

***Identification et sélection des caractères
de résistance à la sécheresse chez le
blé dur (Triticum durum Desf.) dans les
conditions semi-arides des hauts plateaux
de Sétif***

Mr HARGAS HAMZA.

Directeur de thèse : Mr BOUZERZOUR H. Professeur
28-06-2007

Jury : Président : Mr AIDAOUI A. Professeur Examineurs : Mme MEKLICHE L. Maitre de conférence
Mr ABDELKRIM H Professeur Mr MEKLICHE A. Chargé de cours

Table des matières

Dédicace . . .	4
REMERCIEMENTS . . .	5
Résumé . . .	6
Abstract . . .	7
ص غ ل م ل ا . . .	8
Introduction . . .	9
PREMIERE PARTIE : Revue bibliographique . . .	11
I - Contraintes environnementales de la production céréalière . . .	11
I.1 - La sécheresse . . .	11
I.2 - Les contraintes thermiques . . .	13
II - Adaptation des plantes au stress hydrique . . .	16
II.1 - Esquive (caractères phénologiques d'adaptation à la sécheresse) . . .	16
II.2 - Evitement de la déshydratation (ou résistance) . . .	18
II.3 - Tolérance à la déshydratation . . .	22
II.4 - Les caractères de production . . .	24
II.5 - Notion d'idéotype de plante résistante à la sécheresse . . .	25
III - Méthodes d'identification des caractères de résistance à la sécheresse . . .	26
IV - Amélioration de la résistance à la sécheresse . . .	28
IV.1 - Utilisation de procédés d'amélioration classique . . .	28
IV.2 - Utilisation des techniques de biotechnologies . . .	32
DEUXIEME PARTIE : Matériel et méthodes . . .	34
I - Description du site expérimental . . .	34
II - Conduite de l'expérimentation . . .	34
II.1- Première année d'essai (1996/97) . . .	34
II.2 - Deuxième année d'essai (1997/98) . . .	38
III - Analyse des données . . .	39
TROISIEME PARTIE - Résultats et discussion . . .	41
I - Aperçu sur les conditions climatiques de l'expérience . . .	41
II - Analyse des résultats de la première année d'expérimentation (1996/97) . . .	42
II.1 - Variabilité phéno-morphologique . . .	42
II.2 - Liaisons entre les variables mesurées . . .	45
II.3 - Variables explicatives du rendement en grain . . .	50
II.4 - Groupage des géotypes selon la similitude de réponse. . .	51
III - Résultats de la deuxième année d'expérimentation (1997/98) . . .	53
III.1 - Variabilité phénotypique et liaisons inter-caractères . . .	53
III.2 - Similitude du comportement génotypique inter-années . . .	56
III.3 - Architecture typique, stabilité et performance de rendement . . .	57
Conclusion . . .	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . .	61

Dédicace

Je dédis ce modeste travail à toute ma famille et à tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements à:

Mr BOUZERZOUR, pour avoir dirigé de près ce travail, pour ses précieux conseils, ainsi que pour ses grandes qualités humaines.

Mr AIDAOUÏ qui nous fait l'honneur de présider le jury.

Mr ABDELKRIM, Mme et Mr MEKLIÛHE qui nous honorent d'avoir accepté de juger ce travail.

Mr AMMAR BENMAHAMMED chargé de cours à l'université de Sétif pour son aide et sa grande disponibilité durant toute la période expérimentale.

Le directeur de la station ITGC de Sétif, d'avoir mis à notre disposition le matériel de la station; ainsi qu'à tout le personnel de la station en particulier Mr ZERARGUI H.

Mme TAMIMOUNT du ministère de l'agriculture, Mr abdoun et Mr gharzouli de l'ITMA de Sétif pour nous avoir facilité l'hébergement durant notre séjour à Sétif.

Mon ami CHEBOUTI ABDERRAZAK pour son aide et ses conseils.

Tous les amis et parents qui m'ont aidé à la réalisation du travail expérimental je cite en particulier Samir Mokrani, Rafik boughareb et mes nièces Zineb et Samia.

Le personnel du département phytotechnie de l'INA notamment Anissa la bibliothécaire.

Résumé

Un germoplasme de blé dur (*Triticum durum* Desf) constitué de 72 variétés d'origines diverses et 47 lignées avancées, a été étudié durant deux années successives en milieu semi-aride d'altitude de la région de Sétif. L'objectif de cette étude est d'identifier les caractères de résistance à la sécheresse en vue de leur utilisation en sélection pour améliorer le rendement grain et sa stabilité en conditions semi arides. Les observations ont concerné divers caractères phénologiques, morphologiques et physiologiques.

L'analyse des corrélations intercaractères en conditions de stress hydrique de la première campagne et en conditions humides de la deuxième campagne en plus de l'étude des corrélations interannées des différents caractères, ont révélé des réponses différenciées des génotypes en fonction des conditions du milieu engendrant des interactions génotype x milieu qui créent le besoin de chercher à grouper dans un même fond génétique plusieurs caractères désirables pour l'expression du potentiel et de la stabilité de la production.

Pour cela, nous avons utilisé la technique de la classification hiérarchique sur la base de nombreux caractères liés à la productivité et à l'adaptation. Les groupes 4 et 5 issus de cette classification présentent un ideotype capable de rentabiliser les bonnes années, et pouvant maintenir un rendement relativement stable en conditions de stress.

A l'issue de cette étude, nous avons identifié la durée de la phase végétative, la hauteur du chaume, la biomasse aérienne produite à maturité et le rendement grain comme une combinaison de caractères formant un idéotype pouvant conduire à l'amélioration simultanée du rendement grain et de sa stabilité.

Mots clés

Blé dur, conditions semi arides, caractères de résistance, la durée de la phase végétative, la hauteur du chaume, la biomasse, rendement en grain, stabilité, classification hiérarchique, combinaison de caractères, ideotype.

Abstract

A germplasm of durum wheat (*Triticum durum* desf) formed by 72 varieties and 47 advanced lines, has been studied during two successive campaigns in the semi-arid highland area of Setif. The objective of the study is to identify the drought resistance traits that may be used in selection to improve grain yield and its stability in semi-arid conditions. The observations concerned different phenological, morphological and physiological traits.

The traits correlations analysis in drought stress conditions of the first year and wet conditions of the second year revealed differentiated reactions of genotypes to the environmental conditions involving genotype x environment interactions which imply a need to group different desirable traits in a same genotype.

For this purpose, we have used the hierarchical classification technique based on several traits related to productivity and adaptation. The groups 4 and 5 issued from this classification present an ideotype able to perform well in wet seasons and can maintain a relative stability of yield in dry conditions.

The results of this study identified the length of vegetative period, plant height, biomass, and grain yield as a traits combination forming an ideotype leading to a simultaneous improve of grain yield and its stability.

Key words:

Durum wheat, semi-arid conditions, traits resistance, length of vegetative period, plant height, biomass, grain yield, stability, hierarchical classification, traits combination, ideotype.

ص خل مل ا

تمت دراسة مجموعة من أنواع القمح الصلب مكونة من 72 نوع من أصول مختلفة و 47 سلالة متقدمة لمدة موسمين متتاليين في المحطة الفلاحية للأبحاث بسطيف المتميزة بمناخ شبه جاف و علو الإرتفاع على مستوى سطح البحر. الهدف من هذه الدراسة هو تعيين صفات تحمل الجفاف لإدراجها في الانتخاب المتعدد الصفات من أجل تحسين المردود وكذا استقراره في بيئة شبه جافة منقلبة. ولقد خصت الملاحظات الصفات الفينولوجية، المردودية و الفيزيولوجية.

دراسة العلاقات بين مختلف الصفات بينت تأثيرات متغايرة للأنواع المختلفة بتعبير الأحوال البيئية، مما يوجب البحث عن قاعدة جينية تشمل على عدة صفات مرغوبة لتحسين القدرة الإنتاجية واستقرار الإنتاج.

في هذا الصدد استعملنا تقنية التقسيم السلمي على أسس عدة صفات لها علاقة مع المردودية والتأقلم. المجموعتين 4 و 5 المنبثقة من هذا التقسيم تمثلان صنف ميثالي قادر على الإستغلال الأحسن للمواسم الحدية مع إمكانية الحفاظ على مردود مستقر نسبيا في السنوات الرديئة.

على إثر هذه الدراسة، تم تعيين مدة مرحلة الطور النباتي (قبل الإسبال)، طول النبتة، الكثافة الحية و المردود من القمح كتوفيق من الصفات تكون صنف ميثالي يُمدّن تحسين مترامن للمردود واستقراره.

كلمات المفتاح:

القمح الصلب، بيئة شبه جافة، صفات التحمل، مدة مرحلة الطور النباتي، طول النبتة، الكثافة الحية، المردود من القمح، استقرار الإنتاج، تقسيم سلمي، توفيق من الصفات، صنف ميثالي.

Introduction

La culture des céréales est la spéculation prédominante de l'agriculture algérienne. Elle s'étend sur près de six millions d'hectares dans un système biennal dominant qui est la jachère/céréale. La production nationale reste néanmoins faible et ne permet de satisfaire qu'environ 20 % des besoins d'une population de plus en plus grandissante. L'Algérie est actuellement le premier importateur mondial de blé dur en achetant 50 % de l'offre sur le marché mondial, et le huitième importateur de céréales (Belaid et moussaoui, 1999).

Le rendement moyen est inférieur à sept quintaux à l'hectare, il est parmi les plus faibles dans le monde, et en même temps très fluctuant et tributaire d'un climat sévère et irrégulier. En effet, la majeure partie des emblavures se trouve sur les hautes plaines caractérisées par une altitude assez élevée (800 à 1200m), des hivers froids, un régime pluviométrique insuffisant et irrégulier, des gelées printanières fréquentes, et l'apparition du Sirocco en fin de cycle (Baldy, 1974).

A toutes ces contraintes climatiques, s'ajoutent les contraintes techniques à la production qui sont l'utilisation de variétés locales peu productives ou des variétés introduites peu adaptées. Le faible niveau de technicité des agriculteurs explique aussi la mauvaise préparation du sol, la protection insuffisante des cultures contre les prédateurs, les maladies et les mauvaises herbes. La fertilisation est mal maîtrisée du point de vue dose et date d'apport.

Le manque d'eau est toutefois le facteur le plus limitant auquel fait et doit faire face la céréaliculture algérienne. Tout progrès sensible des agro-systèmes basés sur la culture des céréales, dans l'étage bioclimatique semi-aride, semble conditionné par une meilleure gestion des eaux pluviales (Richards *et al.* 1997). L'amélioration des performances des cultures, conduites sous stress hydrique, peut être réalisée par des changements agronomiques et/ou par la création de variétés résistantes à cette contrainte (Araus *et al.* 1998).

De nombreuses pratiques culturales ont été adoptées par les agriculteurs des régions à climat méditerranéen d'Australie dans le but d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau (Richards *et al.* 1997). Ces pratiques intègrent le semis précoce, l'utilisation des fertilisants à des niveaux plus élevés, la pratique du labour minimum, le semis sur couvert végétal et l'utilisation des rotations qui améliorent la nutrition et la pénétration racinaire des cultures céréalières (Turner, 1997).

L'irrigation d'appoint est une autre alternative qui revêt une importance considérable. Selon Aidaoui et Tartani (2000); les apports de complément, lors des périodes de déficit hydrique aident à sécuriser et à augmenter la production.

Pour cela une politique hydraulique ambitieuse doit être mise en œuvre dans ces régions. Il faudra en premier lieu réaliser un maximum de constructions hydrauliques (barrages, retenues collinaires, forages, et puits). Il faut installer des réseaux d'irrigation adéquats pour mieux gérer les ressources hydriques, devenues de plus en plus rares, et même réfléchir à la réutilisation des eaux usées.

Cette stratégie coûtera certes chère, mais elle sera rentable et viable à long terme, puisque l'eau utilisée est essentiellement renouvelable. La possibilité de salinisation des

sols est très faible, s'agissant d'irrigation de complément avec des eaux peu chargées. En outre, l'irrigation d'appoint aidera à la résorption d'une grande partie de la jachère.

Une issue plus prometteuse repose sur l'amélioration génétique des plantes pour une meilleure adaptation aux contraintes environnementales. Jusqu'à présent, la sélection du blé dur s'est faite en puisant fortement dans les introductions des centres internationaux de la recherche agronomique. Les variétés sélectionnées réussissent bien dans les plaines intérieures et sur le littoral, mais le niveau des rendements en grains reste très variable sur les hautes plaines (Bouzerzour *et al.* 2002).

Les variétés nouvelles sont le plus souvent sélectionnées sur la base de leur niveau de rendement sans tenir compte des caractères adaptatifs qui sont des régulateurs de la production en milieux variables. Dans les milieux semi-arides, la présence d'interactions génotype x milieu très fortes rend le rendement moins intéressant comme seul critère de sélection (Bouzerzour et Djekoun, 1996). Les sélectionneurs se tournent vers d'autres caractères moins fluctuants qui peuvent être utilisés en parallèle avec le rendement en grain dans une approche intégrative (Belhassen *et al.* 1995).

La présente contribution se fixe pour objectifs (1) l'identification des caractères adaptatifs de la culture de blé dur à la zone semi-aride des hauts plateaux, (2) l'utilisation de ces caractères en sélection pour déterminer leur rôle dans la stabilité du rendement en grain et (3) de proposer un schéma d'amélioration qui contribue à la sélection d'un matériel végétal plus productif et plus adapté à l'environnement de production.

PREMIERE PARTIE : Revue bibliographique

I - Contraintes environnementales de la production céréalière

Les contraintes environnementales que rencontre la culture des céréales relèvent de la fertilité des sols, le statut hydrique du sol et de l'air ambiant, et l'amplitude thermique. Si les contraintes liées à la composition minérale des sols sont relativement plus contrôlables, il est plus difficile de maîtriser les stress hydrique et thermique qui sont le plus souvent de nature intermittente (Belhassen *et al.* 1995).

Les hautes terres céréalières de l'intérieur du pays où se situe la région d'étude sont caractérisées par un climat méditerranéen continental. Dans ce type d'environnement, non seulement les précipitations annuelles sont faibles, avec une distribution irrégulière, mais leur absence intervient le plus souvent en interaction avec les hautes températures dont l'avènement coïncide avec la phase de remplissage du grain (Oosterom *et al.* 1993).

I.1 - La sécheresse

La sécheresse est une contrainte permanente de la production agricole dans de nombreux pays au climat de type méditerranéen. Elle est à l'origine des pertes de productions agricoles dans de nombreuses régions (Ceccarelli et Grando, 1996). Environ 35 % des terres arables dans le monde peuvent être classées dans la catégorie aride ou semi-aride. Parmi le reste, approximativement 25 % sont des sols vulnérables à la sécheresse. Même les meilleurs sols des régions humides subissent, occasionnellement, de courtes périodes de sécheresse (Ruivenkamp et Richards, 1994). Les risques de sécheresse vont devenir de plus en plus fréquents et persistants, à l'avenir, par suite des changements climatiques causés par l'effet de serre (Ruivenkamp et Richards, 1994).

D'après Passioura (1996), il est plus simple de définir la sécheresse comme étant les circonstances dans lesquelles les plantes accusent une réduction de croissance et de production causée par une alimentation hydrique insuffisante des tissus. Selon Jouve (1984), l'intensité et l'avènement de ce stress sont d'autant plus imprévisibles que l'aridité s'accroît. Cette variabilité inter-annuelle dans le degré d'expression de la sécheresse engendre l'instabilité des rendements en grains (Ruivenkamp et Richards, 1994). De ce fait, la sécheresse devient un stress multidimensionnel affectant les plantes à différents niveaux organisationnels (Blum, 1996).

Blum (1996) note que le statut hydrique de la plante peut passer progressivement par trois principales phases, selon le développement du stress hydrique. Au cours de la phase initiale, la transpiration et l'assimilation se déroulent comme si la plante dispose de l'eau à volonté. Cette phase se poursuit jusqu'au moment où le niveau d'absorption racinaire ne peut plus satisfaire la demande climatique que subit le feuillage. La réserve utile du sol est alors épuisée à 50 %.

Après ce seuil, la plante entre dans la seconde phase, au cours de laquelle la transpiration et l'assimilation sont réduites relativement à leur potentiel. La plante réagit de façon dynamique au cours de cette phase, essayons de rétablir l'équilibre entre la demande climatique et l'offre du sol, en faisant intervenir des mécanismes qui lui sont propres (développement du système racinaire, régulation stomatique osmorégulation etc..) (Blum, 1996).

Quand le déficit hydrique devient plus intense, la plante entre dans la troisième et dernière phase au cours de laquelle les stomates se ferment complètement, annulant toute activité photosynthétique. Toutes les pertes hydriques de la plante se font alors à travers les voies non-stomatiques (cuticule). Il n'y a plus de gain de matière sèche, la respiration consomme les hydrates de carbone stockés et la plante passe au stade de survie. La période de survie dépend du rythme de la transpiration résiduelle et de la tolérance à la dessiccation des tissus vivants restants (Blum, 1996).

Certains stades du cycle de la plante sont moins sensibles à de fortes réductions hydrique (Mullet et Whitsitt, 1996). C'est ainsi que l'embryon dormant à l'intérieur de la graine sèche est hautement tolérant à la dessiccation. Cette tolérance diminue progressivement après la germination (Blum, 1996). La sécheresse retarde souvent les stades de développement de la plante à cause de l'inhibition de la croissance par le déficit hydrique. Toutefois, une floraison précoce due à un stress hydrique modéré peut avoir pour origine une augmentation de la température de la plante suite à la réduction de la transpiration. Sous stress hydrique sévère, l'effet de la température n'est plus dominant et l'épiaison est retardée (Blum, 1996). Dakheel *et al.* (1993) signalent que le stress hydrique terminal réduit la durée de la phase de remplissage du grain.

Un faible changement du potentiel hydrique du sol ou du rythme de transpiration peut conduire à une inhibition de la croissance (Mullet et Whitsitt, 1996). La croissance s'arrête avant qu'aucun abaissement notable ne soit perceptible dans le contenu relatif en eau (Kameli et Losel, 1996). Le premier effet du déficit hydrique est de réduire de la vitesse de croissance des cellules de la tige, en partie, à cause de l'accumulation de l'acide abscissique (Mullet et Whitsitt, 1996). La réduction de la hauteur du chaume (nanisme) est donc une fonction du degré du stress hydrique (Dakheel *et al.* 1993). La sécheresse provoque l'enroulement du feuillage, le dessèchement des parties apicales, puis la mort des feuilles basales (Blum, 1996). Benlaribi *et al.* (1990) rapportent que les variétés de blé dur Bidi17, Hedba3 et Gemgoum Reklam répondent au déficit hydrique par une réduction de la croissance du limbe foliaire.

Le déficit hydrique du sol et la siccité de l'air ambiant induisent la production et le dépôt de cire épicuticulaire, chez certaines variétés de céréales (Blum, 1996). Ce dépôt est d'autant plus marqué que l'environnement est plus sec (Johnson *et al.* 1983). L'inflorescence des céréales est relativement protégée de l'évaporation par des surfaces protectrices comme une cuticule épaisse et un dépôt épais de cire épicuticulaire qui font que le statut hydrique des inflorescences est meilleur que celui des feuilles (Blum, 1996). Le même auteur souligne néanmoins qu'une réduction du statut hydrique des inflorescences peut se produire sous stress sévère provoquant une chute de la fertilité. Blum (1996) note aussi que l'accumulation de l'ABA dans les différents tissus de la plante soumise au stress hydrique, a des effets sur le développement et la croissance de la plante qui sont susceptibles de réduire de sa productivité. L'ABA diminue notamment la croissance générale, l'activité photosynthétique, l'initiation foliaire, le tallage, la viabilité du pollen, la formation des graines, et favorise l'abscission des fleurs.

