0,036 ns (ddl = 1)	49,74*** (57,83) <sup>1</sup>	13,92*** (ddl = 1)	-	15,88** (7,63) <sup>1</sup>	9,14** (5,03) <sup>1</sup>	68,29*** (24,59) <sup>1</sup>	69,26** (10,89) <sup>1</sup>	119,41*** (11,12) <sup>1</sup> (ddl = 3)	0,54 ns (0,051) <sup>1</sup> (ddl = 2)	66,53** (ddl = 2)
G x I (ddl = 3)	26,52*** (6,46) <sup>1</sup>	-	4,44 ns (5,16) <sup>1</sup>	-	-	8,51* (4,09) <sup>1</sup>	0,94 (0,52) <sup>1</sup>	16,67** (6,00) <sup>1</sup>	24,09 ns (3,79) <sup>1</sup> (ddl = 6)	37,21** (6,93) <sup>1</sup> (ddl = 6)	4,91 ns (0,46) <sup>1</sup> (ddl = 2)	-
Résiduelle	3,776 (ddl = 32)	0,826 (ddl = 8)	2,40 (ddl = 32)	0,53 (ddl = 8)	0,94 (ddl = 14)	2,54 (ddl = 34)	1,38 (ddl = 34)	3,75 (ddl = 34)	14,23 (ddl = 57)	9,08 (ddl = 48)	25,17 (ddl = 24)	5,99 (ddl = 12)
CV %	23,18	21,33	23,58	12,77	14,65	20,61	16,78	23,25	36,91	28,56	36,35	18,04

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$  et  $P < 0,001$  respectivement, <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 20. Carrés moyens de l'analyse de la variance du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi_{ms}$ ) mesuré à différentes dates et moyennes ( $\bar{\psi}_{ms}$ ) (essai réalisé en 1992)

Sources de variation	Dates						
	15 Mai R2 4V	17 Mai 2R 4V	19 Mai R1 2V	22 Mai R1 2V	29 Mai R1 3V	2 Juin R1 3V	2 Juin R1 4 Var.
Régimes (I) (ddl = 1)		108,92*** (47,46) <sup>1</sup>					
Variétés (G)	55,25*** (ddl = 3)	18,88*** (24,68) <sup>1</sup> (ddl = 3)	0,016 ns (ddl = 1)	0,361 (ddl = 1)	14,408*** (ddl = 2)	6,846* (ddl = 2)	22,142*** (ddl = 3)
G x I		4,99** (6,52) <sup>1</sup> (ddl = 3)					
Résiduelle	1,07 (ddl = 38)	1,02 (ddl = 48)	1,520 (ddl = 8)	1,321 (ddl = 8)	0,644 (ddl = 12)	1,761 (ddl = 12)	1,502 (ddl = 16)
CV %	4,98	5,29	6,38	6,64	3,87	6,51	6,30

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$  et  $P < 0,001$  respectivement, <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 21. Carrés moyens de l'analyse de la variance du potentiel hydrique foliaire midi solaire ( $\psi_{ms}$ ) mesuré à différentes dates et moyennes ( $\bar{\psi}_{ms}$  suite) (essai réalisé en 1992)

Sources de variation	Dates								
	13 Mai	15 Mai	19 Mai	22 Mai	26 Mai	29 Mai	2 Juin	5 Juin	16 Juin
Régimes (I) (ddl = 1)	52,44*** (44,34) <sup>1</sup>	86,14*** (32,82) <sup>1</sup>	182,76*** (62,55) <sup>1</sup>	225,15*** (45,18) <sup>1</sup>	545,38*** (54,32) <sup>1</sup>	1060,90*** (68,35) <sup>1</sup>	976,14*** (57,72) <sup>1</sup>	1102,20*** (59,17) <sup>1</sup>	28,90 ns (4,91) <sup>1</sup>
Variétés (G) (ddl = 3)	5,99** (15,20) <sup>1</sup>	39,31*** (44,94) <sup>1</sup>	21,84*** (22,42) <sup>1</sup>	58,90*** (35,46) <sup>1</sup>	102,44*** (30,61) <sup>1</sup>	91,97*** (17,78) <sup>1</sup>	35,36* (6,27) <sup>1</sup>	119,41*** (19,23) <sup>1</sup>	53,06** (27,06) <sup>1</sup>
G x I (ddl = 3)	1,55 ns (3,93) <sup>1</sup>	4,83* (5,52) <sup>1</sup>	4,07* (4,18) <sup>1</sup>	13,70*** (8,25) <sup>1</sup>	29,79*** (8,90) <sup>1</sup>	47,66*** (9,21) <sup>1</sup>	104,94*** (18,62) <sup>1</sup>	37,21** (5,99) <sup>1</sup>	28,57* (14,57) <sup>1</sup>
Résiduelle (ddl = 32)	1,35	1,37	0,99	1,73	1,97	2,26	9,19	9,08	9,83
CV %	6,95	5,97	4,64	6,52	6,17	6,63	14,05	17,77	15,02

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement, <sup>1</sup> : % de variation.