La sécheresse provoque la réduction du nombre de grain par épi (Dakheel *et al.* 1993), du nombre d'épis par plant, du poids moyen du grain, de l'indice de récolte et du rendement en grain (Schonfeld *et al.* 1988). Hafeez-khan *et al.* (1993) constatent que le nombre d'épillets par épi est moins sensible au stress hydrique, comparativement au poids des épis qui est fortement pénalisé. Kameli et Losel (1996) notent que la matière sèche augmente progressivement sous stress hydrique, mais elle reste sous le seuil de 50 %, comparativement à l'évolution de la matière du témoin non stressé. Cette réduction est assez conséquente pour affecter le rendement en grain.

Benlaribi *et al.* (1990) observent sur un essai mené en pots, que le déficit hydrique affecte significativement le nombre de racines chez le blé dur, réduisant le volume et la masse racinaire. La réduction du volume traduit non seulement une réduction de la croissance, mais aussi une diminution du diamètre. Cette réduction engendre une augmentation de la résistance au transfert de l'eau vers la partie aérienne.

Mullet et Whitsitt (1996) note que la croissance racinaire est moins sensible à l'accumulation l'ABA que la croissance des tiges. En effet, le rapport matière sèche racines/matière sèche tiges augmente chez les plantes exposées au déficit hydrique, à cause de la réduction plus importante de la croissance de la partie aérienne par rapport à la croissance racinaire (Blum, 1996).

La conductance stomatique diminue avec le déclin du contenu hydrique du sol (Turner, 1997) et la réduction de l'hygrométrie (Blum, 1996). Une résistance stomatique élevée limite le flux de l'eau à partir des racines et de ce fait réduit la transpiration (Mullet et Whitsitt, 1996). Elle diminue la concentration du CO₂ dans la chambre sous stomatique et réduit l'activité photosynthétique (Mullet et Whitsitt, 1996; Tardieu, 1996).

Dakheel *et al.* (1993) signalent que dans les régions semi-arides, l'intensité lumineuse durant la période printanière est supra-optimale pour une activité photosynthétique normale. Cependant, sous stress hydrique, une forte luminosité engendre une réduction de l'efficacité des photo-systèmes, suite à la photo-inhibition causée par l'élévation de la température du couvert végétal (Lawlor, 1994).

Un stress hydrique intense induit, une baisse de la teneur relative en eau (Schonfeld *et al.* 1988; Muller et Whitsitt, 1996), et une réduction des potentiels hydrique et osmotique de la feuille (Hafeez-Khan *et al.* 1993).

Alors que la croissance foliaire est fortement inhibée dès l'avènement du stress hydrique, l'assimilation du carbone, réagissant moins vite, continue à produire des assimilats utilisés en priorité par la croissance racinaire et l'ajustement osmotique (Blum, 1996).

Parmi les solutés, accumulés sous stress hydrique, on note une augmentation des sucres solubles et certains acides aminés comme la proline et à un degré moindre la bêtaïne. Par contre, le contenu total en acides aminés diminue sous stress hydrique (Hafeez-Khan *et al.* 1993; Kameli et Losel, 1996).

I.2 - Les contraintes thermiques

I.2.1 - Les hautes températures

Dans les zones arides et semi-arides d'altitude, le stress thermique peut intervenir dès le début du cycle. O'Toole et Stockle (1989) observent une forte réduction du nombre de

plantes levées par unité de surface, suite aux effets des hautes températures au semis. Ces effets s'amenuisent quand le semis est tardif avec l'arrivée de l'hiver (Fischer, 1985).

Kirby *et al.* (1985) notent que l'effet des hautes températures au semis se matérialise par une réduction de la longueur du coléoptile, la plante ne peut pas s'ancrer en profondeur et devient très sensible aux effets du stress thermique. Ils notent une réduction de la longueur du coléoptile (mesuré à 5 cm de la profondeur du sol) de 100 mm à une température de 15°C, à moins de 30 mm lorsque la température maximale du sol atteint le seuil de 35°C.

Rawson (1986), grâce à des expérimentations en milieu contrôlé, réussit à montrer que l'effet pénalisant de l'élévation de la température est surtout dû au fait que la plante n'arrive pas à absorber les éléments nutritifs et l'eau, et les utiliser au rythme imposé par le stress thermique. Fisher (1985) trouve que le stress thermique au cours de la phase levée-stade double-ride réduit fortement la capacité de tallage de la plante.

Hauchinal *et al.* (1993) observent une réduction du rendement en grain des semis tardifs, liée à une diminution du nombre d'épis et du poids moyen du grain, causée par les effets des hautes températures. Ils notent aussi que l'effet pénalisant du stress thermique se matérialise par une accélération du développement et une réduction des dimensions des organes constitutifs de la plante. La résultante est un effet négatif sur la productivité globale de la plante.

Wardlaw *et al.* (1989) montrent que la baisse du rendement en grain due au stress thermique terminal, est corrélée positivement à la réduction du poids de 1000 grains et à la variation du nombre de grains au m². L'élévation de la température, tard au cours du cycle de développement de la plante, particulièrement après anthèse, est une contrainte à l'augmentation des rendements en zone semi-aride (Bouzerzour *et al.* 1994). L'effet se manifeste par une accélération de la sénescence foliaire et l'arrêt de la croissance du grain (Dakheel *et al.* 1993).

Grâce à des essais effectués en plein champ et en milieu contrôlé, Wardlaw *et al.* (1989) montrent que la température optimale pour le développement et le remplissage du grain, varie de 12 à 15°C pour de nombreux génotypes de céréales à paille. Ils observent une diminution de 3 à 5 % du poids du grain pour chaque degré centigrade d'augmentation de la température à partir de la base des 12 à 15°C.

Dans l'écart des moyennes de températures de 12 à 15°C, une réduction de la durée de remplissage est compensée par une augmentation du taux de remplissage, avec pour effet peu de variation dans le poids moyen du grain (Wardlaw *et al.* 1989). A mesure que la température moyenne de la phase du remplissage augmente pour atteindre la plage des 15 à 18°C, l'augmentation du taux de remplissage ne compense plus la réduction de la durée qui est induite par le stress thermique, ce qui fait diminuer le poids de 1000 grains (Wardlaw *et al.* 1989).

Wardlaw et Moncur (1995) notent des poids moyens d'un grain de 56.6 mg avec un taux de remplissage moyen de 1.4 mg/jour et une durée moyenne de la période de remplissage de 40.4 jours pour une température moyenne au cours de cette phase de 18/13°C (jour / nuit). Ces valeurs moyennes sont réduites à 28.0 mg pour le poids moyen d'un grain avec un taux de remplissage de 1.79 mg/jour et une durée de la phase de remplissage de 15.6 jours lorsque la température moyenne monte à 30/25°C.

1.2.2 - Le froid

L'abaissement brutal de la température, en dessous de 0°C, provoque de nombreuses perturbations au sein du végétal (Couvreur *et al.* 1979). Lorsque la température diminue progressivement jusqu'à des niveaux très bas, des cristaux de glace se forment dans les espaces intercellulaires déshydratant les cellules voisines dont l'eau est appelée vers ces espaces. Il en résulte un arrêt de fonctionnement, voire une rupture des membranes et une destruction des tissus dans les cas les plus graves. La réversibilité du phénomène n'a lieu que si la structure cellulaire n'est pas fortement endommagée. Lors du dégel, les cellules intactes se réhydratent et redeviennent fonctionnelles (Blouet *et al.* 1984).

Couvreur *et al.* (1979) soulignent que la déshydratation des cellules s'accompagne d'une augmentation de la concentration en sucres, en substances organiques, et en sels minéraux. Blouet *et al.* (1984) signalent que l'intensité respiratoire est minimale vers -4°C. Elle reprend progressivement un rythme normal dès que la température atteint des valeurs supérieures à 0°C.

Au stade plantule, la taille du coléoptile est réduite et la première feuille pousse en forme de tire-bouchon, sous l'effet des basses températures. Au cours de la phase végétative, le feuillage prend une teinte vert-foncé avec un port tombant, consécutif à la déshydratation des cellules. Si le froid persiste, il y a dessèchement foliaire. Les basses températures réduisent la croissance durant l'hiver quand les plantes peuvent utiliser plus efficacement l'eau stockée dans le sol suite à la faible demande climatique qui caractérise cette période (Passioura, 1996).

Abbassenne *et al.* (1997a) notent qu'en régions méditerranéennes semi-arides, les gelées printanières touchent surtout les variétés précoces au stade début-montée, détruisant l'épi du maître brin. Les dégâts sur racines se manifestent particulièrement sur la croissance du rhizome qui ne se développe que pour des semis relativement plus profonds. Selon Couvreur *et al.* (1979), le rhizome, organe très fragile, est facilement détruit par le gel ou rompu par le soulèvement du sol, pris en masse.

Blouet *et al.* (1984) notent que la sévérité des dégâts est très variable selon le stade de développement de la culture. Ils sont particulièrement graves au stade levée sur des plantules dont la rupture du rhizome supprime l'ancrage et l'alimentation. Au début tallage (stade 4-5 feuilles), les plantules sont mieux endurcies et la rupture du rhizome cause moins de dégâts suite à la sortie des racines secondaires du plateau de tallage, qui prennent le relais des racines séminales. En début montaison, la culture redevient sensible aux basses températures parce que, d'une part, les tiges et les jeunes épis entrent en phase de croissance active, et d'autre part, l'endurcissement de la plante arrive à son terme.

Les effets indirects des basses températures peuvent se manifester par la disparition progressive des plantes, plusieurs semaines après le dégel. Un autre effet indirect du gel est consécutif aux lésions des gaines foliaires (à 1 ou 2 cm au dessus du sol) provoquant l'aplatissement des plantes sur le sol et favorisant leur attaque par les agents pathogènes. En outre, la transformation de l'eau de surface en glace, et l'alternance des périodes de gel et dégel, provoque des ruptures au niveau du collet. Il y a aussi déchaussement de plantules dû au soulèvement du sol (Blouet *et al.* 1984).

Les effets des basses températures dépendent du stade végétatif, de l'état d'endurcissement atteint par la plante et de l'intensité du stress thermique (Couvreur *et al.* 1979). Les effets d'un stress intense sur des plantes non endurcies se limitent aux organes en pleine croissance, qui sont les plus sensibles. Tant que l'ébauche de l'épi n'est pas atteinte parce qu'elle est protégée par l'empilement des feuilles, les dégâts foliaires ont peu de conséquences sur le devenir de la culture. Lorsque la vague des basses températures

fait son apparition de manière progressive, la plante s'accoutume et s'endurcit. Les effets sont relativement moins importants.

L'endurcissement est plus intense lors de la période vernale. Il est activé par des jours courts et des températures faibles. Les variétés de type hiver s'endurcissent mieux que les variétés de printemps dont les besoins vernaux sont nuls. Ces dernières se montrent, de ce fait, plus sensibles au froid. Plus que la valeur absolue de la température minimale enregistrée, c'est l'écart des températures qui règle l'intensité des dégâts observés sur les plantes. Ces derniers seront plus importants si une baisse brutale de la température est précédée d'un temps relativement clément (Couvreur *et al.* 1979).

L'état hydrique du sol peut atténuer ou accentuer les effets du froid qui sera plus néfaste sur un sol sec, car il se produira un gel de surface pouvant entraîner la rupture du collet des végétaux. De plus, toute cause favorisant l'évaporation de l'eau (froid survenant par grand vent) accentue les effets directs du gel. En revanche, une couche de neige recouvrant les cultures joue un rôle protecteur, et les plantes peuvent rester intactes malgré des températures très négatives relevées sous abri (Couvreur *et al.* 1979).

II - Adaptation des plantes au stress hydrique

L'adaptation se définit comme la capacité d'une plante à croître et à donner des rendements satisfaisants dans des zones sujettes à des stress de périodicités connues. La notion d'adaptation est liée à celles de résistance et de tolérance aux stress. Pour Levitt (1972), l'adaptation peut prendre trois formes distinctes. L'esquive, qui est la situation où la plante grâce à un rythme de développement spécifique, réussit à s'harmoniser à l'environnement de production, en échappant partiellement ou complètement au stress.

La résistance (ou évitement) prend forme grâce au maintien, par divers mécanismes, d'un état hydrique interne satisfaisant. Cet état permet à la plante de continuer ses activités métaboliques sans être fortement perturbée par le milieu extérieur qui peut être très stressant. La tolérance du stress qui s'installe dans les tissus de la plante est la capacité de maintenir une activité métabolique. Cette activité assure l'intégrité fonctionnelle aux structures cellulaires et autorise la reprise des activités de la plante dès que les conditions de croissance redeviennent plus normales.

Les termes résistance, tolérance et adaptation sont indifféremment utilisés dans la littérature. Reprenant les formes d'adaptation aux stress abiotiques définies par Levitt (1972), Belhassen *et al.* (1995) les classifient en trois grands types d'adaptation au stress hydrique et qui sont (1) l'échappement ou esquive qui consiste à réaliser le cycle pendant la période favorable, (2) l'évitement de la déshydratation (ou résistance) qui permet le maintien d'un potentiel hydrique élevé dans la plante et (3) la tolérance à la déshydratation qui consiste en un ensemble d'aptitudes à résister aux effets d'un faible potentiel hydrique.

II.1 - Esquive (caractères phénologiques d'adaptation à la sécheresse)

L'aspect le plus important de l'adaptation à la sécheresse dans un contexte agricole est que le développement de la culture doit coïncider avec la période de disponibilité en eau en relation avec la demande climatique (Passioura, 1996). Il faut donc étudier l'influence de la variabilité de la durée des phases de développement sur la productivité de la plante, dans le

but de déduire la durée la plus optimale pour que les stades sensibles puissent se réaliser à des périodes où les risques de stress sont plus réduits (Abbassenne *et al.* 1997a). Les stades repères qui découpent le cycle de la plante en phases de développements, plus ou moins distinctes, sont donnés par la figure 1. Parmi les changements qualitatifs que subit la céréale pendant sa vie, les plus importants sont certainement le début de la montaison et l'épiaison.

Les variétés tardives donnent généralement de meilleurs rendements en milieux favorables (Bouzerzour *et al.* 1995). Blum (1996) souligne qu'une longue durée de croissance est associée avec une biomasse élevée et que les génotypes tardifs ont une productivité potentielle supérieure. Cependant, comme la sécheresse et les hautes températures de fin de cycle sont les caractéristiques dominantes des zones semi-arides d'altitude, il serait plus judicieux de privilégier la sélection de la précocité. Oosterom et Acevedo (1992) trouvent, en conditions de sécheresse, une corrélation positive entre la précocité à l'épiaison et le rendement en grain.

Abbassenne *et al.* (1997b) montrent, en conditions semi-arides d'altitude, que les génotypes précoces à l'épiaison se caractérisent par des vitesses de remplissage par m² assez fortes, alors que les génotypes tardifs font plus appel aux assimilats stockés dans la tige. Une grande précocité n'est, cependant, d'aucune utilité pratique en sélection dans les régions où la présence du gel tardif affecte les génotypes trop précoces (Ceccarelli *et al.* 1992). La recherche sur la résistance ou la tolérance aux basses températures printanières est nécessaire pour exploiter l'avantage en productivité des génotypes précoces permettant d'échapper aux stress de fin de cycle (Mekhlouf *et al.* 2006).

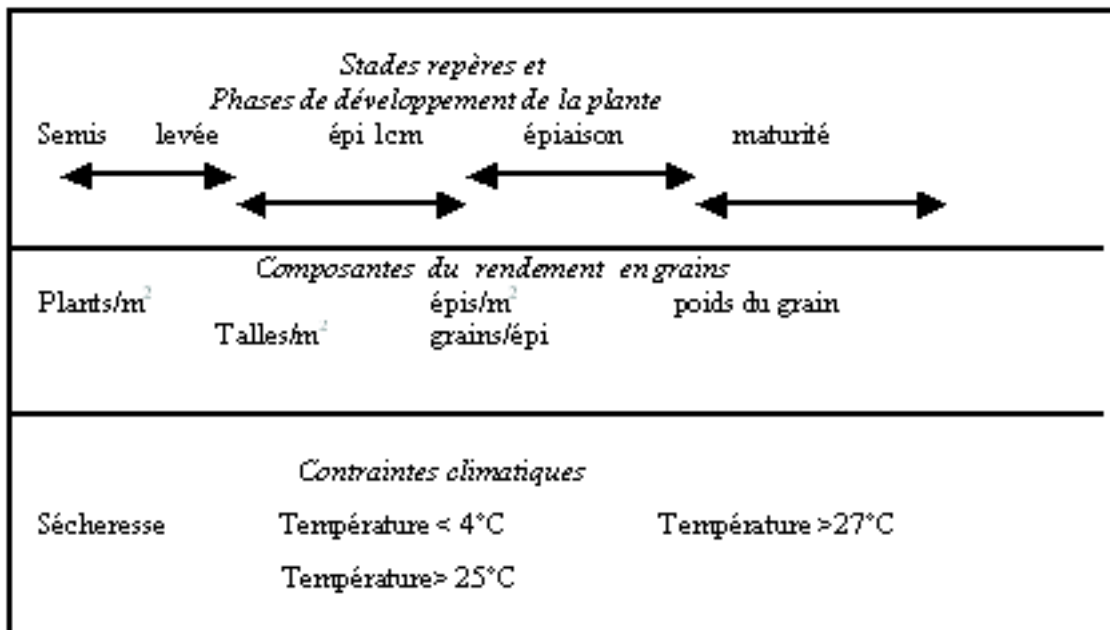


Figure 1. Stades repères, phases de développement, élaboration du rendement et risques climatiques en zone semi aride.

Ortiz *et al.* (1991), Baldy (1993) et Abbassenne *et al.* (1997a) préconisent, pour les régions arides et semi-arides, des génotypes tardifs à l'épiaison et précoces à maturité. Ces variétés minimisent le risque vis-à-vis de la contrainte des basses températures printanières (Abbassenne *et al.* 1997a).

Abbassenne *et al.* (1997a) notent que les génotypes tardifs produisent peu de graines par unité de surface comparativement à la matière sèche totale produite au stade épisaison. Ces variétés investissent peu d'hydrates de carbone dans les épis et à cause des effets du stress thermique, beaucoup de leurs talles avortent. Ce type de matériel végétal est désirable à condition que lui soient associées des capacités de production d'épis et de grains par épi assez conséquentes, pour induire des indices de récolte et de remplissage assez élevés afin d'aboutir à des rendements en grains acceptables. Pour faciliter la sélection de génotypes appropriés, il est nécessaire que les mécanismes physiologiques qui sont à la base du contrôle de la précocité à l'épisaison soient étudiés. La durée semis-épisaison dépend presque exclusivement de la température et de la luminosité (Kirby et Yard, 1981). On distingue deux actions de la température. La première est dite positive parce qu'elle accélère l'avènement de l'épisaison, elle tend donc à raccourcir la durée semis-épisaison. La seconde a tendance, au contraire, à allonger la durée de cette phase de développement parce que la plante a besoin d'accumuler une somme donnée de basses températures vernalles (Kirby et Yard, 1981).

Selon Papadakis (1938) la somme de températures vernalles, comme celles des degrés-jours accumulés, varient fortement. Cette variation est fonction des environnements. C'est l'action conjuguée des effets positifs et négatifs de la température, combinée à l'effet de la durée du jour, qui détermine et explique mieux la variation de la durée des différentes phases de développement (Worland *et al.* 1994).