Tableau 22. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en eau relative de base (RWC) mesuré à différentes dates (essai réalisé en 1992)

Source de variation	Dates							
	13 Mai 2R 4V	13 Mai 3R 3V	17 Mai 2R 2V	19 Mai 2R 4V	19 Mai 3R 2V	22 Mai 2R 4V	22 Mai 3R 2V	26 Mai 2R 4V
Régimes (I)	25,5*** (49,23) <sup>1</sup> (ddl = 1)	6,8* (33,17) <sup>1</sup> (ddl = 2)	6,1 ns (12,58) <sup>1</sup> (ddl = 1)	68,8*** (61,54) <sup>1</sup> (ddl = 1)	14,9*** (34,58) <sup>1</sup> (ddl = 2)	104,2*** (67,57) <sup>1</sup> (ddl = 1)	21,1*** (47,85) <sup>1</sup> (ddl = 2)	74,9*** (45,87) <sup>1</sup> (ddl = 1)
Variétés (G)	5,0* (9,65) <sup>1</sup> (ddl = 3)	6,5* (30,79) <sup>1</sup> (ddl = 2)	6,0 ns (12,37) <sup>1</sup> (ddl = 1)	10,9*** (29,25) <sup>1</sup> (ddl = 3)	49,1*** (57,16) <sup>1</sup> (ddl = 1)	10,8*** (21,08) <sup>1</sup> (ddl = 3)	38,8*** (43,89) <sup>1</sup> (ddl = 1)	16,1*** (29,58) <sup>1</sup> (ddl = 3)
G x I	1,3 ns (7,53) <sup>1</sup> (ddl = 3)	1,1 ns (10,26) <sup>1</sup> (ddl = 4)	0,0 ns (0) <sup>1</sup> (ddl = 1)	1,5* (4,11) <sup>1</sup> (ddl = 3)	0,8 ns (1,86) <sup>1</sup> (ddl = 2)	1,7 ns (3,37) <sup>1</sup> (ddl = 3)	1,6* (3,51) <sup>1</sup> (ddl = 2)	6,1* (11,21) <sup>1</sup> (ddl = 3)
Résiduelle	0,9 (ddl = 8)	1,2 (ddl = 9)	3,1 (ddl = 12)	0,3 (ddl = 16)	0,4 (ddl = 12)	0,8 (ddl = 16)	0,4 (ddl = 12)	1,4 (ddl = 16)
CV %	1,00	1,16	1,91	0,58	0,67	0,95	0,66	1,28

NB : Les mesures effectuées le 30 mai ne concernent que 3 variétés, tandis que pour les autres dates 4 variétés ont été mesurées.

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation

R et V = régime et variété respectivement

Tableau 23. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en eau relative de base (RWC) mesuré à différentes dates (essai réalisé en 1992)

Source de variation	Dates						
	26 Mai 3R 2V	29 Mai 2R 4V	29 Mai 3R 2V	2 Juin 3R 4V	5 Juin 3R 2V	10 Juin 3R 4V	16 Juin 2R 4V
Régimes (I)	29,3*** (51,18) <sup>1</sup> (ddl = 2)	145,4*** (71,31) <sup>1</sup> (ddl = 1)	39,6*** (84,96) <sup>1</sup> (ddl = 2)	106,4*** (82,19) <sup>1</sup> (ddl = 2)	90,1*** (91,11) <sup>1</sup> (ddl = 2)	226,9*** (70,89) <sup>1</sup> (ddl = 2)	76,3*** (66,58) <sup>1</sup> (ddl = 1)
Variétés (G)	35,8*** (31,27) <sup>1</sup> (ddl = 1)	8,9*** (13,08) <sup>1</sup> (ddl = 3)	4,2** (4,5) <sup>1</sup> (ddl = 1)	6,3*** (7,30) <sup>1</sup> (ddl = 3)	14,1*** (7,12) <sup>1</sup> (ddl = 1)	18,3*** (8,58) <sup>1</sup> (ddl = 3)	6,1*** (15,88) <sup>1</sup> (ddl = 3)
G x I	2,4 ns (4,10) <sup>1</sup> (ddl = 2)	7,6*** (11,18) <sup>1</sup> (ddl = 3)	2,5* (5,37) <sup>1</sup> (ddl = 2)	3,4*** (7,96) <sup>1</sup> (ddl = 6)	0,5 ns (0,56) <sup>1</sup> (ddl = 2)	18,3*** (17,15) <sup>1</sup> (ddl = 6)	4,4*** (11,61) <sup>1</sup> (ddl = 3)
Résiduelle	1,3 (ddl = 12)	0,6 (ddl = 16)	0,4 (ddl = 12)	0,3 (ddl = 24)	0,2 (ddl = 12)	0,9 (ddl = 24)	0,4 (ddl = 16)
CV %	1,23	0,84	0,67	0,58	0,49	1,04	0,68