La stabilité de la précocité au stade épisaison est importante pour limiter les risques liés à la variabilité climatique (Hadjichristodoulou, 1987; Abbassenne *et al.* 1997a). Les génotypes précoces ont tendance à épier plus tôt ou plus tard, selon que l'hiver est plus doux ou plus rigoureux (Bahlouli *et al.* 2001). Par contre les variétés tardives sont caractérisées par des dates d'épisaison plus régulières (Hadjichristodoulou, 1987). Abbassenne *et al.* (1997a) ainsi que Bahlouli *et al.* (2001) notent que les génotypes tardifs épient à une date plus ou moins fixe quelque soit l'année. Ceci s'explique par le fait que les génotypes précoces répondent plus aux sommes des degrés-jours accumulées, alors que les génotypes tardifs répondent en plus aux températures vernalles et à la photopériode (Worland *et al.* 1994).

II.2 - Evitement de la déshydratation (ou résistance)

L'évitement de la déshydratation représente la capacité des génotypes à maintenir un potentiel hydrique foliaire élevé quand ils sont soumis à un déficit hydrique du sol (Acevedo, 1991). Il est lié à la réduction des pertes en eau et/ou au maintien de l'absorption de l'eau (Jones *et al.* 1981)

II.2.1 - Caractères morphologiques

L'utilisation de l'eau est directement liée à l'indice foliaire qui s'établit au cours du cycle de la culture. Pour un contenu hydrique d'un sol donné, il faut chercher un développement de la surface foliaire qui rythme mieux la consommation de l'eau par la plante pour en conserver une partie afin d'assurer un remplissage adéquat du grain (Richards, 1987). Le statut hydrique foliaire des 20 jours avant et après l'épisaison est un indicateur de cette capacité génotypique Blum *et al.* (1983) ne trouvent, cependant, aucune relation entre la surface foliaire et le degré de résistance à la sécheresse. Ces résultats sont confirmés par ceux de Pecetti *et al.* (1993). La sélection pour une réduction de la dimension des feuilles est compensée par une augmentation de leur nombre, avec un effet net nul sur la variation

de l'indice foliaire (Richards 1987). Blum (1996) précise que c'est la plasticité de l'indice foliaire qui intervient dans le contrôle de l'utilisation de l'eau du sol.

Les variétés possédant cette capacité modulent leur indice foliaire lorsque la sécheresse s'installe progressivement, pour réguler la transpiration en fonction de leur approvisionnement en eau du sol (Passioura, 1996). Cette modulation de la surface foliaire est la conséquence de la variation du statut hydrique des tissus en croissance et de la production d'hormones spécifiques tel que l'acide abscissique (Passioura, 1996).

Avant le stade floraison, la réduction de l'indice foliaire sous stress hydrique, est largement due à une expansion foliaire affaiblie. Après ce stade, la réduction est essentiellement due à la sénescence progressive du feuillage (Blum, 1996). La sénescence foliaire est un mécanisme qui intervient au niveau de la plante entière pour réduire la transpiration sous stress hydrique (contrôle non stomatique).

L'enroulement foliaire est considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation (Belhassen *et al.* 1995). Il contribue à la réduction de la transpiration (Monneveux et Belhassen, 1996), et joue un rôle conséquent dans la résistance aux températures élevées et au déficit hydrique de fin de cycle (Ortiz *et al.* 1991).

La capacité de modifier la composition en chlorophylle des feuilles, mesurée par le rapport des chlorophylles de type a et b, a un effet sur la proportion de la lumière incidente. Un rapport faible est associée à une couleur vert foncée (plus de chlorophylle a) notée en début printemps, quand le stress est moindre. Dès que les conditions de croissance deviennent moins favorables, avec l'installation des stress, la plante reconvertie une partie de la chlorophylle a en chlorophylle b. Elle prend de ce fait une couleur moins foncée (vert clair) permettant de réfléchir la luminosité reçue et par conséquent, de réduire la température foliaire et la transpiration (Reynolds *et al.* 1993).

Acevedo (1991) mentionne que la couleur avantageuse des feuilles, dans les environnements méditerranéens semi-arides, est le vert sombre avant le stade montaison, et vert clair après montaison. Oosterom et Acevedo (1992) remarquent que durant l'hiver, quand la radiation limite la photosynthèse, les variétés à feuilles sombres associées à un contenu élevé en chlorophylle de type a sont plus efficaces. Au printemps, quand la radiation est supra-optimale pour la photosynthèse, la couleur claire associée à un faible contenu en chlorophylle de type a permet la dissipation de la radiation et évite la photo-inhibition des photo-systèmes. La capacité de changer de couleur du feuillage et la régularité du stade de changement de couleur chez les variétés locales syriennes, indiquent une dépendance de la photopériode, probablement en interaction avec la température (Oosterom et Acevedo, 1992).

La pubescence des feuilles intervient dans la réduction des échanges gazeux et dans la réduction de la température foliaire (Monneveux et Belhassen, 1996).

Dakheel *et al.*(1993) notent que la hauteur du chaume présente une corrélation modérée avec le rendement en grain sous stress sévère. Cette liaison s'affaiblit à mesure que le stress s'amointrit, pour changer de signe lorsque la plante est conduite sous irrigation. Une paille relativement haute devient une caractéristique désirable sous stress hydrique.

Nachit et Jarrah (1986) affirment que la stabilité de la hauteur est importante en condition de sécheresse. En conditions de stress hydrique, une paille haute est plus apte à stocker plus de réserves glucidiques, qui sont susceptibles d'être transférées vers le grain, au cours de la phase de remplissage (Ben Abdallah et Ben Salem, 1993).

Le pédoncule de l'épi prend sa forme définitive 10 à 15 jours après le stade épiaison, au moment où les stress hydrique et calorique deviennent de plus en plus intenses (Richards, 1996). C'est cette partie du chaume qui est en général le siège d'intense transfert d'hydrates de carbone pour la finition du grain lorsque le remplissage se réalise sous stress (Dakheel *et al.* 1993). En effet, Nachit et Jarrah (1986) ainsi que Dakheel *et al.* (1993) observent une corrélation positive entre le rendement en grain et la longueur du pédoncule en conditions de sécheresse.

L'évaporation du sol, sous climat semi-aride, est une source majeure de perte d'eau (Van Damme, 1990). Pour réduire l'évaporation du sol, il faut une installation rapide de la culture qui permet une couverture complète du sol, très tôt en début du cycle. Les variétés dont le port est retombant, associé à une capacité élevée de tallage herbacée assurent cet objectif (Oosterom et Acevedo, 1992). Une bonne couverture végétale du sol permet, en outre, une meilleure interception de la radiation lumineuse améliorant ainsi l'activité photosynthétique, et augmente l'infiltration de l'eau dans le sol (Acevedo, 1991). Ces caractéristiques sont conditionnées par l'amélioration des capacités du génotype à croître sous de basses températures couramment enregistrées en fin d'automne-début hiver (Richards, 1996).

Une croissance rapide en début du cycle peut, cependant, engendrer une plus grande consommation d'eau avant l'anthèse, au détriment de la part qui doit rester pour assurer un remplissage de grain satisfaisant (Passioura, 1996; Turner, 1997). Il faut chercher à trouver un équilibre entre la part d'eau économisée par suite de la réduction de l'évaporation du sol et celle utilisée suite à l'amélioration de la croissance sous basses température. La réduction de l'évaporation du sol compense largement la surconsommation de la plante (El Hafid *et al.* 1998).

Dans le cas où on aboutit à un épuisement excessive de l'eau stockée, tôt dans la saison, il faut cultiver des variétés ayant une faible vigueur précoce associée à un port étalé en hiver pour assurer une couverture raisonnable du sol (Oosterom et Acevedo, 1992). Un port étalé et une faible vigueur précoce sont plus présents chez les variétés de type hiver (Oosterom et Acevedo, 1992).

Le dépôt de cire épicuticulaire diminue la perméabilité de la cuticule et augmente l'albédo de la culture (Blum, 1996). Les lignées glauques ont, par conséquent, des transpirations diurne et nocturne plus réduites, une température du feuillage plus faible (Richards, 1987), et restent en activité plus longtemps (Clarke *et al.* 1989). Selon Richards (1987), l'efficacité d'utilisation de l'eau est aussi améliorée.

La glauscescence foliaire est liée à la résistance à la sécheresse (Jana *et al.* 1990). Etudiant des lignées isogéniques pour ce caractère, Richards (1987) montre que les rendements biologique et en grains des lignées glauques étaient significativement plus élevés que ceux des lignées non glauques, en conditions de stress hydrique.

La présence de cire est contrôlée par un seul gène dominant (Monneveux et Belhassen, 1996).

Le système racinaire le plus efficace en conditions de stress hydrique est sujet à controverses. La résistance à la sécheresse est associée, selon Blum *et al.* (1983), à la production de la masse racinaire. Monneveux et Nemmar (1986) trouvent, en effet, que les génotypes résistants à la sécheresse ont un système racinaire très développé en surface et en profondeur, ce qui leur assure un bon approvisionnement en eau.

Gregory (1989) préconise, par contre, un système racinaire épars, peu développé, qui assure la conservation de l'eau. Ce système doit pouvoir aller plus en profondeur pour puiser le maximum d'eau disponible dans le profil cultural (Passioura, 1981). Ces résultats, apparemment contradictoires, s'expliquent par les différences des environnements dans lesquels les expérimentations ont été conduites. Chaque environnement nécessite un système qui lui est spécifique.

II.2.2 - Caractères physiologiques

La mesure de la température foliaire ou du couvert végétal a bénéficié d'un certain intérêt comme technique de criblage pour la résistance à la sécheresse, particulièrement avec l'avènement du thermomètre infra-rouge portable (Clarke, 1987). Les résultats obtenus par Dakheel *et al.* (1993) indiquent que durant les premiers stades de développement (jusqu'au stade tallage) quand la température de l'air est basse, la température foliaire est corrélée positivement avec le rendement en grains.

A partir du stade épiaison et durant la période de remplissage du grain, la température foliaire est corrélée négativement avec le rendement en grain. A ce stade de développement la température de l'air et le stress hydrique sont tous deux à des niveaux très élevés. Des températures basses du couvert végétal sont indicatives d'un potentiel hydrique foliaire élevé (Blum *et al.* 1982).

Selon Dakheel *et al.* (1993), la capacité des plantes à maintenir une température foliaire basse est une indication de leur grande capacité à extraire l'eau du sol et à se rafraîchir par transpiration. Ces variétés maintiennent une activité photosynthétique élevée autorisant un meilleur rendement, sous stress terminal.

La transpiration stomatique est la voie principale de perte d'eau par la plante. Elle représente approximativement 90 % des pertes totales d'eau chez les plantes vasculaires, en conditions normales (Monneveux et Belhassen, 1996).

En conditions de déficit hydrique, le contrôle de la conductance stomatique permet d'assurer un meilleur statut hydrique de la plante (Tardieu, 1996). Selon le même auteur, c'est une régulation à court terme et réversible, et permet une réduction du flux hydrique et, par conséquent, une diminution de la différence des potentiels hydriques racinaire et foliaire. Ce type de contrôle conduit, cependant, à une diminution de la concentration du CO₂ dans les chloroplastes, malgré l'apparente stabilité de sa concentration dans les espaces intercellulaires (Tardieu, 1996).

Sous stress hydrique, la transpiration épidermique (ou résiduelle) définie comme la somme des transpirations s'effectuant par la cuticule et par les stomates incomplètement fermés, joue un rôle important (Belhassen *et al.* 1995). Elle est caractérisée par la vitesse de déperdition de l'eau (RWL) des feuilles excisées (Clarke *et al.* 1989). Clarke *et al.* (1989) obtiennent des rendements en grains de 40 à 150 % plus élevés chez les génotypes à faible RWL par rapport à ceux des génotypes à RWL élevé. Ils concluent qu'un RWL faible contribue à améliorer les rendements en conditions de sécheresse. Ce mécanisme est inductible et ne semble pas coûter de l'énergie à la plante.

Des gains de rendements en grains appréciables peuvent être obtenus dans les systèmes de cultures pluviales des régions arides et semi-arides du bassin méditerranéen grâce à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (El Hafid *et al.* 1998) définie comme le rapport entre la matière sèche assimilée et l'évapotranspiration (Turner *et al.* 1989). La mesure directe de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) est difficile en conditions naturelles

de plein champ, et les essais en pots de végétation nécessitent beaucoup de travail, ce qui limite son utilité dans les programmes d'amélioration (Ehdaie *et al.* 1991).

Le facteur clé de la plante lié à l'efficacité de la transpiration est le rapport de la pression partielle du CO₂ dans la chambre sous stomatique (CO_{2i}) sur celle de l'atmosphère (CO_{2a}) (Turner, 1997). L'augmentation de l'efficacité photosynthétique de la plante, tout comme la fermeture des stomates, diminue la pression partielle du CO₂ dans la cavité sous stomatique (Turner, 1997). Si la variation de la capacité photosynthétique est la seule cause de la variation du CO₂ interne, l'augmentation de la capacité photosynthétique peut abaisser le rapport CO_{2i}/CO_{2a}. Dans ce cas, la quantité de carbone fixée par unité d'eau utilisée, ou EUE, va être augmentée (Ehdaie *et al.* 1991). Stockle (1991) signale que EUE est toujours négativement corrélée avec CO_{2i}/CO_{2a}, et que cette corrélation est amplifiée avec l'augmentation du niveau de stress.

Les symptômes du stress hydrique qui induisent un dysfonctionnement de la plante peuvent être simulés par traitement avec l'ABA (Blum, 1996). L'activation des gènes régulant la production de l'ABA fait suite à l'action de la sécheresse (Jensen *et al.* 1996). Classiquement considéré comme une hormone de stress, l'ABA joue un rôle majeur dans l'évitement du stress par son effet sur la fermeture stomatique, sur la réduction de l'élongation des feuilles et sa promotion de l'extension des racines (Tardieu, 1996). Blum (1996) estime cependant que l'utilité de l'ABA est très limitée dans la matérialisation de la résistance à la sécheresse des cultures, comparée à d'autres mécanismes. La contribution de cette hormone à l'amélioration de la production des cultures en conditions de sécheresse, est de ce fait contestable

La déshydratation ou le traitement à l'ABA des tissus mènent à une synthèse massive de nouvelles transcriptions protéiques. Ces transcriptions codent pour la synthèse de polypeptides de protéines dites LEA protéines (Late Embryogenesis Abundant proteins), qui s'expriment dans le grain en cours de maturation (Blum, 1996). Alors que d'une manière générale, la synthèse des protéines diminue lors du stress, le fait qu'une certaine priorité soit donnée à la synthèse des protéines de stress, dont les LEA protéines, suggère que ces protéines confèrent un avantage métabolique à la cellule (Gautier *et al.* 1993).

Une autre forme importante de la tolérance au stress hydrique est la tolérance au stress de post-anthèse (Acevedo, 1991). Chez le blé comme chez les autres céréales, le remplissage du grain dépend partiellement de la photosynthèse durant cette période et de la translocation des réserves à partir des parties végétatives de la plante (Acevedo, 1991) notamment à partir des tiges et des feuilles en sénescence (Simane *et al.* 1993).

La contribution des réserves d'assimilats de pré-anthèse, dans le maintien du remplissage, est particulièrement importante en cas de déficit hydrique (Turner, 1997). Divers facteurs peuvent affecter la capacité constitutive des céréales à supporter le remplissage du grain à partir des réserves de la tige, mais la quantité du stock dans les tiges est la plus importante (Blum, 1996). Turner (1997) signale que les génotypes transférant plus de réserves vers le grain sont capables de minimiser la variation des dimensions du grain et donc celle du rendement en grain.

II.3 - Tolérance à la déshydratation

La tolérance dans le cas d'un abaissement du potentiel hydrique peut s'exprimer par le maintien de la turgescence qui est rendue possible grâce à l'ajustement osmotique

(Belhassen *et al.* 1995). L'ajustement osmotique maintient les stomates ouverts et assure l'assimilation du CO₂ (Kameli et Losel, 1996). Elle améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau, retarde la sénescence, et maintient le transfert des assimilats vers le grain, augmentant par conséquent l'indice de récolte (Turner, 1997).

Selon Morgan *et al.* (1986), l'osmorégulation et le rendement en grain, chez le blé tendre et chez le blé dur, sont corrélés sur une large gamme de déficit hydrique. La capacité d'osmorégulation élevée améliore le rendement en grain à des niveaux allant de 11 et 17 % par rapport au rendement des génotypes présentant une faible capacité d'osmorégulation.

La diminution du potentiel osmotique est due à l'accumulation des solutés cellulaires compatibles (Monneveux et Belhassen, 1996). Parmi les composés organiques et minéraux qui interviennent dans l'ajustement osmotique, on évoque fréquemment les nitrates, le potassium, les acides organiques, les sucres solubles et la proline (Monneveux *et al.* 1994). Les ions inorganiques, comme le potassium, expliquent une grande part de la variation du potentiel osmotique foliaire des plantes non stressées où la quantité de solutés organiques est relativement faible.

Ces ions n'interviennent pas significativement dans le changement du potentiel osmotique induit par le stress (Kameli et Losel, 1995). Sous stress hydrique, ce sont les sucres solubles, et plus particulièrement le glucose, qui contribuent le plus à l'ajustement osmotique (Kameli et Losel, 1995). La variation de la quantité d'amidon d'un même tissu ne soutient pas un rôle important de l'amidon comme une source à partir de laquelle sont dérivés les sucres solubles qui induisent l'osmorégulation sous stress hydrique. Chez le blé dur, c'est la photosynthèse qui est vraisemblablement la source principale de solutés organiques qui s'accumulent sous stress hydrique (Kameli et Losel, 1996).

Mullet et Whitsitt (1996) remarquent que les portions de la tige qui ne s'allongent pas n'accumulent pas de sucres et ont une turgescence plus réduite par rapport aux zones en pleine croissance. Le suivi du développement progressif du stress hydrique révèle la capacité des feuilles jeunes de blé dur, à accumuler de grandes quantités de sucres comparativement aux feuilles plus âgées. Les feuilles plus jeunes présentent en fait une plus grande capacité d'ajustement osmotique que les tissus foliaires plus mûrs (Kameli et Losel, 1995).

Selon Couvreur *et al.* (1979), l'accroissement de la quantité des sucres solubles contenue dans les cellules peut augmenter la résistance au froid.

L'accumulation de la proline à des niveaux élevés sous stress hydrique fait qu'on lui attribue un rôle important dans l'ajustement osmotique (Monneveux, 1991). Haffeez khan *et al.* (1993) mesurent des augmentations dans les quantités de proline et de bêtaïne de 8 et 3.6 fois respectivement, mais leur contribution à l'ajustement osmotique reste faible. Kameli et Losel (1995) affirment même que les acides aminés n'ont aucune contribution à l'ajustement osmotique et qu'au contraire le contenu total des acides aminés diminue sous stress hydrique.

La résistance membranaire aux contraintes hydrique et thermique permet le maintien de l'activité photosynthétique (Poljakoff-Mayber, 1981). Les résultats obtenus par Blum et Pnuel (1990) indiquent que les dommages de la chaleur estimés par la méthode de la thermostabilité de la membrane cellulaire, sont négativement corrélés avec l'ajustement osmotique. Blouet *et al.* (1984) notent que la résistance au froid est liée à la capacité de la membrane à maintenir son intégrité et à résister à la progression des faibles températures.

D'après Morgan (1989), une grande élasticité des tissus est un autre mécanisme qui permet à la plante de maintenir la turgescence à un potentiel hydrique bas.

La tolérance de la dessiccation dépend de la conservation de la vie à l'état de dessèchement. Ceci est réalisé principalement par la modération des processus vitaux approchant un état de dormance profonde (Blum, 1996). La tolérance de la dessiccation est liée, entre autres, à une réduction de l'activité chimique de l'eau et à une diminution de l'hydratation des macromolécules (Belhassen *et al.* 1995). C'est un mécanisme qui permet à la plante de survivre à des sécheresses extrêmes, mais ne contribue aucunement à l'amélioration de la production sous stress.

II.4 - Les caractères de production

Selon Richards (1996), la sélection pour le rendement en grain intègre tous les facteurs qui interviennent dans l'amélioration de la résistance à la sécheresse. Oosterom et Acevedo (1992) soulignent que la variation spatiale et temporelle des stress abiotiques engendre des interactions génotype x milieu élevées. Les gains génétiques de rendement sont remis en cause par ces interactions (Oosterom et Acevedo, 1992).

Simane *et al.* (1993) signalent que l'une des raisons principales de la lenteur de l'amélioration des rendements dans les environnements limités en eau, est le peu de connaissances sur les relations entre les composantes du rendement et les effets de compensation qui s'instaurent entre elles en fonction de la disponibilité de l'humidité. L'effet de compensation entre les composantes du rendement est un mécanisme de développement important qui est à même de reconstituer le rendement en grain lors de la reprise après stress (Blum, 1996). Cette compensation, entre la taille et le nombre, est le résultat des ressources limitées du milieu de production (Simane *et al.* 1993).

Blum et Pnuel (1990) remarquent qu'il n'y a aucune relation entre la capacité de tallage herbacée et le nombre d'épis montant par unité de surface. Abbassenne *et al.* (1997a) soulignent que les meilleurs rendements en grains de blé dur en zones semi arides d'altitude sont le résultat de la capacité génétique à produire plus d'épis par unité de surface associée à une bonne fertilité. Les résultats obtenus par Bouzerzour *et al.* (1998) montrent que la contribution au nombre de grains/m² vient plus du nombre de grains/épi que du nombre d'épis/m² qui se forme en période plus favorable, chez l'orge.

Simane *et al.* (1993) remarquent que le nombre de grains/épi contribue plus directement au rendement en grain chez le blé dur conduit en conditions semi-arides. Ledent (1978) trouve que la fertilité est la composante du rendement la plus importante. Couvreur (1981) note que le poids moyen du grain, composante formée le plus tardivement, est associé négativement au nombre de grains formés par unité de surface.

Le poids du grain contribue très peu à la variation du rendement en grain des variétés locales sous stress, probablement à cause de la hauteur élevée de ces variétés qui supportent la croissance du grain par transfert des réserves des tiges, en conditions de stress (Blum *et al.* 1989).

Selon Abbassenne *et al.* (1997a) le taux de remplissage par grain explique mieux les différences dans le poids moyen du grain que les différences dans la durée des phases. Les résultats obtenus par Gebeyehou *et al.* (1982) suggèrent qu'il est possible d'améliorer simultanément le taux du remplissage du grain et le poids du grain sans allonger la durée du remplissage du grain. Simane *et al.* (1993) trouvent que tous les effets directs des composantes du rendement sont positifs, suggérant que quand les autres composantes du

rendement sont maintenues constantes, chaque effet direct aboutit à une augmentation du rendement.

Selon Clarke et al. (1991), une biomasse élevée est une caractéristique désirable en milieux semi-arides. Siddique et al. (1989) soulignent que la biomasse élevée est la cause principale des rendements élevés enregistrés chez les variétés récentes.

Les résultats obtenus par Abbassenne *et al.* (1997b) indiquent que le poids de la matière sèche de l'épi ou celui des épis/m², au stade épiaison, n'est d'aucune utilité dans la prévision du rendement en grain final.

Dakheel *et al.* (1993) notent que l'indice de récolte est positivement corrélé avec le rendement en grain dans tous types d'environnements. Richards (1987) remarque que l'indice de récolte sous conditions de croissance non limitantes, est de 50%, il chute à des valeurs de 35% dans les régions arides. Ce qui fait douter sur les possibilités que l'amélioration de cet indice engendrent des augmentations du rendement en grain, sous stress hydrique. Ce rôle semble conditionné par la réalisation d'une biomasse aérienne élevée, dont il faut ensuite extraire le maximum sous forme de grains.

La stabilité du rendement en grain, perçue en termes de minimisation des chutes de rendements, est un objectif important dans les environnements marginaux (Richards, 1996). Bouzerzour *et al.* (1998) affirment que stabiliser la production en environnements fluctuants est une tâche aussi importante que celle de chercher à l'augmenter. En Algérie, les nouvelles variétés de blé dur ont montré une très faible stabilité de rendement en donnant des rendements élevés les bonnes années et des rendements faibles en années problématiques (Bouzerzour *et al.* 1995).

Simane *et al.* (1993) affirment, par contre, que le rendement potentiel et la stabilité sont deux paramètres indépendants qui contribuent à l'adaptation aux environnements à faible pluviométrie.

II.5 - Notion d'idéotype de plante résistante à la sécheresse

Les travaux de physiologie et d'amélioration des plantes, allant dans la même direction, indiquent que la résistance à la sécheresse est vraisemblablement le résultat d'une combinaison de nombreux caractères morpho-physiologiques (Acevedo et Ceccarelli, 1989). En effet, chaque mécanisme mentionné pris individuellement n'implique pas nécessairement la résistance à la sécheresse du génotype qui le porte (Van Damme, 1990).

L'évidence expérimentale suggère que lorsque la variabilité environnementale est élevée suite à des différences imprévisibles dans la fréquence, le moment et la sévérité des stress climatiques, il y a différentes combinaisons de caractères qui sont susceptibles de conférer la résistance à la sécheresse (Ceccarelli, 1994). Le développement d'un idéotype de plante pour un environnement cible dépend donc, de la capacité à prédire les effets environnementaux sur les plantes, et les réactions des plantes aux stress, dans le contexte d'un système agro-écologique donné (Blum, 1996).

Selon Jana et al. (1990), Il n'y a probablement pas une seule architecture de caractères idéale pour un environnement variable. Au contraire, il y a des indications que différentes combinaisons de caractères peuvent aboutir à un même niveau de rendement en grain, sous stress (Acevedo et Ceccarelli, 1989).

III - Méthodes d'identification des caractères de résistance à la sécheresse

L'incapacité du rendement en grain, utilisé seul comme critère de sélection, à améliorer la production en conditions environnementales difficiles, suggère de mettre en œuvre une stratégie de sélection basée sur l'identification, la description et la validation des caractères et mécanismes permettant d'atteindre un tel objectif. L'étude génétique de ces caractères et la recherche de marqueurs moléculaires qui leur sont associés sont souhaitables (Belhassen *et al.* 1995).

D'après Richards (1996), le frein à la réalisation d'un progrès de rendement en grain significatif, dans les environnements à humidité limitée, résulte de la variation de la multitude de caractères qui semblent conditionner le rendement dans de tels milieux. L'identification des caractères, les plus marquants, est très difficile et demande du temps. Les paramètres morpho-physiologiques retenus ne peuvent, en toute rigueur, être utilisés en sélection qu'après que leur rôle effectif dans la tolérance soit vérifié et leur héritabilité suffisante pour donner prise à la sélection (Belhassen *et al.* 1995).

L'analyse des liaisons inter-caractères est le plus souvent utilisée pour mesurer l'influence d'un caractère particulier sur le rendement en grain. Cependant, une corrélation n'implique pas nécessairement une relation de cause à effet, à cause notamment de l'effet indirect des autres caractères liés au caractère en question. La validation du rôle d'un caractère donné peut être effectuée soit en créant des lignées isogéniques, soit en appliquant un schéma de sélection divergente (Belhassen *et al.* 1995).

L'évaluation et la vérification des caractères basés sur l'utilisation des lignées isogéniques tendent à simplifier extrêmement l'interaction entre caractères, puisque l'approche donne l'information sur l'effet d'un seul caractère particulier dans un fond génétique spécifique (Ceccarelli *et al.* 1991). La création de lignées isogéniques n'est en fait, en l'état actuel des recherches, réalisable que pour des caractères morphologiques, à déterminisme génétique simple. Dans le cas des caractères physiologiques à déterminisme génétique plus complexe, il est plus réaliste d'envisager la création de lignées issues de la sélection divergente (Belhassen *et al.* 1995).

Selon Acevedo et Ceccarelli (1989), l'approche basée sur la sélection divergente pour une combinaison de caractères apparaît plus efficace car elle offre la possibilité d'évaluer le rôle des caractères, individuellement ou en combinaison, dans des fonds génétiques assortis aléatoirement. Cette méthode fournit l'information sur l'héritabilité des caractères considérés et autorise une comparaison de l'efficacité de la sélection entre la sélection basée sur le rendement et celle basée sur les caractères physiologiques et morphologiques.

Selon Vartanian (1996), l'utilisation de mutants est une méthode prometteuse pour détecter les gènes impliqués dans le développement ou dans la réaction aux stress environnementaux. Il souligne que les lignées développées à partir de cellules résistantes (mutantes) aux stress tels que la salinité, les basses températures et les métaux lourds, ont été largement développées. Elles fournissent un outil appréciable pour les études fondamentales sur les bases moléculaires et cellulaires de la tolérance aux stress.

Le développement des techniques de biologie moléculaire a ouvert une nouvelle voie pour l'étude des réactions de la plante face au stress, au niveau chromosomique et même au niveau de l'expression du gène (Belhassen *et al.* 1995). Vu que de nombreux gènes sont impliqués dans l'expression de la résistance à la sécheresse, la biologie moléculaire peut

aider à l'identification et la sélection de ces gènes et à la détermination de leur influence sur le rendement en grain (Turner, 1997).

Selon This et This (1993), l'objectif principal de l'utilisation de la génétique moléculaire est de localiser et d'étiqueter au niveau génomique, les gènes ou les séquences géniques impliquées dans la tolérance chez les génotypes tolérants afin de pouvoir suivre aisément leur devenir au cours du processus de sélection. L'utilisation des marqueurs moléculaires pour traquer les caractères morpho-physiologiques peut, par conséquent, fournir des méthodes plus simples dans le futur (Turner, 1997).

Ces dernières années un nombre énorme de gènes de réponse au stress hydrique ont été isolés et caractérisés en utilisant les techniques moléculaires (Bartels *et al.* 1996). De nombreuses techniques de marquage moléculaire sont actuellement disponibles. Quarrie (1996) énumère plusieurs d'entre elles parmi lesquelles on peut citer l'hybridation moléculaire sur membrane tels que le RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphism), les techniques d'hybridation *in situ* comme le FISH (Fluorescence In Situ Hybridization) et celles qui se basent sur la technique PCR (Polymerase Chain Reaction) tels que la RAPDS (Random Amplified Polymorphic DNAs) et le AFLPS (Amplified Fragment Length Polymorphism's).

D'après Quarrie (1996), les techniques de cartographie QTL sont le domaine de la technologie des marqueurs moléculaires qui est susceptible de la plus grande contribution à l'augmentation de l'efficacité de l'amélioration variétale pour la résistance aux stress abiotiques. Le terme QTL (Quantitative Trait Loci) désigne un locus déterminant un caractère quantitatif généralement de type multigénique. Les méthodes de recherche des QTL sont basées sur des études de liaisons génétiques entre les QTL et des marqueurs moléculaires. La localisation de tous les QTL majeurs d'un caractère particulier et la précision avec laquelle ils peuvent être localisés sur la carte génétique, dépend de la densité et la distribution des marqueurs dans la population cartographiée utilisée (Quarrie, 1996).

Schématiquement, on mesure la valeur du caractère analysé sur une descendance en ségrégation sur laquelle aura préalablement été établie une carte génétique sommaire (This et This, 1993). Le développement de la cartographie des QTL permet actuellement d'identifier des QTL avec seulement la descendance de 100 individus de la F2 (Quarrie, 1996). En comparant la coïncidence des QTL de caractères spécifiques avec des QTL du rendement, obtenus sous stress hydrique, chez la population cartographiée, il est possible de tester si une réaction constitutive ou adaptative spécifique au stress hydrique est significative pour l'amélioration de la résistance à la sécheresse (Quarrie, 1996). Plusieurs QTL correspondant à différents paramètres physiologiques liés à la tolérance au stress, sont susceptibles de se trouver sur un même locus. Ce locus présenterait alors un grand intérêt pour la sélection multi-caractères (This et This, 1993)

Selon Belhassen et al (1995), l'objectif des approches basées sur la recherche de QTL vise à mettre en place des programmes de sélection assistée par des marqueurs.

Winter *et al.* (2000) soulignent que seuls 15 % des gènes sont actifs dans une cellule particulière. Les 85% restant demeurent inactifs. Ils ne sont pas transcrits en ARNm et ne conduisent pas à la synthèse protéique. En outre, des gènes différents sont actifs dans des types cellulaires différents. Ces auteurs notent également, que les ARNm qui codent pour des protéines présentes en fortes concentrations dans la cellule sont plus abondants que ceux qui codent pour des protéines présentes à de faibles concentrations.

Les techniques d'électrophorèse et d'hybridation moléculaire permettent de séparer et repérer des protéines et ARNm nouvellement apparus ou disparus dans une plante

(Belhassen et al. 1995). La technique Northern blotting et l'hybridation moléculaire *in situ* permettent de détecter les ARNm, et donc, de déterminer les gènes actifs dans les différents types de cellules. Selon Winter *et al.* (2000), le Northern blotting technique informe sur la façon dont les gènes sont activés ou inactivés, sur leur niveau d'expression et sur la taille des différents ARNm. L'hybridation *in situ* détecte l'expression des ARNm dans des cellules intactes. Elle est utile pour identifier des cellules individuelles exprimant un gène donné dans un tissu contenant plusieurs types cellulaires.

Il est donc possible d'analyser les modifications du génome se produisant au cours du stress, au niveau de la transcription (lecture de la partie codante du gène et synthèse d'ARNm), de la traduction de l'ARNm en protéines et des modifications post-traductionnelles des protéines (Belhassen *et al.* 1995). Ces techniques fournissent d'importantes informations sur l'induction des produits d'expression lors des stress.

Une première approche consiste à induire un stress sur une plante entière ou sur une plantule, puis à suivre les modifications au niveau des protéines ou des ARNm au cours du stress. On peut ensuite remonter aux gènes correspondant en utilisant les protéines ou ARNm spécifique du stress pour fabriquer des sondes destinées à cribler des banques de gènes. Plusieurs gènes ont été ainsi identifiés grâce au suivi de l'expression génique au cours du développement (Belhassen *et al.* 1995).

IV - Amélioration de la résistance à la sécheresse

Si l'on considère que la moitié des surfaces arables dans le monde sont arides ou sensibles à la sécheresse, la création de variétés tolérantes au stress hydrique constitue un objectif d'amélioration important pour les sélectionneurs (Ruivenkamp et Richards, 1994).

Ceccarelli et Grando (1996) mentionnent que l'amélioration dans les environnements à climat irrégulier et imprévisible est lente et difficile. La sélection est compliquée par le nombre de systèmes morphologiques et physiologiques impliqués dans la résistance à la sécheresse (Clarke, 1987), ainsi que par les interactions de la sécheresse avec les autres stress abiotiques.

IV.1 - Utilisation de procédés d'amélioration classique

Ceccarelli (1994) signale que l'une des raisons principales du faible progrès dans l'amélioration des plantes pour les environnements marginaux réside dans l'utilisation des principes d'amélioration développés et appliqués avec succès dans les environnements favorables. En effet, la plupart des programmes d'amélioration partagent les concepts suivants: (1) la sélection doit être conduite en conditions bien aménagées des stations de recherche, (2) les cultivars doivent être génétiquement homogènes (lignées pures, hybrides, clones) et doivent être adaptés sur une large gamme de situations géographiques et (3) les races locales adaptées doivent être remplacées parce qu'elles ne sont pas productives et sont sensibles aux maladies (Ceccarelli et Grando, 1996).

Les stratégies et méthodologies d'amélioration des rendements en grains des environnements variables sont la sélection directe pour l'adaptation spécifique à l'environnement ciblé, l'utilisation de modèles expérimentaux et techniques parcellaires pour contrôler les variations environnementales et l'utilisation du germoplasme local adapté.

IV.1.1 - Choix de l'environnement de sélection

Le choix de l'environnement optimal de sélection est une décision clé dans l'amélioration du rendement en conditions de sécheresse (Zavala-Garcia *et al.* 1992). La question qui se pose, en premier lieu, est si l'évaluation et la sélection des génotypes les plus performants sous stress hydrique sont meilleures en présence ou en absence de stress? (Acevedo et Ceccarelli, 1989).

Selon Calhoun *et al.* (1994) deux stratégies contradictoires sont suggérées. Les génotypes doivent être évalués en conditions de stress pour minimiser l'interaction génotype x environnement. Mais il en résulte une faible héritabilité. Les génotypes doivent être évalués en conditions optimales maximisant l'héritabilité, mais dans ce cas, on doit affronter les problèmes posés par la présence d'interactions génotype x environnement.

La troisième alternative, utilisée par le centre international de l'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT), consiste à l'évaluation simultanée en conditions optimales et en conditions sèches, afin de sélectionner des génotypes performants dans les deux environnements. Cependant, l'évaluation ultime doit être effectuée dans l'environnement cible avant la recommandation du génotype pour la production commerciale (Calhoun *et al.* 1994).

Selon Richards (1996), la sélection pour le rendement en grain dans les environnements favorables est typiquement plus efficace que dans les environnements stressés. Hadjichristodoulou (1988) affirme que les variétés, à rendement élevé sous stress, sont celles qui répondent le mieux aux bonnes conditions environnementales. L'école de pensée qui préconise la sélection pour la résistance à la sécheresse en pratiquant la sélection dans des environnements au climat plus favorable, est très contestée (Clarke *et al.* 1991; Ceccarelli, 1994; Bouzerzour et Dekhili, 1995; Belhassen *et al.* 1995; Blum, 1996; Mullet et whitsitt, 1996).

Dans la région de Sétif, les variétés locales de blé dur Mohammed Ben bachir (MBB) et d'orge Tichedrett gardent une part importante dans les emblavures, car elles procurent aux agriculteurs un minimum de sécurité grâce à une meilleure stabilité de leurs rendements dans un environnement très variable. Bouzerzour *et al.* (2002) mentionnent, suite à une étude comparant la productivité et l'adaptation de l'orge et des blés, en zone semi-aride d'altitude, que l'orge est plus adaptée que le blé dur à cette région. Les variétés nouvelles n'apportent de gain génétique significatif pour le rendement grain que chez les blés mais pas chez l'orge. Barberousse n'arrive à dépasser Tichedrett que dans 53% des cas. Waha arrive à produire significativement mieux que MBB, 12 années sur 15. HD 1220 (un blé tendre) se montre significativement plus productif que Mahon Démias, depuis son adoption par la grande culture.

Hadjichristodoulou (1988) et Richards (1996) suggèrent toutefois une sélection à la fois en conditions optimales et en conditions de stress afin de maximiser la réponse à la sélection en conditions favorables tout en maintenant les allèles de résistance à la sécheresse. Ceccarelli (1994) note que quand des génotypes différents sont évalués dans une gamme d'environnements suffisamment large, les interactions génotype x environnement du type cross-over (croisées) sont très courantes (Figure 2).

La définition de l'environnement joue un rôle principal dans la détermination des stratégies d'amélioration. Si l'environnement se caractérise par un rendement moyen supérieur à celui indiqué par le cross-over, alors la lignée A est adaptée à tous les environnements (Figure 2). Mais, si on définit l'environnement par un rendement moyen en dessous de celui du cross-over, la sélection doit se faire à des niveaux de rendements

faibles (Ceccarelli, 1994), c'est à dire, dans l'environnement stressé (Acevedo, 1991; Mullet et Whitsitt, 1996).