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation

R et V = régime et variété respectivement

Tableau 24. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en eau relative midi solaire *RWC* ms (essai réalisé en 1992)

Source de variation	dates						
	29 mai 3R 4V	2 Juin 3R 4V	5 juin 2R 4V	16 Juin 3R 4V	13 Mai 2R + 4 V	13 Mai 3 R +2 V	15 mai 2R 4V
Régimes (I)	403,3*** <b>(79,84)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)	643,3*** <b>(72,05)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)	403,2*** <b>(67,80)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)	670,3*** <b>(65,99)<sup>1</sup></b> (ddl = 1)	20,9** (21,35) <sup>1</sup> (ddl = 1)	9,23 ns (27,79) <sup>1</sup> (ddl = 2)	105,0*** <b>(72,41)<sup>1</sup></b> (ddl = 1)
Génotype (G)	25,6*** (7,61) <sup>1</sup> (ddl = 3)	55,5*** (9,32) <sup>1</sup> (ddl = 3)	47,9*** (12,02) <sup>1</sup> (ddl = 3)	17,3*** (5,12) <sup>1</sup> (ddl = 3)	13,3* <b>(40,86)<sup>1</sup></b> (ddl = 3)	21,53* <b>(32,41)<sup>1</sup></b> (ddl = 1)	1,7 ns (3,52) <sup>1</sup> (ddl = 3)
G × I	15,6*** (9,28) <sup>1</sup> (ddl = 6)	50,4** (16,94) <sup>1</sup> (ddl = 6)	20,7** (10,37) <sup>1</sup> (ddl = 6)	94,1*** (27,78) <sup>1</sup> (ddl = 3)	7,6* (23,19) <sup>1</sup> (ddl = 3)	7,34 ns (22,10) <sup>1</sup> (ddl = 2)	0,4 ns (0,76) <sup>1</sup> (ddl = 16)
Résiduelle	1,4 (ddl = 24)	1,3 (ddl = 24)	5,0 (ddl = 24)	0,7 (ddl = 16)	1,8 (ddl = 8)	1,96 (ddl = 6)	2,1 (ddl = 23)
CV %	1,38	1,27	2,55	1,00	1,52	1,59	1,65

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation

R et V = régime et variété respectivement

Tableau 25. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en eau relative midi solaire *RWC* ms (essai réalisé en 1992)

Source de variation	dates								
	17 mai 2R 4V	19 mai 2R 4V	22 mai 2R 4V	26 mai 2R 4V	15 Mai 3R 2V	17 Mai 3R 2V	19 Mai 3R 2V	22 Mai 3R 2V	26 Mai 3R 3V
Régimes (I)	169,1*** <b>(74,69)<sup>1</sup></b> (ddl = 1)	369,3*** <b>(69,47)<sup>1</sup></b> (ddl = 1)	271,8*** <b>(75,88)<sup>1</sup></b> (ddl = 1)	748,7*** <b>(89,33)<sup>1</sup></b> (ddl = 1)	28,7*** (36,05) <sup>1</sup> (ddl = 2)	35,3*** <b>(85,66)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)	64,5*** <b>(76,71)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)	81,4*** <b>(68,71)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)	315,0*** <b>(82,98)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)
Génotype (G)	7,1** (3,14) <sup>1</sup> (ddl = 3)	6,9** (3,89) <sup>1</sup> (ddl = 3)	10,9*** (9,10) <sup>1</sup> (ddl = 3)	9,5** (3,39) <sup>1</sup> (ddl = 3)	15,9** (9,97) <sup>1</sup> (ddl = 1)	1,1 ns (1,34) <sup>1</sup> (ddl = 1)	3,5 ns (2,08) <sup>1</sup> (ddl = 1)	37,5*** (15,82) <sup>1</sup> (ddl = 1)	30,2*** (7,96) <sup>1</sup> (ddl = 2)
G × I	5,5* (2,43) <sup>1</sup> (ddl = 3)	41,0*** (23,12) <sup>1</sup> (ddl = 3)	14,6*** (12,20) <sup>1</sup> (ddl = 3)	12,2*** (4,38) <sup>1</sup> (ddl = 3)	35,5*** <b>(44,45)<sup>1</sup></b> (ddl = 2)	1,1 ns (2,79) <sup>1</sup> (ddl = 2)	11,0 ** (13,07) <sup>1</sup> (ddl = 2)	15,1*** (12,74) <sup>1</sup> (ddl = 2)	10,5** (5,52) <sup>1</sup> (ddl = 4)
Résiduelle	1,2 (ddl = 16)	1,2	0,6 (ddl = 16)	1,5 (ddl = 16)	1,3 (ddl = 12)	0,7 (ddl = 12)	1,1 (ddl = 12)	0,5 (ddl = 12)	1,5 (ddl = 18)
CV %	1,23	1,29	0,89	1,47	1,29	1,16	1,21	0,80	1,45