La justification de la sélection dans les environnements favorables, sans tenir compte de la nature de l'environnement ciblé, est la faible héritabilité mesurée dans les environnements variables (Bouzerzour et Dekhili, 1995). La théorie des réponses corrélatives à la sélection montre que non seulement l'héritabilité, mais aussi le coefficient de corrélation génétique doit être considéré avant de décider de l'environnement optimal de sélection (Ceccarelli, 1994). Si X est un environnement marginal et A un caractère hypothétique, on peut sélectionner dans le même environnement en visant une réponse directe à la sélection (Rx), ou bien nous pouvons sélectionner pour A dans un environnement (Y) plus favorable en visant une réponse corrélative à la sélection (CRx).

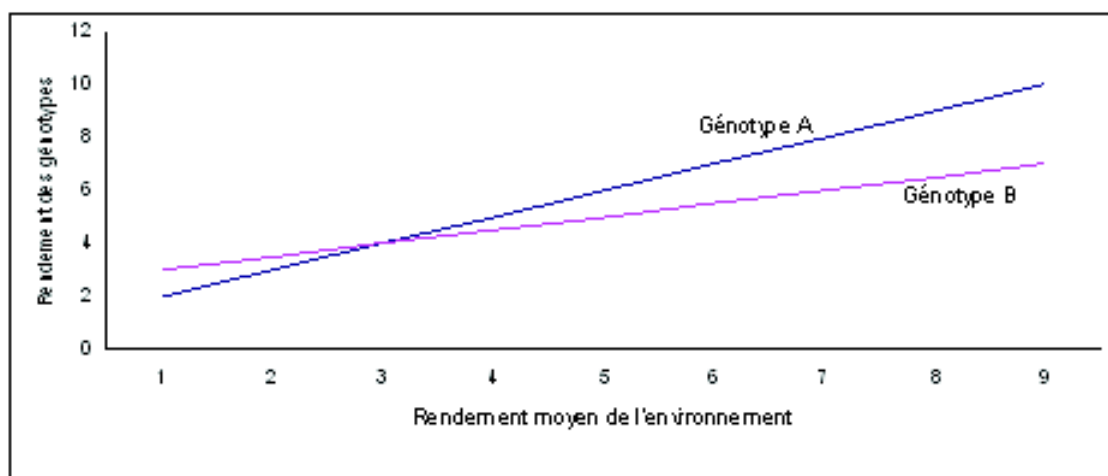


Figure 2. Interaction génotype x environnement du type cross-over : A et B sont des génotypes typiques sélectionnés respectivement dans des environnements favorables et stressés (Ceccarelli, 1994).

L'efficacité de la sélection indirecte dans Y par rapport à la sélection directe dans X est donnée par la formule: $CRx/Rx = rg (hy/hx)$. rg est le coefficient de la corrélation génétique entre A_x et A_y , et h_y et h_x sont les racines carrées des héritabilités de A dans les deux environnements X et Y (Falconer, 1981). Lorsque $h_y = h_x$, la valeur maximale du rapport CRx/Rx est atteinte pour une valeur de rg égale à 1. Quand les héritabilités sont égales, la sélection directe sera toujours plus efficace que la sélection indirecte, vu que rg est rarement égale à 1. Si rg prend des valeurs de l'ordre 0.1 à 0.2, h_y doit être au moins de 5 à 10 fois plus élevé que h_x pour que CRx soit plus élevé que Rx . Donc l'héritabilité seule n'est pas suffisante pour déterminer l'environnement optimal de sélection (Ceccarelli, 1994).

Blum (1996) remarque que le rendement potentiel est souvent négativement corrélé avec l'adaptation à la sécheresse. Les génotypes très productifs accusent une plus grande réduction du rendement sous stress hydrique comparativement aux génotypes à rendement modéré. L'auteur signale que des exemples de relations positives entre un rendement potentiel élevé et la sensibilité à la sécheresse sont devenus très courants.

Fellah *et al.* (2001) trouvent une relation négative entre l'adaptation, mesurée par la tolérance au stress calorique et le rendement en grain. Les variétés tolérantes, produisent moins en absence de stress comparativement aux variétés sensibles. L'inverse est vrai en présence de stress, avec un écart de rendements entre environnements, plus élevé chez les génotypes sensibles que chez les génotypes tolérants. L'amplitude de l'écart est due

surtout aux bonnes performances des génotypes sensibles en conditions optimales et non à leurs performances sous stress hydrique qui restent très proches de celles des variétés tolérantes.

Selon Ceccarelli (1994), de nombreux programmes d'amélioration nationaux et internationaux considèrent la recherche d'une large adaptation comme un objectif primordial. Cette sélection conduit à l'identification d'un nombre réduit de génotypes adoptés sur de vastes superficies, où la variation climatique est très importante. Cette pratique qui réduit de la diversité génétique, n'est pas sans risque d'autant plus que les agriculteurs ne sont pas intéressés par des cultivars largement adaptés dans l'espace, mais plutôt par des cultivars spécifiquement adaptés à leurs conditions et utilisations.

Annicchiarico et Perenzin (1994) notent que dans une région comprenant plusieurs localités, une interaction génotype x localité plus importante qu'une interaction génotype x saison suggère une subdivision de cette région en plusieurs macro-environnements uniformes (Sous-régions) de sélection. Passioura (1996) remarque que les environnements de stress, souvent très variables, nécessitent plusieurs années d'expérimentations pour démontrer les avantages d'un cultivar donné.

IV.1.2 - Importance des variétés locales

Malgré qu'elles soient peu productives et susceptibles aux maladies (Ceccarelli et Mekni, 1985), les variétés locales restent la base des systèmes agricoles des environnements marginaux (Ceccarelli, 1994) grâce à leur adaptation et la stabilité de leurs rendements (Ceccarelli et Mekni, 1985).

Selon Ceccarelli et Grando (1996) dans certaines localités et années sèches, l'avantage de rendement en grain des variétés locales varie de 38 à 83 % par rapport aux variétés améliorées.

Les variétés locales sont le résultat d'une longue sélection naturelle (Jana *et al.* 1990). Elles sont généralement formées de mélange de différents génotypes, et portent par conséquent une importante variabilité génétique dans un fond génétique adapté (Ceccarelli, 1994).

La sélection à l'intérieur des variétés locales est une méthode facile en amélioration des plantes. Des augmentations de rendement de 12 à 16% ont été obtenues grâce à cette méthode dans des conditions difficiles et sans aucun apport d'engrais (Ceccarelli, 1994). Les meilleures lignées pures issues des variétés locales sont utilisées en croisement soit avec d'autres lignées pures issues des races locales ou avec un matériel introduit, ou comme mélanges de lignées pures supérieures améliorées (Ceccarelli, 1994). Ce dernier point doit être vraisemblablement la meilleure voie à long terme pour faire face à la variabilité imprévisible des stress abiotiques (Ceccarelli, 1994).

Benlaghid *et al.* (1990) suggèrent d'utiliser directement des populations de blés sahariens en croisements parce que ces populations, dans leur milieu naturel, font face à un ensemble de contraintes environnementales parmi lesquelles la sécheresse de l'air, des excès importants de températures et une forte salinité du sol qui dépasse souvent les 5% en NaCl.

IV.1.3 - Hybridation interspécifique

L'hybridation interspécifique a été également suggérée pour améliorer la résistance des cultures aux stress biotiques et abiotiques (Bansal et Sinha, 1991). Monneveux *et al.* (1994) rapportent qu'au sein du genre *Triticum*, certaines espèces tétraploïdes (*T. dicoccoïdes*, *T.*

dicoccum, *T. turgidum*, *T. polanicum*, *T. carthlicum*, et *T. timopheevi*) et certaines espèces diploïdes (*T. monococcum*) et hexaploïdes (*T. aestivum*) ont été utilisées pour améliorer la résistance aux maladies ou la qualité de blé dur avec lesquelles il se croise facilement. Les 21 espèces du genre *Aegilops* (voisin du genre *Triticum*) peuvent aussi être croisés avec le blé dur et le blé tendre (Monneveux *et al.* 1994).

Malgré l'intérêt potentiel évident que revêt l'utilisation en sélection des espèces apparentées, leur utilisation apparaît complexe et nécessite un grand nombre de précautions, ainsi que l'utilisation combinée d'outils physiologiques et de marqueurs moléculaires. Parmi les difficultés rencontrées, il y a celles liées au croisement et à la présence dans le matériel interspécifique de départ d'un grand nombre de gènes et caractères indésirables.

Il y a aussi les problèmes liés à la signification agronomique des mécanismes de tolérance vu que de nombreuses ressources apparentées sauvages possèdent une résistance globale aux stress qui se manifeste essentiellement par une grande capacité à survivre, alors que dans le cas des variétés cultivées, on recherche plutôt la productivité. Ce problème peut être actuellement résolu grâce aux progrès rapides réalisés en biotechnologie. Ces progrès permettent de localiser les gènes contrôlant les mécanismes de tolérance et de les transférer dans un fond génétique adéquat du point de vue productivité et durée du cycle de développement.

IV.2 - Utilisation des techniques de biotechnologies

La création de variétés tolérantes par la sélection classique est un processus lent et difficile, que limite l'insuffisance de connaissances sur les bases génétiques de la tolérance. Les techniques de la biotechnologie moderne apportent de nouvelles possibilités qui s'inscrivent en complément des stratégies de recherche classique (Jaffé et Rojas, 1994).

IV.2.1 - Culture *in vitro*

La sélection *in vitro* en utilisant PEG (polyéthylène glycol) comme agent osmotique permet la régénération de lignées cellulaires tolérantes à la sécheresse chez de nombreuses espèces (Hsissou et Bouharmont, 1994). L'addition de polyéthylène glycol aux milieux de culture est utilisée pour réduire le potentiel hydrique externe pendant la croissance de cals ou durant la phase de régénération. La concentration en PEG et la durée du stress doivent être suffisantes pour empêcher la croissance des cellules originales, et en même temps permettre la prolifération de cellules tolérantes (Hsissou et Bouharmont, 1994). Les résultats obtenus par Hsissou et Bouharmont (1994), indiquent que près de 50 % des plantules régénérées à partir des cals survivants montrent une amélioration de la tolérance à la sécheresse par rapport aux témoins.

IV.2.2 - Génie Génétique

L'ingénierie génétique permet de transférer des parties de génome intéressantes dans des plantes d'intérêt agronomique (Belhassen *et al.* 1995). Turner (1997) rapporte que de nombreuses cultures importantes ont été transformées de telle façon que des gènes de résistance aux parasites et aux maladies ont été insérés à partir d'autres plantes. Dans le cas de l'amélioration de la résistance à la sécheresse, une stratégie particulièrement intéressante consiste à transférer certains gènes induisant la tolérance à la dessiccation

à partir de plantes désertiques ou d'autres espèces sauvages dans des cultures d'intérêt agronomique (Tardieu, 1996).

IV.2.3 - Sélection assistée par des marqueurs (MAS ou marker-assisted selection)

Une autre technologie de pointe est la sélection assistée de marqueurs. Les marqueurs moléculaires et les cartes génétiques qu'ils génèrent peuvent être utilisés non seulement pour assister les généticiens dans la détermination des facteurs régulant un caractère particulier, mais fournissent aussi, d'une part, aux physiologistes, agronomes et sélectionneurs un nouvel outil précieux pour identifier les caractères importants dans l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques, et d'autre part, des méthodes pour contrôler l'incorporation de ces caractères dans les variétés améliorées (Quarrie, 1996)

Pour des caractères à hérédité simple comme la hauteur de la plante par exemple, la MAS a été utilisée avec succès pour sélectionner des génotypes spécifiques, alors que la sélection basée sur le phénotype est soit techniquement difficile ou très lente. En outre, l'analyse théorique de MAS prédit que la sélection des caractères quantitatifs peut être plus efficace que la sélection basée uniquement sur le phénotype (Quarrie, 1996).

L'avantage qu'il y a à sélectionner indirectement pour des marqueurs moléculaires associés plutôt que pour le caractère génétique lui-même est que la présence du marqueur dans la descendance d'un croisement peut être démontrée au laboratoire sur les plantules à l'abri de toute interférence de l'environnement (Visser, 1994). De même, qu'une procédure de sélection qui peut durer une à plusieurs saisons avec la sélection classique peut être complétée en un jour avec certaines méthodes de MAS (Quarrie, 1996).

Visser (1994) signale que l'efficacité de la technique MAS dépend de la disponibilité d'un grand nombre de marqueurs moléculaires. Il importe également de disposer d'une carte de génome établissant la disposition physique des caractères génétiques d'une espèce (Visser, 1994). Pour le maïs, le riz et le soja, et dans une certaine mesure le blé et le haricot, des cartes génétiques ont été dressées et les marqueurs moléculaires sont disponibles (Visser, 1994). Pour que la MAS soit efficace, les marqueurs doivent être étroitement liés aux gènes d'intérêt. Quand une carte de haute densité est déjà disponible pour l'espèce en question cela ne doit pas être un grand problème. Cependant, il est souvent nécessaire d'ajouter des marqueurs supplémentaires dans la région d'intérêt (Quarrie, 1996).

La MAS utilise de nombreuses techniques de marquage très différentes les unes des autres, on peut citer à titre indicatif, la technique GISH qui est une variante de la technique FISH (fluorescence in situ hybridization). Selon Quarrie (1996), la méthode GISH donne, grâce à l'utilisation de fluorochromes, un signal d'intensité uniforme le long de toute la longueur du chromosome. Elle permet de distinguer clairement les chromosomes étrangers et la proportion d'ADN étranger incorporé dans le fond d'un receveur déterminé. Cette technique peut avoir un impact majeur dans le contrôle de l'introgession du matériel génétique étranger dans les espèces cultivées (Quarrie, 1996).

DEUXIEME PARTIE : Matériel et méthodes

I - Description du site expérimental

L'étude a été conduite à la Station Expérimentale Agricole de Sétif, située à 4 kilomètres au Sud-Ouest de la ville de Sétif. Le site expérimental se trouve à une altitude moyenne dépassant les 1080 m, à la latitude 36°9' Nord et à la longitude 5°21' Est. Ce site est représentatif de la zone centrale des hautes plaines. Il se caractérise par des terres plates, du type argilo-calcaire, peu profondes et peu fertiles, et un fort risque de gel tardif et de la sécheresse en fin de cycle (OTI, 1974).

II - Conduite de l'expérimentation

II.1- Première année d'essai (1996/97)

II.1.1 - Mise en place

L'expérimentation mise en place au cours de la campagne 1996/97 a porté sur l'évaluation de 119 génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) (Tableaux 1 et 2). Ce matériel végétal est constitué de 72 variétés de diverses origines notamment d'Algérie, de la Tunisie, du Maroc, de Syrie, d'Espagne, de France, d'Italie, du Mexique, de la Turquie, et des USA et de 47 lignées avancées. Les lignées avancées sont des générations F5 et F6 sélectionnées à l'intérieur d'une population F2 dont les croisements ont été réalisés à Sétif et à l'Icarda.

Les croisements ont été faits entre des variétés provenant des zones montagneuses de l'Iraq, la Syrie, le Yémen, l'Iran, l'Algérie et le Maroc, pour introduire la tolérance au froid et l'adaptation à l'altitude. La sélection pratiquée de la F2 jusqu'à la F5 ou F6 est une sélection visuelle qui ne tient compte que de la hauteur du chaume, du degré de précocité au stade épiaison et de la capacité de tallage-épi. Le témoin pour ces caractéristiques est le cultivar Mohammed Ben Bachir.

Le dispositif expérimental employé est constitué de blocs complètement randomisés avec 3 répétitions. La parcelle élémentaire fait 6 rangs de 5 m de long avec un espace de 20 cm entre rangs adjacents. L'essai a été installé sur une parcelle dont le précédent cultural est une jachère intégrale.

N°	Pedigree	Origine	N°	Pedigree	Origine	N°	Pedigree	origine
1	Hedba3	Algérie	2	Bidi 17	Algérie	3	Tell	Algerie
4	Cocorit71	Mexique	5	MEB	Algérie	6	Agathé	France
7	Inrat69	Tunisie	8	Guemgoum	Algérie	9	Mexicali.75	Mexique
10	O. Zenati 380	Algérie	11	Z. Bouteille	Algérie	12	Clairdoc	France
13	Acsad65	Syrie	14	Sahel 77	Algérie	15	Gloire	Algérie
16	Vitron	Espagne	17	Waha	Algérie	18	Guerou 1	Syrie
19	Ertés/Mario//Cando	Mexique	20	Sham3=Korifla	Syrie	21	Sahel	Algérie
22	Chen's	Mexique	23	Hedba3/Gdovz	Algérie	24	Storb/AA/21563	Mexique
25	Chen's/Altar84	Mexique	26	Fg/Palest//Mexi/3/	Mexique	27	Ardenté	France
28	Mrb17	Syrie	29	Rezzak	Maroc	30	Sabil	Syrie
31	Oumtel	Syrie	32	Montpellier	France	33	Kabir	Syrie
34	Zb/Fg	Algérie	35	Chen/Auk	Syrie	36	Polo//Glo/Swan	Algérie
37	Joric.69	Mexique	38	S. Capelli	Italie	39	B17/Waha//B17	Algérie
40	Hedba3/Pol.*2	Algérie	41	Bidi17/Kred//376	Algérie	42	Tex/Eng//Wump	Mexique
43	Capeiti	Italie	44	Gabgel 79	Turquie	45	Tunca79	Mexique
46	Calmila 79	Turquie	47	Kizihau91	Turquie	48	Kunduru414.44	Turquie
49	Kunduru 1149	Turquie	50	Hunter	USA	51	Auk2.94	Turquie
52	Auk3.94	Turquie	53	Auk4.94	Turquie	54	Auk5.94	Turquie
55	Auk6.94	Turquie	56	Auk7.94	Turquie	57	Auk8.94	Turquie
58	Auk9.94	Turquie	59	Auk10.94	Turquie	60	Mbvd1	Turquie
61	Mbvd2	Turquie	62	Mbvd4	Turquie	63	Mbvd5	Turquie
64	Mbvd6	Turquie	65	Mbvd7	Turquie	66	Mbvd9	Turquie
67	Mbvd10	Turquie	68	Mbvd11	Turquie	69	Mbvd12	Turquie
70	Mbvd14	Turquie	71	Mbvd15	Turquie	72	Boussalem3	Algerie

Tableau 1. Pedigree des variétés mises en essai au cours des campagnes agricoles 1996/97 et 1997/98.