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation

R et V = régime et variété respectivement

Tableau 26. Carrés moyens de l'analyse de la variance de NDVI du 9 au 22 Juin (essai réalisé en 1992)

Sources de variation	dates						
	9 juin	11 Juin	15 Juin	17 Juin	18 Juin	20 Juin	22 Juin
Régimes hydrique (I) (ddl = 2)	0,0579*** (66,06) <sup>1</sup> (3,45) <sup>2</sup>	0,0845*** (72,61) <sup>1</sup> (2,66) <sup>2</sup>	0,2441*** (85,69) <sup>1</sup> (4,75) <sup>2</sup>	0,3098*** (84,89) <sup>1</sup> (4,68) <sup>2</sup>	0,3245*** (84,89) <sup>1</sup> (7,44) <sup>2</sup>	0,3163*** (84,89) <sup>1</sup> (3,32) <sup>2</sup>	0,30522*** (88,74) <sup>1</sup> (15,54) <sup>2</sup>
Variétés (G) (ddl = 3)	0,0046*** (7,94) <sup>1</sup> (3,45) <sup>2</sup>	0,0058*** (7,43) <sup>1</sup> (2,97) <sup>2</sup>	0,0116*** (6,09) <sup>1</sup> (5,97) <sup>2</sup>	0,0177*** (7,28) <sup>1</sup> (4,68) <sup>2</sup>	0,0194*** (7,28) <sup>1</sup> (3,51) <sup>2</sup>	0,0119*** (7,28) <sup>1</sup> (5,75) <sup>2</sup>	0,01073*** (4,67) <sup>1</sup> (7,43) <sup>2</sup>
Blocs (B) (ddl = 2)	0,0001	0,0004	0,0018*	0,0024*	0,0028*	0,0018	0,00202**
Interaction (G * I) (ddl = 6)	0,0059*** (20,10) <sup>1</sup> (2,26) <sup>2</sup>	0,0064*** (16,46) <sup>1</sup> (1,88) <sup>2</sup>	0,0043*** (4,48) <sup>1</sup> (3,08) <sup>2</sup>	0,0063*** (5,17) <sup>1</sup> (3,88) <sup>2</sup>	0,0069*** (5,17) <sup>1</sup> (3,92) <sup>2</sup>	0,0070*** (5,17) <sup>1</sup> (5,12) <sup>2</sup>	0,00498*** (4,34) <sup>1</sup> (3,11) <sup>2</sup>
Erreur I (ddl = 4)	0,0007	0,0004	0,00095	0,0008	0,0018*	0,0003	0,00006
Erreur G (ddl = 6)	0,0007	0,0005	0,0015*	0,0008	0,0004	0,0009	0,00137**
Erreur (G*I) (ddl = 12)	0,0003	0,0002	0,00040	0,00055	0,0005	0,00065	0,00024

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation, <sup>2</sup> : CV en %

Tableau 27. Carrés moyens de l'analyse de la variance de NDVI du 24 au 28 Juin et du 2 et 15 Juillet et  $\overline{NDVI}$  (essai réalisé en 1992)

Sources de variation	Dates						$\overline{NDVI}$
	24 Juin	26 Juin	27 Juin	28 Juin	2 Juillet	15 Juillet	
Régimes hydrique (I) (ddl = 2)	0,2173*** (84,67) <sup>1</sup> (6,05) <sup>2</sup>	0,1466*** (77,10) <sup>1</sup> (10,63) <sup>2</sup>	0,1133*** (78,10) <sup>1</sup> (6,13) <sup>2</sup>	0,0616*** (71,98) <sup>1</sup> (4,70) <sup>2</sup>	0,0057*** (17,20) <sup>1</sup> (6,10) <sup>2</sup>	0,0028*** (28,12) <sup>1</sup> (5,67) <sup>2</sup>	0,1125*** (84,03) <sup>1</sup> (2,13) <sup>2</sup>
Variétés (G) (ddl = 3)	0,0112*** (6,52) <sup>1</sup> (8,25) <sup>2</sup>	0,0094** (7,38) <sup>1</sup> (6,31) <sup>2</sup>	0,0093*** (9,59) <sup>1</sup> (8,66) <sup>2</sup>	0,0104*** (18,19) <sup>1</sup> (5,83) <sup>2</sup>	0,0142*** (63,66) <sup>1</sup> (4,98) <sup>2</sup>	0,0025*** (47,97) <sup>1</sup> (5,32) <sup>2</sup>	0,0078*** (8,72) <sup>1</sup> (3,02) <sup>2</sup>
Blocs (B) (ddl = 2)	0,0022***	0,0026	0,0019	0,0013**	0,0007*	0,00002	0,0010
Interaction (G * I) (ddl = 6)	0,0048*** (5,59) <sup>1</sup> (3,24) <sup>2</sup>	0,0054** (8,45) <sup>1</sup> (7,94) <sup>2</sup>	0,0032** (6,53) <sup>1</sup> (6,13) <sup>2</sup>	0,0016*** (5,61) <sup>1</sup> (3,06) <sup>2</sup>	0,0013** (11,26) <sup>1</sup> (4,01) <sup>2</sup>	0,00022 (7,52) <sup>1</sup> (4,35) <sup>2</sup>	0,0024*** (5,43) <sup>1</sup> (2,13) <sup>2</sup>
Erreur I (ddl = 4)	0,0007	0,0017	0,0005	0,00026	0,0003	0,00017	0,0001
Erreur G (ddl = 6)	0,0013	0,0006	0,0010	0,0004	0,0002	0,00015	0,0002
Erreur (G*I) (ddl = 12)	0,0002	0,00095	0,0005	0,00011	0,00013	0,00010	0,0001

\*, \*\*, \*\*\* = significatif à P<0,05, P<0,01 et P<0,001 respectivement

<sup>1</sup> : % de variation

<sup>2</sup> : coefficient de variation %

## ANNEXE 2

Tableau 1. Moyennes du rendement, des composantes du rendement et de l'indice de récolte

génotypes	épis/m <sup>2</sup>	épillets Totaux	épillets Fertiles	Nombre de grains/épi	Poids de 1000 grains	Rendement en grain	Indice de récolte
Ardente	476,94 abcde	17,98 cdef	17,24	50,19 bcd	51,44 cde	80,57 ab	0,400 abc
Ardente x Saadi L3	510,00 abc	17,81 cdef	16,52	41,49 defg	<b>59,84 a</b>	62,59 cd	0,327 cd
Ardente x Siméto L1	<b>388,06 e</b>	20,36 b	<b>18,68</b>	50,58 bc	53,74 cd	68,06 abcd	0,354 bcd
Ardente x Siméto L4	416,94 cde	18,19 cd	16,31	42,82 defg	56,82 ab	66,46 bcd	0,402 abc
Ardente x Vitron L1	491,39 abcde	18,17 cd	16,87	46,78 cdef	50,07 de	70,56 abcd	0,355 bcd
Ardente x Waha L1	475,28 abcde	18,33 cd	15,34	47,30 cdef	55,42bcd	<b>83,25 a</b>	0,383 abcd
Ardente x Waha L2	421,11 cde	<b>22,87 a</b>	16,72	<b>56,27 a</b>	53,04 cd	76,08 abc	0,304 d
Saadi	<b>566,11 a</b>	18,04 cde	16,58	40,88 defg	<b>47,17 e</b>	63,49 bcd	<b>0,297 d</b>
Saadi x Siméto L3	454,17 bcde	17,17 def	16,13	39,84 efg	55,77 bc	<b>57,18 d</b>	0,348 bcd
Saadi x Waha L3	506,39 abcd	17,20 def	15,84	39,67 fg	51,17 cde	58,84 cd	0,350 bcd
Saadi x Waha L6	543,33 ab	17,31 def	16,29	<b>36,50 g</b>	52,86 cd	59,62 cd	0,332 cd
Saadi x Waha L7	430,83 cde	18,37 cd	17,6	45,08 cdef	52,63 cd	66,47 bcd	<b>0,459 a</b>
Siméto	462,78 abcde	19,01 c	17,3	47,52 cde	53,37 cd	74,29 abcd	0,382 abcd
Siméto x Vitron L5	397,78 de	18,08 cde	15,57	55,23 ab	51,46 cde	71,66 abcd	0,435 ab
Siméto x Vitron L6	446,94 bcde	<b>16,44 f</b>	<b>14,07</b>	47,70 cd	53,99 cd	65,69 bcd	0,437 ab
Vitron	513,61 abc	16,50 ef	15,26	41,24 defg	51,89 cde	65,09 bcd	0,377 abcd
Waha	470,00 abcde	17,60 cdef	16,5	44,54 cdef	50,99 cde	64,79 bcd	0,442 ab