N°	Pedigree	Origine	N°	Pedigree	origine
73	Kimmizi546/3/Raspinegro//Turk//S.4				Syrie
74	Kunduru8/3/Raspinegro//Turk//S.484				Syrie
75	SertBugday 25.2/5/Showa/Pl1/4/Chap//21563/3/Inrat69 1S				Syrie
76	SertBugday 25.2/5/Showa/Pl1/4/Chap//21563/3/Inrat69 2S				Syrie
77	SertBugday 25.2/5/Showa/Pl1/4/Chap//21563/3/Inrat69 3S				Syrie
78	Yumusak235/3/MG.623.476Hab1	Syrie	79	Cham1/Mrb//Geni4	Syrie
80	Cham.1/Mrb//Oumguer	Syrie	81	Heba3/Brachoua	Syrie
82	Richi/Cham 1S	Syrie	83	Sicilian/Algerian//Genil.3 1S	Syrie
84	Chen/Altar84//Lahn	Syrie	85	Kavama/Algerian//Mrb5/3/Cham11S	Syrie
86	Kavama/Algerian//Mrb5/3/Cham12s	Syrie	87	Algerian//Tensifi1/3/Brachoua	Syrie
88	Gignan/Algerian//Cham1/3/Wadhmz2-1S	Syrie	89	Gignan/Alge/Cham1/3/Wadhmz2.2S	Syrie
90	Mexican.311/Iraq//Mrb5//Sabil2.	Syrie	91	Jaquez/Stojocri.1//Wadahmaz2	Syrie
92	CI.9225/Trob's//Altar.84/3/AO's	Syrie	93	Mrb.3/Chen//Mbb.1S	Algérie
94	Mrb.3/Chen//Mbb.2s	Algérie	95	Mrb.3/Chen//Mbb.3S	Algérie
96	Mrb.3/Chen//Mbb.4s	Algérie	97	Korifla/MEB .1S	Algérie
98	Mrb.3/Chen//MEB .5S	Algérie	99	Mrb.3/Chen//MEB.6S	Algérie
100	Tr.32225/Gediz//MEB.1S	Algérie	101	Tr.32225/Gediz//MEB.2S	Algérie
102	Mrb.3/Chen//MEB .7S	Algérie	103	Mrb.3/Chen//MEB.8S	Algérie
104	Mrb.3/Chen//MEB.9S	Algérie	105	Korifla/MEB.2S	Algérie
106	Mrb.3/Chen 1S	Syrie	107	Mrb.3/Chen's 2S	Syrie
108	Mrb.3/Chen's.3s	Syrie	109	Mrb.3/Chen's.4S	Syrie
110	Mrb.3/chen//CI9225/3/Oumguer 1S	Algérie	111	Mrb.3/chen//CI9225/3/Oumguer 2S	Algérie
112	Mrb.3/chen//CI9225/Trob's 1S	Algérie	113	Mrb.3/chen//CI9225/3/Trob's 2S	Algérie
114	Clairdoc/Gedifla	Syrie	115	DSP (92/93) line #24 1S	Syrie
116	DSP (92/93) line #24 2s	Syrie	117	DSP (92/93) line #24 3	Syrie
118	DSP (92/93) line #24 4s	Syrie	119	DSP (92/93) line #24 5s	Syrie

Tableau 2. Pedigree des lignées avancées mises en essai au cours des campagnes agricoles 1996/97 et 1997/98

Les travaux réalisés sur cette parcelle ont été un labour profond fait au mois de décembre de l'année 1995, suivi de deux passages de cover-crop, le premier réalisé en mars pour reprendre le labour, et le second au mois de mai pour réduire de l'infestation des mauvaises herbes à levée tardive.

La parcelle a reçu du superphosphate à raison de 100 kg/ha juste avant la préparation des semilles, faite par un troisième passage du cover crop suivi d'une barre désherbeuse pour niveler le sol. Le semis a été fait le 15 novembre 1996. L'apport de l'engrais azoté (sulfate d'ammonium) et le désherbage ont été réalisés au mois de mars, au stade tallage. La récolte a été faite le 18 du mois de juin 1997.

II.1.2 - Les notations

Pour caractériser les géotypes sélectionnés, les caractères phéno-morpho-physiologiques suivants ont été mesurés au cours du cycle de développement de la plante. Ces caractères sont la durée de la phase végétative (PVG, j), comptée en jours calendaires de la levée au stade épiaison. La biomasse aérienne aux stades épiaison (BIOe, g/m²) et maturité (BIOm, g/m²) a été estimée à partir de la récolte d'un bottillon de végétation provenant d'un rang long de 1 m.

A maturité le bottillon de végétation récolté a servi à la détermination du nombre d'épis (NE/m²) et du poids des épis (PE/m²). Dix tiges porteuses d'épis sont prises au hasard de chaque bottillon de végétation sur lesquelles sont déterminées la hauteur du chaume (HT, cm), la longueur du pédoncule (Col, cm), la longueur de l'épi (LE, cm) et la longueur des barbes (LB, cm).

Le poids de la paille (PII, g/m²) est déduit par différence entre la biomasse aérienne (BIOm, g/m²) et le poids des épis (PE, g/m²). Le rendement en grain est déterminé suite à la récolte de l'expérimentation avec la moissonneuse batteuse à essai.

Le poids de 1000 grains est déterminé par comptage et pesage de 250 graines par parcelle élémentaire. L'indice de récolte et les nombres de grains par épi (NGE) et par unité de surface de sol (NGM²) sont déduits par calcul en utilisant les formules suivantes

$$\mathbf{NGM^2 = 1000(RDT/PMG)}$$

$$\mathbf{NGE = NGM^2/NE}$$

$$\mathbf{HI = 100(RDT/BIOm)}$$

Où

- $\mathbf{NGM^2}$ = nombre de grains produits par m²
- \mathbf{RDT} = rendement en grain (g/m²)
- \mathbf{PMG} = poids de 1000 grains (g)
- \mathbf{NE} = nombre d'épis comptées par m²
- \mathbf{NGE} = nombre moyen de grains par épi
- \mathbf{HI} = indice de récolte en %
- \mathbf{BIOm} = biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²)

La longueur et la plus grande largeur de la feuille étandard ont été mesurées sur un échantillon de 10 feuilles prises au hasard au stade épiaison. La surface de la feuille a été estimée par le produit:

$$SF = 0,5(L \times l) \text{ (Spagnoletti-Veugli et Qualfet, 1990).}$$

Où

- SF = surface moyenne de la feuille étandard (cm²)
- L= longueur moyenne de la feuille étandard (cm)
- l= largeur moyenne de la feuille étandard (cm)

Le poids spécifique foliaire a été calculé par le rapport du poids de la matière sèche sur la surface de la feuille étandard:

$$PSF = PF/SF$$

Où

- PSF = poids spécifique foliaire (mg/cm²)
- PF= Poids de la matière sèche foliaire (mg)
- SF= surface de la feuille étandard (cm²)

La matière sèche est déterminée après passage à l'étuve pendant 24 heures à 80°C de l'échantillon de 10 feuilles qui a servi à mesurer la longueur et la largeur. En parallèle à ces notations des tests physiologiques ont été réalisés. Il s'agit de la détermination de la teneur relative en eau de la feuille étandard au stade épiaison (TRE, %), et de la vitesse de déperdition de l'eau de la feuille étandard (VF) et de l'épi (VE).

La TRE de la feuille étandard a été déterminée sur un échantillon de cinq feuilles échantillonnées au stade épiaison. Les cinq feuilles par génotype sont directement pesées pour avoir le poids de la matière fraîche. Elles sont ensuite mises dans un tube à essai contenant de l'eau distillée, à l'abri de la lumière à température ambiante du laboratoire, pour atteindre l'état turgide.

Après 24 heures, les feuilles sont pesées, après essuyage de l'excès d'eau avec un papier buvard, pour avoir le poids à la turgescence. L'échantillon de feuilles est mis à sécher dans une étuve à 80°C pendant 16 heures, pour obtenir le poids de la matière sèche. La TRE est calculée par la formule:

$$TRE (\%) = 100[(PF-PS)/(PT-PS)]$$

Où

- TRE = teneur relative en eau foliaire (%)
- PF = poids de la matière fraîche foliaire (mg)
- PT = poids de la matière fraîche foliaire à turgescence (mg)
- PS = poids de la matière sèche foliaire

La vitesse de perte d'eau de la feuille étandard a été déterminée sur un échantillon de cinq feuilles prélevées au stade épiaison. Le poids frais, la longueur et la largeur sont

déterminées, puis les feuilles sont mises sur le paillason, dans un endroit bien illuminé, au bout de deux heures on pèse l'échantillon foliaire pour avoir le poids frais après deux heures. L'échantillon est ensuite mis à l'étuve à 80°C durant 24 heures, pour avoir le poids sec foliaire. La vitesse de perte de l'humidité de la feuille étandard est déduite selon les formules dues à Clarke et al. (1989):

$$VF1 = (PF_1 - PF_2) / [2(0,5L \times I)]$$

$$VF2 = (PF_1 - PF_2) / (PS).$$

Où

- VF1= vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la surface foliaire (mg H₂O/cm²)
- VF2=vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la matière sèche foliaire (mg H₂O/mg ms)
- PF1= poids frais foliaire juste après l'échantillonnage (mg)
- PF2= poids frais foliaire après 2 heures d'exposition à la lumière
- L = longueur totale des 5 feuilles échantillonnées
- I= largeur moyenne des 5 feuilles échantillonnées
- PS= poids sec des 5 feuilles échantillonnées

La vitesse de déperdition de l'eau de l'épi a été déterminée pour un épi par génotype prélevé au stade épiaison. Après avoir déterminé son poids frais (PF1), l'épi est exposé à la lumière pendant deux heures au bout desquelles on obtient PF2 ou le poids frais après deux heures. Le poids sec de l'épi est obtenu après étuvage de 24 heures à une température de 80°C. La vitesse de perte d'humidité de l'épi est calculée par la formule suivante:

$$VE = (PF_1 - PF_2) / PS$$

Où

- VE= vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la matière sèche de l'épi (mg H₂O/mg ms)
- PF1= poids frais de l'épi juste après l'échantillonnage (mg)
- PF2= poids frais de l'épi exposé 2 heures à la lumière
- PS= poids sec de l'épi échantillonné

II.2 - Deuxième année d'essai (1997/98)

II.2.1 - Mise en place de l'essai

L'expérimentation mise en place en 1996/97 est constituée de l'ensemble des variétés et lignées testées la première année. La parcelle élémentaire a été réduite à deux rangs de 5 m de long par génotype avec trois répétitions dans un dispositif en blocs randomisés. L'espace entre rangs adjacents est de 20 cm. Le précédent cultural est le pois chiche (*Cicer arietinum* L.). La préparation de la parcelle a été réalisée au cours de la période allant de septembre à octobre 1997.

Un labour avec une charrue à soc est suivi de deux passages de cover crop, de l'épandage de l'engrais phosphaté à raison de 100 kg par hectare et de la barre désherbeuse pour affiner le lit de semis. Le semis a été réalisé le 15 décembre 1997, à une densité de 250 graines/m². Le désherbage a été réalisé manuellement et l'engrais azoté a été apporté au cours du stade tallage à raison de 120 kg/ha de sulfate d'ammonium. La récolte a été faite le 30 juin 1998.

II.2.2 - Notations

Les mêmes notations que celle faites au cours de la campagne précédente ont été réalisées au cours de la seconde campagne d'étude, en plus du test de l'intégrité cellulaire. Au stade épiaison, le test de l'intégrité cellulaire est effectué sur la feuille étendard. Deux feuilles sont prises au hasard par génotype, elles sont découpées, chacune en 10 morceaux de 1 cm de long. Ces morceaux sont lavés avec de l'eau distillée par trois fois pour enlever les poussières qu'y sont adhérentes et qui peuvent influencer sur les résultats du test.

Deux tubes à essai sont utilisés par génotype. Chaque tube contient 10 morceaux de limbe foliaire avec 10 ml d'eau distillée déminéralisée. Un tube est utilisé comme témoin, alors que l'autre tube est traité par la chaleur. Le tube témoin est laissé à température ambiante du laboratoire. Le traité est mis pendant 30 minutes dans un bain marie porté préalablement à une température de 50°C. Puis il est mis à température ambiante avec le témoin pendant 30 minutes. Une première lecture est faite au conductimètre pour déterminer la conductivité électrique initiale du témoin (C1) et du traité (T1). Les deux tubes, témoin et traité, sont mis à nouveau durant 30 minutes dans le bain marie porté préalablement à 100 °C. Après refroidissement à température ambiante du laboratoire, une seconde lecture est faite avec le conductimètre afin de déterminer C2 et T2 respectivement pour le témoin et le traité. Le pourcentage de cellules endommagées par la chaleur est déterminé selon la formule due à Saadallah *et al.* (1990):

$$IC = 100\{1 - [1 - (T1/T2)]/[1 - (C1/C2)]\}$$

où

- IC= intégrité cellulaire, représente le % de cellules endommagées par la chaleur
- T1= conductivité du traité soumis à une température de 50°C
- T2 =conductivité du traité soumis à une température de 100°C
- C1 = conductivité du témoin soumis à la température ambiante du laboratoire (25°C)
- C2 = conductivité du témoin soumis à une température de 100°C

III - Analyse des données

Les données collectées ont été traitées par l'analyse de la variance à un seul facteur étudié (Steel et Torrie, 1980). Les liaisons entre les différentes paires de caractères ont été étudiées par le calcul des coefficients de corrélations phénotypiques. Le modèle adopté dans l'analyse de la variance est le modèle additif:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + e_{ij}$$

Y_{ij} = Valeur observée du génotype i sur le bloc j

μ = Moyenne générale de l'essai

G_i = Effet du génotype i .

B_j = Effet du bloc j

e_{ij} = Résiduelle du modèle

Le coefficient de corrélation (r) est calculé par le rapport de la covariance entre les deux caractères constituant la paire de variables à comparer, sur la racine carrée du produit des variances de ces caractères:

$$r = \text{cov}_{xy} / \sqrt{(\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2)}$$

La régression progressive a été utilisée pour identifier les variables qui participent le plus à l'explication de la variation du rendement en grain.

Suite à l'importance en nombre du matériel végétal étudié, et la multitude des caractères qui peuvent jouer en faveur de la productivité et de l'adaptation, on a procédé à la classification ascendante hiérarchique des génotypes évalués sur la base de la valeur des caractères retenus par la régression progressive du rendement en grain, en prenant comme stratégie la moyenne des distances euclidiennes pondérées.

La classification hiérarchique est une méthode d'analyse multicaractères qui a pour objectif de grouper un ensemble de variables en g groupes. Le groupage est réalisé selon la technique polythétique, qui consiste à former des groupes très voisins ou ressemblants pour l'ensemble des variables soumises à l'analyse. Cette analyse repose sur deux idées complémentaires qui sont la cohésion interne du groupe et l'isolement inter groupes auxquelles s'ajoute l'idée de la hiérarchie des groupes.

La cohésion et l'isolement sont mesurés par l'inertie intra et inter groupes. La stratégie est de minimiser l'inertie intra pour maximiser l'inertie inter. L'inertie est la moyenne des carrés des distances qui séparent les n variables à grouper (Tomasson *et al.* 1993). Les génotypes qui présentent une meilleure combinaison de caractères (architecture) qui contribuent à la productivité et à l'adaptation sont identifiés et marqués pour les besoins du suivi au cours de la seconde campagne d'étude. La seconde campagne, les données ont été traitées par l'analyse de la variance à un seul critère de classification et par le calcul des corrélations entre les différentes paires de caractères mesurés. Les résultats sont discutés en relation avec les interactions génotypes x années.

TROISIEME PARTIE - Résultats et discussion

I - Aperçu sur les conditions climatiques de l'expérience

La première année expérimentale (1996/97) a connu un début de campagne peu pluvieux par rapport à la moyenne constatée de la région (Tableau 3 et Figure 3). Le déficit pluviométrique s'est accentué au cours de la période de la croissance végétative notamment en février et mars où on n'a enregistré que 12.2 mm en 60 jours. Le déficit hydrique s'est ainsi maintenu dans la région jusqu'à la mi-avril, en début de l'épiaison, où on a reçu 37 mm de pluie, quantité comparable à la moyenne de la région. Elle reste cependant insuffisante pour dissiper les dégâts occasionnés jusqu'alors par la sécheresse.

	Mois									
Campagnes	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
	Pluviométrie (mm)									
1996/97	18.8	9.2	10.7	29.7	32.4	7.7	4.5	37.3	20.3	19.0
1997/98	84.5	45.1	69.4	43.7	9.6	39.8	13.1	52.0	101.2	19.4
1961/91	34.0	38.0	43.0	41.0	52.0	38.1	38.0	35.0	44.0	28.0
	Températures (°C)									
1996/97	20.5	15.3	10.7	8.0	7.5	9.3	10.9	13.7	19.5	26.9
1997/98	22.0	16.0	9.2	6.6	6.1	7.8	9.9	14.2	19.5	29.3
1961/91	20.4	14.4	9.2	5.6	4.5	5.6	8.4	11.4	15.5	20.7

Tableau 3. Pluviométrie et températures moyennes mensuelles des campagnes 1996/97 et 1997/98 et moyennes pluriannuelles de la période 1961/91 à la Station ITGC de Sétif

La période du remplissage du grain a été également très sèche. Le mois de mai n'a reçu, en effet, que 20.3 mm de pluie, soit la moitié de la quantité que reçoit habituellement la région durant ce mois. La campagne 1996/97 a enregistré un total pluviométrique de 189.6 mm. Le déficit est de 171 mm par rapport au cumul moyen de la période 1961/91. Cette première année d'étude a été relativement sèche.

La deuxième année d'étude, 1997/98, a été dans l'ensemble plutôt humide (Tableau 3). Le cumul des pluies a atteint 477,8 mm pour le cycle de la culture. L'excédent est de 117 mm par rapport au cumul moyen de la période 1961/91. Les premiers mois de 1997/98, de septembre à décembre, ont été très pluvieux. Janvier, avec un cumul de 9.6 mm, a été par contre très sec (Tableau 3). On n'a pas observé des effets négatifs sur la végétation probablement à cause des réserves appréciables en eau du sol emmagasinée les mois précédents et à la faible évapotranspiration durant cette période de l'année.

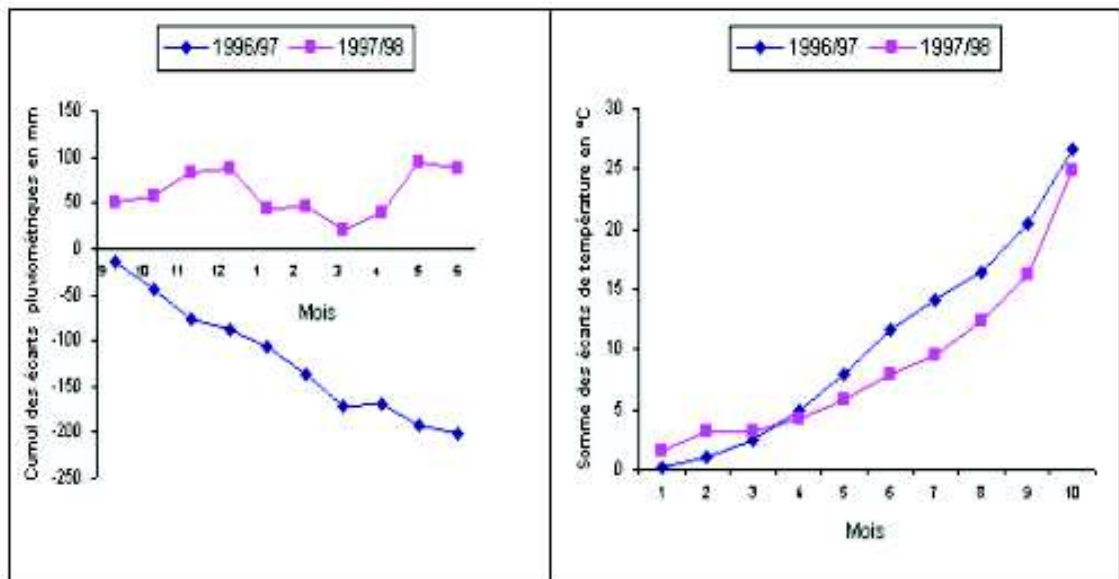


Figure-3- Cumuls des pluies et des degrés jours des deux campagnes d'étude en comparaison avec ceux de la période 1961/91 (ONM, 1998).

Le mois de mars a été aussi peu pluvieux avec 13.1 mm de pluie. On a constaté un léger effet sur la croissance des plantes, effet qui a été largement compensé par les fortes pluies des mois d'avril (52.0 mm), et mai (101.2 mm) (Tableau 3).

La comparaison des deux campagnes montre une grande fluctuation inter-annuelle du climat de la région. La deuxième campagne a, en effet, reçue 2.5 fois plus de précipitations que la première campagne soit une différence 288.2 mm de pluie. Le cumul des degrés jours perçus montre que les deux années d'expérimentation ont été plus chaudes que la moyenne de la région et ce pour pratiquement tout le long du cycle (Tableau 3 et Figure 3).