Tableau 2. Moyennes des caractères morphologiques et phénologiques

géotype	haut	col de l'épi	Lépi	Lbarbes	Epiaison	Floraison
Ardente	71,43 def	18,83 bcde	6,54 ef	12,01 bc	99,56 bcde	105,33 cde
Ardente x Saadi L3	71,21 ef	<b>14,78 h</b>	6,56 ef	10,33 e	102,33 b	108,78 b
Ardente x Siméto L1	73,50 bcde	18,05 cdefg	<b>7,60 a</b>	10,72 e	102,56 b	106,00 bcde
Ardente x Siméto L4	73,04 bcde	17,48 cdefg	6,52 ef	12,42 ab	97,78 def	104,11 def
Ardente x Vitron L1	73,33 bcde	18,65 cdef	6,85 cdef	11,23 cde	97,78 def	103,11 ef
Ardente x Waha L1	80,58 b	<b>20,49 a</b>	6,72 def	10,85 e	99,00 cde	106,00 bcde
Ardente x Waha L2	<b>84,78 a</b>	17,65 cdefg	7,57 a	10,53 e	<b>109,56 a</b>	<b>111,00 a</b>
Saadi	72,13 cdef	16,20 g	6,78 cdef	10,43 e	<b>93,78 g</b>	99,89 g
Saadi x Siméto L3	73,68 bcde	20,00 ab	6,45f	11,82 cd	98,89 cde	105,67 bcde
Saadi x Waha L3	74,15 bcde	17,67 cdefg	6,59 ef	10,77 e	100,78 bcd	106,33 bcd
Saadi x Waha L6	<b>67,90 g</b>	16,33 g	<b>5,92 g</b>	<b>10,22 e</b>	97,33 def	103,33 ef
Saadi x Waha L7	74,17 bcde	18,85 bcd	7,43 ab	11,83 bcd	95,22 fg	105,33 cdef
Siméto	71,15 efg	17,09 efg	6,90 cdef	10,59 e	98,22 cdef	103,56 def
Siméto x Vitron L5	78,03 bc	18,12 cdefg	7,20 bc	12,79 a	101,44 b	107,11 bc
Siméto x Vitron L6	77,26 bcd	19,18 abc	6,56 ef	<b>13,15 a</b>	100,00 bcd	106,78 bcd
Vitron	76,71 bcde	17,00 efg	7,05 cd	10,88 e	96,22 efg	<b>102,56 f</b>
Waha	69,87 fg	16,76 fg	6,99 cde	11,03 de	96,22 efg	103,33 ef

## **<sup>2</sup>Tolérance au déficit hydrique et stabilité du rendement en grain chez le blé (*Triticum durum* Desf. et *Triticum aestivum* L.).**

### **Résumé**

La première partie s'intéresse aux méthodes de discrimination de différents génotypes de blé par application de différents stress hydriques, tandis que la deuxième partie étudie la stabilité du rendement en grain et les différentes méthodes permettant de mettre en évidence cette dernière.

Dans la première partie, six variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en 1991 et quatre variétés dont une de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en 1992 ont été étudiées à deux (1991) et trois régimes hydriques (1992) : irrigué à l'ETM, arrêt de l'irrigation à partir de la floraison (R1) et arrêt de l'irrigation à partir du stade gonflement (R2) au Magneraud (France). Les caractères évalués sont le rendement en grain, ses composantes, l'indice de récolte, la matière sèche de différents organes de la plante, la translocation et la remobilisation des assimilats, l'indice de sensibilité au stress (SSI), l'indice foliaire (LAI), la sénescence de la feuille étendard, le potentiel hydrique foliaire, la teneur en eau relative, la consommation en eau par la culture, la disponibilité de l'eau dans le sol et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI).

L'analyse de la variance a révélé des différences significatives entre les régimes et les variétés pour tous les caractères à l'exception du régime hydrique pour le poids de 1000 grains (1991). L'interaction variété  $\times$  régime était significative pour le rendement en grain, le poids de 1000 grains, la biomasse à la récolte, l'indice de récolte et la NDVI en 1992 et pour le rendement en grain en 1991. Concernant le potentiel hydrique foliaire et la teneur en eau relative, la signification de l'interaction dépend des dates de mesure.

L'effet régime hydrique explique plus la variation observée des différents caractères par rapport à l'effet variété pour les deux essais et pour la majorité des caractères à l'exception des caractères relatifs à la plante de l'essai 1991 où l'effet variété est supérieur à l'effet régime hydrique. Les stress hydriques modéré et sévère ont provoqué une réduction des disponibilités de l'eau dans le sol, une augmentation du potentiel hydrique foliaire et une réduction de tous les caractères relatifs à la plante. La translocation a été réduite au profit de la remobilisation sous l'effet du stress hydrique. La diminution du LAI provoquée par la sénescence précoce des feuilles due au stress hydrique a entraîné une réduction de la différence normalisée (NDVI).

Pour tous les caractères, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) a donné les réductions les plus élevées dans les conditions de stress par rapport au blé tendre (*Triticum aestivum* L.).

L'étude des corrélations révèle que le rendement en grain, le nombre de grains/m<sup>2</sup>, le poids de 1000 grains et la NDVI étaient corrélés à l'exception des corrélations entre d'une part le poids de 1000 grains et d'autre part le rendement en grain (1992) et le nombre de grains/m<sup>2</sup> (1991). 51,55 %, 27,88 %, 4,12 % (1991) et 75 %, 43 % et 20,2 % (1992) de la variabilité du rendement en grain, du nombre de grains et du poids de 1000 grains sont expliqués par la variabilité de NDVI. 69,75 %, 52,37 %, 28,4 % et 23,20 % de la variabilité de NDVI, du rendement en grain, du poids de 1000 grains et du nombre de grains/m<sup>2</sup> sont expliqués par la variabilité du LAI.

Dans la deuxième partie, une évaluation de la performance et de la stabilité de 17 génotypes de blé dur au cours de trois campagnes agricoles sous conditions humides au nord (Alger) a été étudiée. Les résultats ont montré une diversité agro-morphologique des génotypes et une interaction génotype x environnement très hautement significative ( $P < 0,001$ ) pour l'ensemble des caractères.

L'étude des corrélations entre d'une part la quantité d'eau reçue et la température moyennes pendant le mois de Février et d'autre part le rendement en grain montrent l'importance de ces deux paramètres climatiques sur ce caractère.

Les différentes méthodes utilisées pour l'analyse de l'interaction génotype x environnement du rendement en grain ( $b_i$ ,  $S^2_{di}$ ,  $W_i$ ,  $\sigma^2_i$ , % HV et % IC) permettent un screening des génotypes. Les génotypes Ardente/Waha L2, Ardente et Saadi/Siméto L3 présentent une forte instabilité ( $W_i$ ,  $\sigma^2_i$ , % HV et % IC les plus élevés). Les génotypes Ardente/Waha L1, Siméto/Vitron L5, Siméto et Ardente/Vitron L1 ont un rendement en grain élevé et une stabilité moyenne ( $W_i$ , % HV et % IC faibles). Des corrélations significatives ont été trouvées entre % HV,  $R^2_{ij}$ ,  $b_i$ ,  $W_i$ ,  $\sigma^2_i$  et % IC impliquant une similarité dans la détection de génotypes stables, par conséquent la mesure d'un seul paramètre suffit pour la sélection de génotypes stables et productifs dans un programme d'amélioration.

**Mots-clés** : rendement en grain, composantes du rendement, matière sèche, translocation et remobilisation des assimilats, ISS, LAI, NDVI, blé dur et tendre, interaction génotype x environnement, stabilité.

## **Drought tolerance and wheat yield stability of wheat (*Triticum durum* Desf. and *Triticum aestivum* L.).**

### **Abstract**

This work includes two parts, the first one is realized in France, the second is realized in Algeria.

In the first part, six varieties of common wheat (*Triticum aestivum* L.) in 1991 and four varieties among which one of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in 1992 were studied were studied in two (1991) and three (1992) different water regimes: full irrigation (ETM), mild water stress (R1) and severe water stress (R2) at Magneraud (France). Traits evaluated were grain yield and its components, dry matter, translocation and remobilization of assimilates, foliar water potential ( $\Psi$ ), relative water content (RWC), soil relative water content, Stress Susceptibility Index (SSI), leaf senescence, leaf area index (LAI), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

The analysis of variance revealed significant differences between regimes and among the cultivars for all traits except between regimes for thousand grains weight in 1991. The regime  $\times$  variety interaction was significant for grain yield, thousand grains weight, biomass at the harvest, harvest index and NDVI in 1992 and for grain yield in 1991. The foliar water potential and the relative water content (RWC), the interaction meaning depends on dates of measure.

The drought stress effect explains more the variation observed by the various traits compared with the variety effect for both tries and for majority of traits except for the traits of plant (1991) where the variety effect is upper to drought stress effect.

For all traits durum wheat (*Triticum durum* Desf.) has the highest reduction in the two water stress than the common wheat (*Triticum aestivum* L.). Moderate and severe water stresses caused a reduction of water availability in the soil, increase the foliar water potential and reduce of all plant traits.