II - Analyse des résultats de la première année d'expérimentation (1996/97)

II.1 - Variabilité phéno-morphologique

L'analyse de la variance montre un effet génotype très hautement significatif pour l'ensemble des caractères mesurés (Tableau 4). Il y a donc une importante variabilité d'origine génétique au sein du matériel végétal étudié. Cette variabilité s'explique par la grande diversité du matériel génétique utilisé (Tableaux 1 et 2). Elle justifie son exploitation à des fins de sélection pour améliorer le rendement en grain et l'adaptation au milieu.

Ddl	Source		Source	
	Génotype	résiduelle	Génotype	résiduelle
	118	236	118	236
PVG	114.6***	0.98	HT	149.6***
LE	1.5***	0.11	LC	60.6***
LB	12.8***	0.56	PE	8743.1***
Pll	10608.3***	953.9	BIOM	30743.5***
HI	175.46***	2.22	NE	129043.3***
NGE	70.0***	5.6	NGM ²	316397.7***
PMG	79.2***	5.8	RDT	4127.4***
				527.2

dél = degrés de liberté; *** = effet très hautement significatif, PVG = nombre de jours à l'épaison (jours), HT= hauteur des plantes (cm), LE = longueur de l'épi (cm), LC = longueur du col de l'épi (cm), LB = longueur des barbes (cm), PE = poids des épis à maturité (g/m²), Pll = poids de la paille à maturité (g/m²), Biom= biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²), HI = indice de récolte, NE = nombre d'épis/m², NGE = nombre de grains/épi, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains (g), RDT = rendement en grain (g/m²).

Tableau 4. Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères mesurés en 1996/97

Les valeurs moyennes prises par la hauteur de la tige, le nombre de grains/épi, le nombre de grains/m², la biomasse aérienne à maturité et le rendement en grain sont très faibles par rapport aux moyennes rapportées pour le même site expérimental et la même espèce par Abbassenne *et al.* (1997a) (Tableau 5). Ces résultats s'expliquent par la sécheresse qui a marqué la région durant la campagne 1996/97. Les moyennes prises, par contre, par le nombre d'épis/m² et le poids de 1000 grains sont tout à fait comparables à celles obtenues par Abbassenne *et al.* (1997a).

L'amplitude qui est prise comme la différence entre les moyennes maximale et minimale pour un caractère donné est de 24 jours pour la phase végétative, 60 cm pour la hauteur du chaume. Elle est de 375.9 g/m² pour le poids des épis/m², 620 g/m² pour la biomasse aérienne mesurée à maturité, de 24.7 g pour le poids de 1000 grains et de 313.6 g/m² pour le rendement en grain.

Ces valeurs assez importantes confirment la variabilité détectée par l'analyse de la variance et suggèrent que la sélection sur ce matériel végétal devrait être efficace. Ceci est moins évident du fait que ce sont les valeurs minimales qui sont trop faibles. La sélection serait plus intéressante et plus efficace si les valeurs maximales étaient à l'origine de cette amplitude (Tableau 5).

Identification et sélection des caractères de résistance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions semi-arides des hauts plateaux de Sétif

Variables	Max	Moy	Min	Amplitude	et	Cv (%)
PVG	134	122	110	24	0.9	8.0
HT	90.5	53.2	30.5	60.0	2.6	5.0
LE	7.1	4.8	3.6	3.5	0.3	6.8
LC	18.8	9.0	2.8	16.0	2.1	22.9
LB	16.9	9.6	4.5	12.4	0.7	7.8
PE	391.8	161.3	15.9	375.9	33.9	21.0
Pll	364.8	147.9	14.6	350.2	30.9	20.9
BIOm	650.5	310.0	30.5	620.0	59.9	19.4
HI	48	33.56	11	37	3.23	9.9
NE	371.3	206.9	84.3	287.0	40.9	19.8
NGE	27.9	14.6	5.6	22.3	2.4	16.2
NGM ²	9058.3	2875.9	473.4	8584.9	602.1	20.9
PMG	46.1	33.9	21.4	24.7	2.4	7.1
RDT	323.6	98.1	10.0	313.6	22.9	23.4

PVG = nombre de jours à l'épiaison (jours), HT = hauteur des plantes (cm), LE = longueur de l'épi (cm), LC = longueur du col de l'épi (cm), LB = longueur des barbes (cm), PE = poids des épis à maturité (g/m²), Pll = poids de la paille à maturité (g/m²), Biom = biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²), HI = indice de récolte (%), NE = nombre d'épis/m², NGE = nombre de grains/épi, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains (g), RDT = rendement en grain (g/m²).

Tableau 5. Valeurs moyennes maximales, minimales, moyennes, amplitude, écart type de l'échantillon et coefficient de variation des caractères mesurés au cours de la campagne 1996/97

Parmi les variables mesurées, celles qui prennent une importance particulière dans le milieu de production ciblé sont la durée de la phase végétative, la hauteur du chaume, la biomasse produite à maturité et le rendement en grain.

La durée de la phase végétative mesure le rythme de développement de la variété et détermine les risques qu'elle encoure vis à vis des stress précoces comme les basses températures et les stress tardifs comme le déficit hydrique et les hautes températures de fin de cycle.

La hauteur du chaume mesure la capacité de la variété à produire une quantité de matière sèche acceptable sous stress sévère. La durée de la phase végétative et la hauteur du chaume sont des caractères liés à l'adaptation. La biomasse aérienne à maturité et le rendement en grain sont des indicateurs de la capacité de production du génotype. Les cultivars MBB et Waha servent, à cet effet, de témoins à la sélection pour la zone ciblée. La précocité doit être intermédiaire entre celles de ces deux témoins. La hauteur du chaume doit être proche de celle de MBB, ainsi que la biomasse aérienne produite. Le rendement en grain doit être le plus élevé possible. Il doit être supérieur à celui de Waha. La distribution fréquentielle de ces quatre variables est donnée en figure 4.

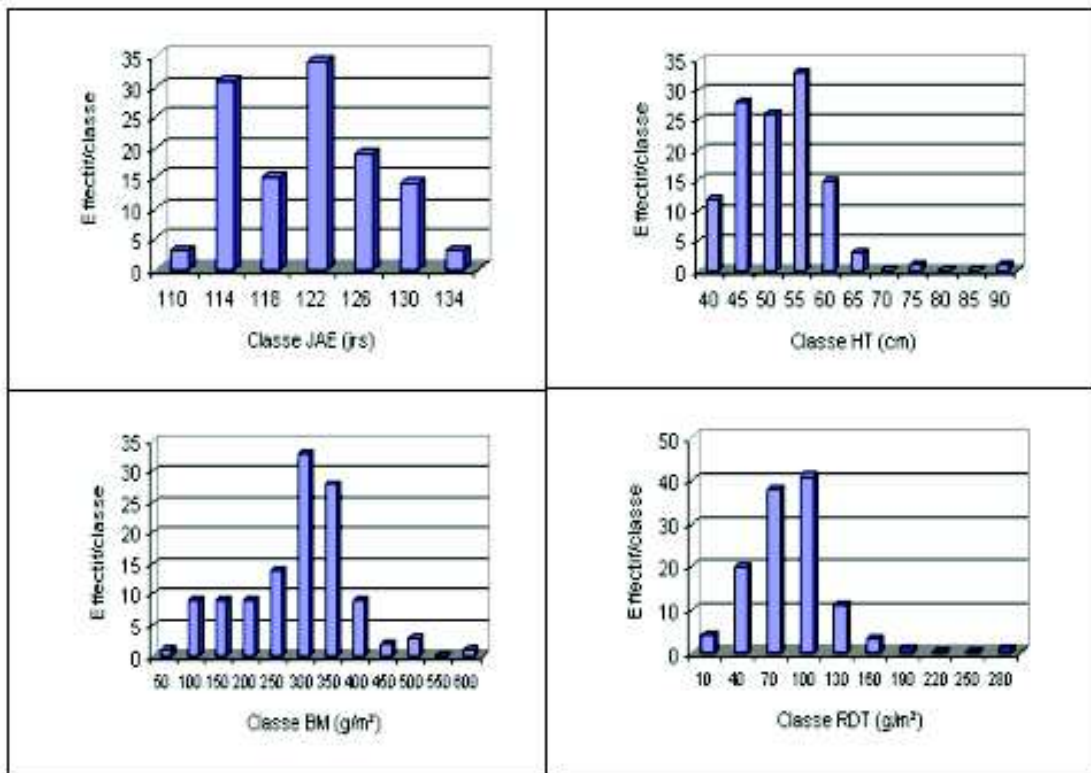


Figure 4. Distributions fréquentielles de la durée de la phase végétative, de la hauteur du chaume, de la biomasse produite à maturité et du rendement en grain des 119 lignées évaluées.

L'essentiel du matériel végétal évalué a une durée de la phase végétative centrée entre 114 et 126 jours avec des lignées très précoces qui ont une durée de 110 jours (Figure 4). La biomasse est centrée autour des valeurs de 300 à 400 g/m² pour la majorité des sélections alors que la hauteur du chaume est comprise entre 40 et 60 cm avec des lignées qui font 90 cm sous des conditions climatiques très difficiles. Le gros des génotypes a un rendement en grain compris entre 70 et 130 g/m² (Figure 4.).

II.2 - Liaisons entre les variables mesurées

L'étude des liaisons entre les différentes paires de variables permet de distinguer les caractères antagonistes ou en synergie de ceux qui sont indépendants. L'information est utilisable en sélection. Elle permet d'éviter de sélectionner un caractère au détriment d'autres caractères pouvant être aussi importants. Suite au nombre important de variables mesurées dans la présente étude, et pour mieux gérer les résultats, il y a intérêt à limiter l'étude des liaisons entre les variables mesurées. On s'intéresse particulièrement aux liaisons de l'ensemble des variables avec la durée de la phase végétative, la hauteur du chaume, la biomasse aérienne et le rendement en grain, pour les raisons énoncées plus haut.

II.2.1 - La phénologie

La durée de la phase végétative est significativement et négativement liée avec les valeurs relatives aux dimensions de la feuille étendard mesurées au stade épiaison. Le signe de

la corrélation indique que la précocité est accompagnée par un feuillage aux dimensions relativement plus grandes, particulièrement celles de la feuille étendard (Tableau 6).

L'utilisation de l'eau est directement liée à l'indice foliaire qui s'établit au cours du cycle de la culture. Pour un type de sol donné, il faut chercher un développement de la surface foliaire qui régule mieux la consommation hydrique de la plante pour en conserver une partie pour le remplissage des grains (Richards, 1987). Cependant, la réduction de la dimension des feuilles est compensée par une augmentation de leur nombre, avec un effet net nul sur la variation de l'indice foliaire comme le souligne Richards (1987). En effet, Blum *et al.* (1983) ne trouvent aucune relation entre la surface foliaire et le degré de résistance à la sécheresse.

Blum (1996) précise que c'est la plasticité de l'indice foliaire qui intervient dans le contrôle de l'utilisation de l'eau du sol. Les variétés qui possèdent cette capacité, modulent leur indice foliaire progressivement avec l'installation de la sécheresse afin de réguler la transpiration en fonction de l'approvisionnement en eau du sol (Passioura, 1996). Le statut hydrique foliaire des 20 jours avant et après l'épiaison est un indicateur de cette capacité génotypique.

La durée de la phase végétative montre des liaisons significatives et négatives avec le statut hydrique de la feuille étendard au stade épiaison. Un statut hydrique foliaire réconfortant est dû beaucoup plus à l'esquive du stress associée à la réduction de la durée de la phase végétative qu'à la tolérance intrinsèque proprement dite.

	PVG	HT	BIOm	RDT	r	
L	-0.503***	0.442***		-0.179*	0.093ns	
L	-0.562***	0.428***		-0.128ns	0.174ns	5%≠0.179*
SF	-0.455***	0.450***		-0.135ns	0.162ns	
PSF	-0.531***	0.356***		-0.210*	0.030ns	1%≠0.234**
TRE	-0.256**	0.201*		0.245**	0.135ns	
VF1	-0.264**	0.044ns		0.281**	0.059ns	1%≠0.296***
VF2	-0.244**	0.102ns		0.245**	0.078ns	
VE	-0.213*	-0.013ns		0.228*	0.001ns	ns= non significatif
LE	-0.053ns	0.382***		0.203*	0.425***	
LC	-0.764***	0.373***		-0.117ns	0.190*	
LB	0.628***	0.163ns		0.158ns	0.088ns	
HT	-0.316***	1.000	-0.045ns		0.187*	
PE	-0.046ns	0.074ns		0.880***	0.913***	
BIOe	-0.585***	0.087ns		0.091ns	-0.034ns	
BIOm	0.142ns	-0.045ns		1.000	0.672***	
PII	0.283**	-0.143ns		0.902***	0.315***	
HI	-0.386***	0.276**		-0.358***	0.425***	
NE	0.324***	-0.539***	0.518***		0.245**	
NGE	-0.214*	0.427***		0.288**	0.672***	
NGM ²	-0.015ns	-0.018ns		0.711***	0.926***	
PMG	-0.458***	0.462***		0.103ns	0.406***	
RDT	-0.200*	0.187*		0.672***	1.000	

PVG = nombre de jours à l'épiaison (jours), L = longueur de la feuille étendard (cm), l = largeur de la feuille étendard (cm), SF = surface de la feuille étendard (cm²), PSF = poids spécifique foliaire (mg/cm²), TRE = teneur relative en eau foliaire (%), VF1 = vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la surface foliaire (mg H₂O/cm²), VF2 = vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la matière sèche foliaire (mg H₂O/mg ms), VE = vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la matière sèche de l'épi (mg H₂O/mg ms), LE = longueur de l'épi (cm), LC = longueur du col de l'épi (cm), LB = longueur des barbes (cm), HT = hauteur des plantes (cm), PE = poids des épis à maturité (g/m²), BIOe = biomasse aérienne à l'épiaison (g/m²), BIOm = biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²), PII = poids de la paille à maturité (g/m²), HI = indice de récolte, NE = nombre d'épis/m², NGE = nombre de grains/épi, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains (g), RDT = rendement en grain (g/m²).

Tableau 6. Coefficients de corrélations phénotypiques entre les variables mesurées en 1996/97

La durée de la phase végétative ne montre pas de liaison significative avec la longueur de l'épi. Par contre, les longueurs des barbes, du chaume et du pédoncule lui sont significativement liées (Tableau 6).

Les géotypes plus tardifs se caractérisent par une hauteur et un pédoncule moins longs et de longues barbes. Ceci s'explique par l'effet du stress hydrique intense qui a caractérisé la fin de la campagne étudiée. Ce stress a affecté plus les géotypes tardifs qui accusèrent des réductions plus importantes de la hauteur du chaume et du pédoncule relativement à des géotypes plus précoces. La longueur des barbes a été cependant moins sensible à ce stress.

La liaison de la durée de la phase végétative avec la biomasse aérienne mesurée au stade épiaison est négativement significative. La durée de cette phase n'est pas liée à la biomasse aérienne et le poids des épis mesurés à maturité. Cependant la paille produite est relativement plus importante chez les géotypes tardifs. La corrélation entre la durée de la phase végétative et le poids de la paille est, en effet, positive et significative (Tableau 6).

La durée de la phase végétative présente des liaisons significatives et positives avec le nombre d'épis produit au m^2 , et significatives et négatives avec la fertilité, l'indice de récolte et le poids de 1000 grains (Tableau 6). Les géotypes précoces ont tendance à avoir un indice de récolte, une fertilité et un poids de 1000 grains plus élevés. La formation de ces caractères se produit en condition de déficit hydrique plus sévère chez les géotypes tardifs. Ces derniers ont un nombre d'épis au m^2 plus élevé. Le nombre de grains au m^2 n'est pas significativement lié avec la durée de la phase végétative.

II.2.2 - La hauteur du chaume

La hauteur du chaume est liée positivement et significativement aux dimensions de la feuille étandard et au poids spécifique foliaire (Tableau 6). La hauteur du chaume est positivement liée à la teneur relative en eau de la feuille étandard mesurée au stade épiaison. Elle ne montre pas de liaisons significatives avec les vitesses de perte d'humidité de la feuille ou de l'épi (Tableau 6).

La hauteur du chaume est positivement corrélée avec la longueur du pédoncule et celle de l'épi, mais elle n'est pas liée à celle des barbes (Tableau 6). Elle n'est pas liée significativement à la biomasse aérienne accumulée aux stades épiaison et maturité, ni au poids des épis ou de la paille/ m^2 . Elle est cependant significativement et positivement corrélée avec l'indice de récolte, la fertilité et le poids de 1000 grains et négativement liée au nombre d'épi/ m^2 (Tableau 6).

La hauteur du chaume est positivement corrélée au rendement grain. Selon Dakheelet *al.* (1993) la hauteur du chaume présente une corrélation modérée avec le rendement en grain sous stress sévère. Cette liaison s'affaiblit à mesure que le stress s'amointrit, pour changer de signe lorsque la plante est conduite sous irrigation. Une paille relativement haute devient une caractéristique désirable sous stress hydrique.

Nachit et Jarrah (1986) affirment que la stabilité de l'expression de la hauteur est importante en condition de sécheresse. En conditions de stress hydrique, une paille haute est plus apte à stocker plus de réserves glucidiques, qui sont susceptibles d'être transférées vers le grain, au cours de la phase de remplissage (Ben Abdellah et Ben Salem, 1993). Turner (1997) signale que les géotypes transférant plus de réserves vers le grain sont

capables de minimiser la variation des dimensions du grain et donc celle du rendement en grain.

Mais, c'est surtout la partie supérieure du chaume, formée par le pédoncule, qui est en général le siège d'intense transfert d'hydrates de carbone pour la finition du grain lorsque le remplissage se réalise sous stress (Dakheel *et al.* 1993).

II.2.3 - La biomasse aérienne

La biomasse aérienne mesurée à maturité est négativement liée à la longueur de la feuille étandard et au poids spécifique foliaire. Elle ne montre pas de liaisons avec la largeur et la surface de la feuille étandard (Tableau 6). La biomasse aérienne présente des liaisons significatives et positives avec les statuts hydriques de la feuille et de l'épi. Une biomasse élevée est indicatrice d'un meilleur statut hydrique de la feuille étandard et des vitesses de perte d'eau foliaire et de l'épi importantes (Tableau 6). La longueur de l'épi, le poids des épis/m² et de la paille sont liés positivement et significativement avec la biomasse aérienne (Figure 5).

La biomasse aérienne mesurée à maturité ne présente pas de liaison significative avec celle accumulée au stade épiaison. Elle est positivement corrélée avec le nombre d'épis/m², la fertilité, le nombre de grains/m², le rendement en grain et négativement liée avec l'indice de récolte. Selon Clarke *et al.* (1991), une biomasse élevée est une caractéristique désirable en milieux semi-arides. Siddique *et al.* (1989) soulignent que la biomasse élevée est la cause principale des rendements élevés enregistrés chez les variétés récentes.