Correlations studies revealed that grain yield, grains number/m<sup>2</sup>, thousand grains weight and NDVI was associated with each other except for correlations between on one hand thousand grains weight on other hand and grain yield (1992) and grains number/m<sup>2</sup> (1991). 51.55 %, 27.88

%, 4.12 % (1991) and 75 %, 43 % and 20.2 % (1992) of grain yield, grains/m<sup>2</sup> and thousand grains weight variability respectively were explained by NDVI variability. 69.75 %, 52.37 %, 28.4 % and 23.20 % of NDVI, grain yield, thousand grain weight and grains number/m<sup>2</sup> variability were explained by LAI variability.

In the second part, an evaluation of both genetic potential and genotypic stability of 17 durum wheat genotypes during three crop years under wet conditions in the north (Algiers). The results showed highly significant (P<0.001) agro-morphological diversity of genotypes and genotype × environment interaction for the whole of the traits except for fertile spikelet number. Wricke's ecovalance ( $w_i$ ), Shukla's stability variance ( $\sigma_i^2$ ), heterogeneity variance (%HV) and incomplete correlation (%IC) methods were used for genotype × environment interaction analysis of grain yield. Ardente/Waha L2, Ardente, and Saadi/Simeto L3 have a strong instability ( $w_i$ ,  $\sigma_i^2$ , %HV and the %IC are the highest). Ardente/Waha L1, Simeto/Vitron L5, Simeto and Ardente/Vitron L1 have a highest grain yield and an average stability ( $w_i$ , %HV and %IC are weak). Significant correlations were found among %HV,  $R_{ij}^2$ ,  $b_i$ ,  $w_i$ ,  $\sigma_i^2$  and %IC implying their close similarity in detecting stable genotype and they are equivalent in measuring stability for breeding program.

**Keywords:** Grain yield, grain yield components, dry matter, translocation and remobilization of assimilates, ISS, LAI, NDVI, durum wheat and bread wheat, genotype × environment interaction, stability.

التسامح في نقص المياه والاستقرار مردود القمح

(*Triticum durum* Desf. و *Triticum aestivum* L.)

ملخص

الجزء الأول من هذا العمل مهتم بأدوات التمييز من مختلف أنماط وراثية للقمح من خلال تطبيق ضغط الماء مختلفة، في حين أن الجزء الثاني ينص علي استقرار لمردود

درس في عام 1991، ستة أنواع من القمح اللين (*triticum aestivum* L.) و في عام 1992 أربعة أنواع (ثلاثة من القمح اللين و نوع واحد من القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.))

قد تم قياس عدة خصائص النم و إنتاج في كل نظام الري. أظهر وجود فرق بين نظام الري و بين أصناف القمح المدروسة. وقف الري أثر على كل الخصائص النم و الإنتاج. تأثير ضغط الماء على خصائص النم و إنتاج عند صنف القمح الصلب كنا أكبر من القمح اللين.

علاقة قوية بين المردود، عدد الحبوب/م<sup>2</sup>، وزن 1000 حبة، NDVI و LAI.

الجزء الثاني هو مهتم بقيم استقرار 17 أنواع القمح الصلب خلال ثلاثة مواسم زراعية في الجزائر العاصمة. قد أظهرت نتائج مجموعة متنوعة من جينية النمط و تفاعل جينية النمط × البيئة على جميع الخصائص. بينت دراسة الارتباطات علاقة بين المردود في ناحية الأولى وكمية المياه و الحرارة في ناحية الأخرى. مختلف الطرق (IC %، HV %،  $\sigma^2_i$ ،  $W_i$ ،  $S^2_{di}$ ،  $b_i$ ) المستخدمة في تحليل التفاعل النمط الجيني × البيئة على المردود تسمح بفحص انماط وراثية. انواع جينية Ardente/Waha L2, Ardente et Saadi/Siméto L3 تقدم عدم الاستقرار. Ardente/Waha L1, Simeto/Vitron L5, Simeto et (  $W_i$ ,  $\sigma^2_i$ , % HV %, % IC) انواع جينية Ardente/Vitron L1 لهم اعلى مردود و استقرار متوسط (  $W_i$ , % HV %, % IC) . تم العثور على علاقة كبيرة بين %  $HV$ ,  $R^2_{ij}$ ,  $b_i$ ,  $W_i$ ,  $\sigma^2_i$ , % IC

#### الكلمات الأساسية

محصول القمح، مكونات المحصول، تحويل المواد الجفة (remobilisation et translocation) ضغط الماء، والاستقرار، تفاعل جينية النمط × البيئة، ISS، NDVI و LAI