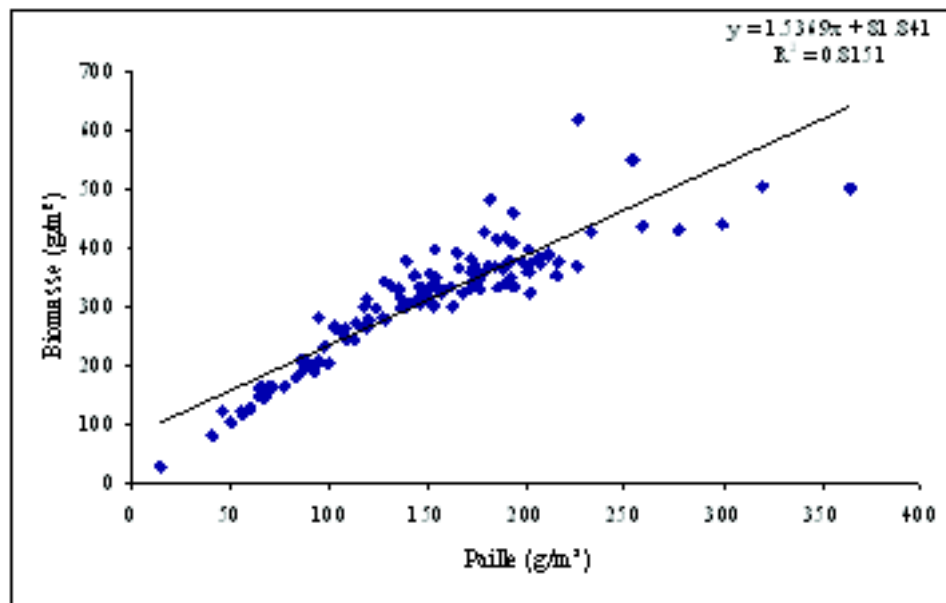


Figure 5. Relation entre la biomasse aérienne et la paille produites à maturité pour les 119 lignées évaluées

II.2.4 - Le rendement en grain

Le rendement en grain ne présente pas de liaisons significatives avec la surface de la feuille étandard, le poids spécifique foliaire, et la teneur relative en eau de la feuille étandard mesurée au stade épiaison. Il est positivement corrélé avec la longueur de l'épi, celle du

pédoncule, du chaume et avec le poids des épis/m², la biomasse aérienne mesurée à maturité, la paille, l'indice de récolte et avec les composantes du rendement (Figure 6, Tableau 6).

Dakheel *et al.*(1993) notent que l'indice de récolte est positivement corrélé avec le rendement en grain sous tous types d'environnements. Richards (1987) remarque que l'indice de récolte sous conditions de croissance non limitantes, est de 50%, il chute à des valeurs de 35% dans les régions arides. Ce qui fait douter des possibilités d'augmentation du rendement en grain par l'amélioration de l'indice de récolte, en conditions de stress hydrique. Ce rôle semble conditionné par la réalisation d'une biomasse aérienne élevée, dont il faut ensuite extraire le maximum sous forme de grains.

Wardlaw *et al.*(1989) notent que la baisse du rendement en grain due au stress thermique terminal, est corrélée positivement à la réduction du poids de 1000 grains et à la variation du nombre de grains au m².

Le rendement est négativement corrélé avec la durée de la phase végétative. La productivité est liée à la stratégie de l'esquive des stress de fin de cycle dans la présente étude. En effet selon Levitt (1972), l'esquive est la situation où la plante grâce à un rythme de développement spécifique, réussit à s'harmoniser à l'environnement de production, en échappant partiellement ou complètement au stress, pour produire à un niveau acceptable.

Les variétés nouvelles sont le plus souvent sélectionnées sur la base de leur niveau de rendement sans tenir compte des caractères adaptatifs qui sont des régulateurs de la production en milieux variables. Les sélectionneurs se tournent vers d'autres caractères moins fluctuants qui peuvent être utilisés en parallèle avec le rendement en grain dans une approche intégrative (Belhassen *et al.*1995).

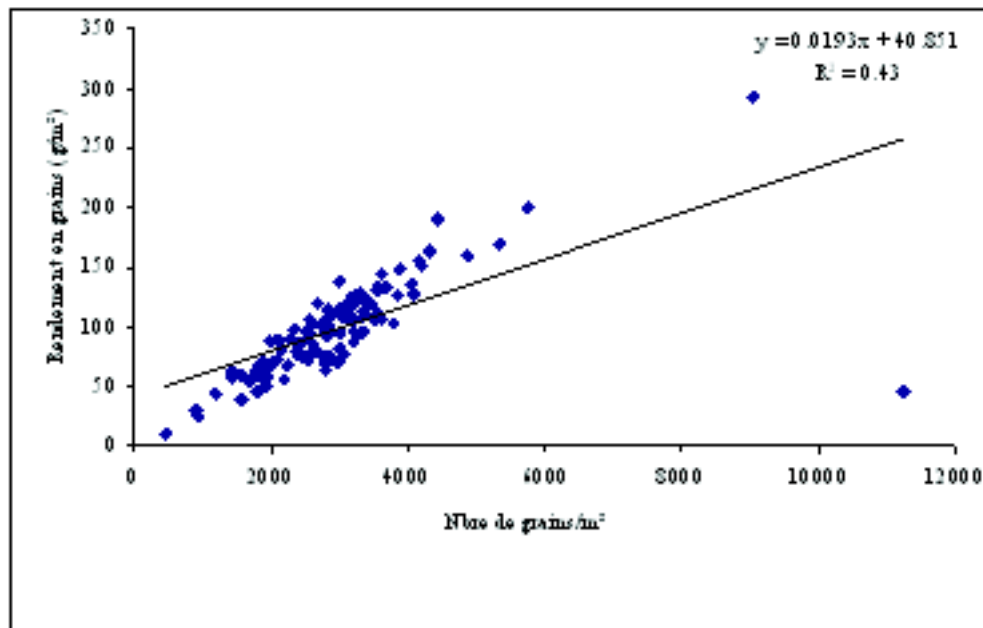


Figure 6. Relation entre le rendement en grain et le nombre de grains produit/m²

Abbassenne *et al.* (1997b) trouvent, sous conditions semi-arides, que les géotypes précoces se caractérisent par des vitesses de remplissage par m² assez fortes. Cependant, Une grande précocité n'est pas toujours utile en sélection dans les régions caractérisées par la présence du gel tardif (Ceccarelli *et al.* 1992). Mekhlouf *et al.* (2006) mentionnent

que la recherche de la tolérance aux basses températures printanières est nécessaire pour exploiter l'avantage en productivité des génotypes précoces qui adoptent l'esquive des stress de fin de cycle. Ortiz *et al.* (1991), Baldy (1993) ainsi que Abbassenne *et al.* (1997a) suggèrent, par contre, de sélectionner, pour les zones froides et sèches à climat de type méditerranéen, des variétés à floraison relativement tardive et à maturation hâtive.

II.3 - Variables explicatives du rendement en grain

La première variable retenue par la régression progressive est le nombre de grains/m². Cette variable explique à elle seule 85.6 % de la variation notée pour le rendement en grain. Avec le poids de 1000 grains le rendement est déterminé à 98.7 %. L'ajout des autres variables comme la hauteur, l'indice récolte ou le poids des épis améliore peu la prévision du rendement et charge le modèle qui ne retient pas la durée de la phase végétative (Tableau 7).

Ordre	Variable expliquée	Variabes explicatives	R ²
1	RDT	0,0338 NGM ² + 0,5348	0,8566
2	RDT	0,03 NGM ² + 2,63PMG - 86,98	0,9868
3	RDT	0,03 NGM ² + 2,47 PMG + 0,23HT - 94,20	0,9885
4	RDT	0,03 NGM ² + 2,40 PMG + 0,20 HT + 15,54 HI - 94,71	0,9893
5	RDT	0,02 NGM ² + 1,78 PMG + 0,19HT + 54,06HI + 0,15PE - 87,8	0,9919

RDT = rendement en grain, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains, HT = hauteur des plantes, HI = indice de récolte, PE = poids des épis à maturité.

Tableau 7. Variables explicatives du rendement en grain des 119 génotypes étudiés au cours de la campagne 1996/97

Le modèle de la régression progressive est un moyen judicieux pour faire une sélection multi-caractères. La sélection mono-caractère a, en effet, montré ses limites suite aux interactions génotype x milieu qui induisent l'irrégularité du rendement. Les sélections faites sur la base du rendement en grain ont montré une très faible stabilité de production en donnant des rendements élevés les bonnes années et de faibles rendements en années défavorables (Bouzerzour *et al.* 1995).

Hadji-Christodoulou (1987) mentionne que le choix d'une durée prédéterminée de la phase végétative réduit des interactions génotype x milieu et favorise la stabilité.

Selon Richards (1996), le frein à la réalisation d'un gain de rendement significatif, dans les environnements à humidité limitée, résulte de la variation de la multitude de caractères qui semblent conditionner le rendement sous de telles conditions de production. L'identification des caractères, les plus marquants, est très difficile et demande du temps. Les caractères retenus pour former l'index de sélection, ne peuvent, en toute rigueur, être utilisés en sélection qu'après que leur rôle effectif dans la stabilité a été vérifié pour donner prise à la sélection préconisée sur la base de tels index (Belhassen *et al.* 1995).

L'utilisation en sélection du modèle donné par la régression progressive, basé essentiellement sur les composantes du rendement, donnerait les mêmes résultats que la sélection mono-caractère directe basée sur le rendement en grain. Ceci parce que les caractères retenus sont ceux qui lui sont fortement liés, notamment le nombre de grain/m² qui intervient en premier lieu dans la différenciation des lignées sous sélection. Pour éviter un tel processus le groupage des 119 génotypes a été fait sur la base des caractères liés à la productivité et à l'adaptation, en utilisant la technique de la classification hiérarchique.

II.4 - Groupage des géotypes selon la similitude de réponse.

La technique de la classification hiérarchique classe les 119 géotypes en 6 groupes divergents (Tableau 8). Le rapport de l'inertie inter sur l'inertie totale de 0,89 indique un fort degré de ressemblance intra et de dissemblance intergroupes. Les caractéristiques des groupes formés laissent apparaître que les différences entre groupes pour la durée de la phase végétative sont faibles pour avoir un effet perceptible en sélection.

Certes le milieu ciblé est très variable et les différences du point de vue âge physiologique, même d'une journée, sont importantes dans l'évitement du gel ou du sirocco. Elles restent cependant assez faibles pour avoir des effets permanents en sélection, en dehors de ces risques de forte intensité et de nature imprévisibles.

L'alternative dans de telles situations, où la marge du point de vue durée de la phase végétative est assez faible, est de déterminer la durée optimale et les facteurs (cumul des degrés-jours, photopériode et vernalisation) qui induisent la variation de cette durée pour les prendre en compte plus tôt dans le processus de sélection avant de passer à la sélection pour le rendement en grain, comme le mentionnent Worland *et al.* (1994).

La variabilité pour la hauteur, la biomasse aérienne produite au stade épiaison et la paille est assez large. Cette variabilité reste le plus souvent indépendante du rendement en grain. En moyenne ces caractères sont de faibles indicateurs de la capacité de rendement à l'intérieur des 119 géotypes étudiés. Pour la hauteur, l'alternative est similaire à celle mentionnée pour la durée de la phase végétative. Il faut déterminer la classe de hauteur de chaume qui fait courir le moins de risque (sinistre) dans le milieu ciblé. Le matériel soumis à la sélection pour le rendement en grain doit contenir uniquement la classe désirable de hauteur de chaume.

La biomasse aérienne accumulée au stade épiaison et la paille produite à maturité sont dépendantes d'autres variables (nombre d'épis, hauteur du chaume) et de ce fait leur variation ainsi que leur effet sur le rendement sont des spécificités géotypiques. Le nombre de grains/épi, d'épis/m², de grains/m², le poids des épis, la biomasse aérienne à maturité et l'indice de récolte évoluent, par contre, proportionnellement à l'augmentation du rendement en grain.

No groupe	1	2	3	4	5	6	Y..
Nbre	50	28	26	8	3	4	119
RDT	107.2	93.4	65.2	147.0	176.6	27.4	98.1
PVG	124.1	120.7	122.2	121.3	120.0	119.8	122.4
HT	53.6	53.5	53.6	53.0	54.3	60.7	53.8
BIOe	255.5	502.6	284.5	569.5	692.0	608.6	373.9
PE	182.0	151.5	111.5	224.2	255.9	44.2	161.3
Pll	172.2	143.3	115.7	162.1	165.9	41.7	148.2
BIOm	354.2	294.7	227.2	385.2	421.8	85.9	309.5
HI	30	32	29	38	42	32	32
NE	222.9	197.3	174.6	239.2	281.6	109.5	205.9
NGE	15.6	14.2	12.0	18.8	18.8	8.3	14.7
NGM ²	3230.1	2686.2	1894.2	4131.1	5284.9	877.6	2882.8
PMG	33.1	35.3	34.4	35.4	33.4	29.7	33.9

PVG = nombre de jours à l'épiaison (jours), HT = hauteur des plantes (cm), BIOe = biomasse aérienne mesurée à l'épiaison (g/m²), PE = poids des épis à maturité (g/m²), Pll = poids de la paille à maturité (g/m²), BIOm = biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²), HI = indice de récolte, NE = nombre d'épis/m², NGE = nombre de grains/épi, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains (g), RDT = rendement en grain (g/m²), Y.. = moyenne générale du caractère

Tableau 8. Caractéristiques des groupes de géotypes constitués par la technique de la classification hiérarchique

Relativement à la moyenne générale des 119 génotypes, pour les variables qui conditionnent le rendement et sa stabilité, hormis la durée de la phase végétative, les groupes 4 et 5 semblent les plus intéressants (Figure 7).

Ces groupes ont des valeurs supérieures à la moyenne des 119 génotypes évalués pour le rendement en grain, la biomasse produite à l'épiaison, à maturité, la paille, le poids et le nombre des épis/m², le nombre de grains par épi et celui des grains/m². Ces groupes sont constitués cependant par un faible nombre de génotypes (tableau 8) qui arborent une architecture favorable. Les autres groupes constitués par un nombre important de génotypes comme les groupes 1, 2 et 3, qui forment l'essentiel du germoplasme se caractérisent par une architecture peu désirable pour le milieu de sélection (Figure 7).

Le pedigree des génotypes possédant une architecture désirable sur la base des résultats de la première année d'évaluation sont donnés au tableau 9.

No-	Pedigree	RDT	BIOM	HT	PVG
			Témoins		
5-	MBB	92.6	342.8	56.1	125.0
17-	Waha	106.2	321.6	59.1	115.0
			Groupe 4		
35-	Chen/Auk	128.7	286.0	52.4	115.0
44-	Gabgel79	103.3	382.5	47.0	131.0
62-	Mbvd4	125.6	418.5	47.8	129.0
66-	Mbvd9	136.8	427.6	52.6	124.0
80-	Cham1/Mrb//Oumguer2	170.2	378.2	47.5	117.0
82-	Richi/Cham1-1S	155.5	398.8	44.3	117.0
88-	Gignan/Algerian//Cham1.3/Wadlmz2-1S	148.4	353.2	53.4	123.0
89-	Gignan/Algerian/Cham1.3/Wadlmz2.2S	163.0	428.9	64.6	128.0
			Groupe 5		
81-	Heba3/Brachoua2	189.4	462.1	53.1	115.0
83-	Sicilian/Algerian//Genil.3 1S	200.0	487.8	52.9	118.0
90-	Mexican.311/Iraq//Mrb5//Sabil2	151.0	351.4	55.7	117.0

Tableau 9. Pedigrees et caractéristiques des génotypes des groupes 4 et 5 et des témoins

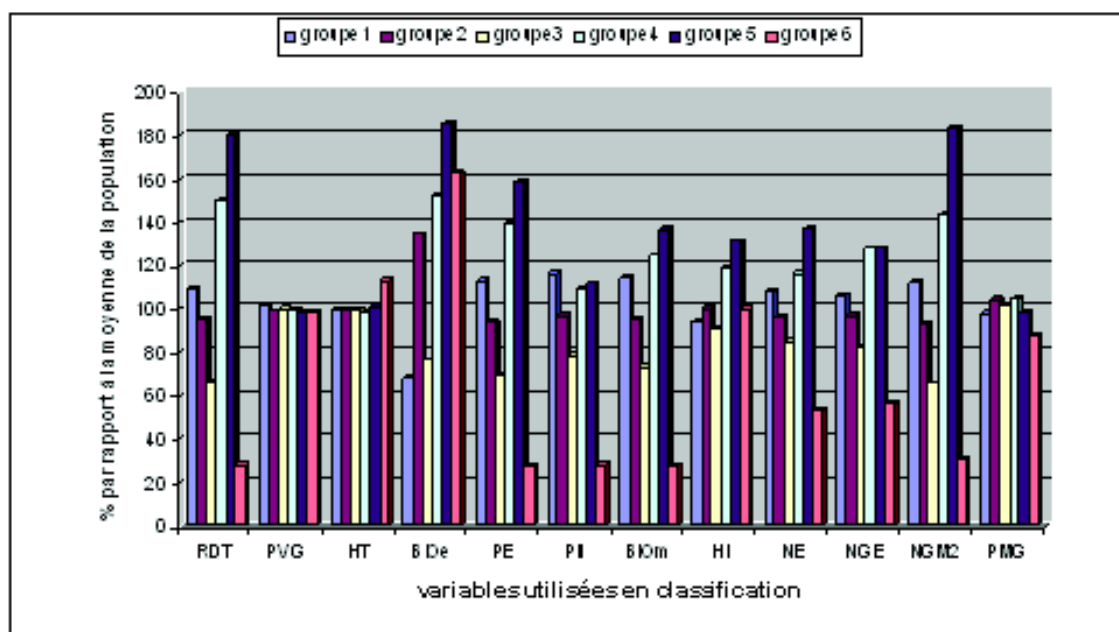


Figure 7. Caractéristiques des différents groupes relativement à la moyenne générale des variables utilisées en classification

III - Résultats de la deuxième année d'expérimentation (1997/98)

III.1 - Variabilité phénotypique et liaisons inter-caractères

L'analyse de la variance des caractères mesurés montre un effet génotype significatif pour l'ensemble des variables soumises à l'analyse (Tableau 10). La variabilité phénotypique existe pour les différents caractères et justifie la sélection.

Source	ddl	PVG	HT	LE	LC	LB	PE	PII
Total	356	22,68	160,85	0,6	25,14	2,04	31184,09	70741,19
Génotype	118	59,4***	439,3***	1,2***	65,6***	4,8***	39414,9***	82812,5***
Blocs	2	18,8	153,6	0,7	18,6	0,47	500524,5	2015472,0
Résiduelle	236	4,3	21,6	0,26	4,9	0,65	23091,2	48224,7
Source	BOM	HI	NE	NGE	NGM ²	PMG	RDT	
Total	129027,7	55,8	18778,1	34,0	10991391	71,4	19225,6	
Génotype	134429,4***	104,31***	21498,3***	62,5***	17362578***	115,1***	28366,7***	
Blocs	4395276	211	611694,2	78,7	103263616	4,3	179828,2	
Résiduelle	90172,2	30,23	12393,2	19,3	7023829,5	50,1	13294,0	

PVG = nombre de jours à l'épiaison (jours), HT= hauteur des plantes (cm), LE = longueur de l'épi (cm), LC = longueur du col de l'épi (cm), LB=longueur des barbes (cm), PE = poids des épis à maturité (g/m²), PII = poids de la paille à maturité (g/m²), BOM = biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²), HI = indice de récolte, NE = nombre d'épis/m², NGE = nombre de grains/épi, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains (g), RDT = rendement en grain (g/m²).

Tableau 10. Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères mesurés au cours de la seconde campagne

Cette variabilité phénotypique disponible est mise en évidence par les valeurs prises les moyennes caractéristiques des 119 lignées évaluées (Tableau 11).

Comparativement aux moyennes obtenues au cours de la précédente campagne (Tableau 5), les valeurs prises, la présente année, par les caractères liés à la productivité sont très élevées (Tableau 11). Si la durée de la phase végétative a peu changée, la hauteur du chaume a augmentée en moyenne de plus de 20 cm, le poids des épis, la biomasse aérienne, le rendement en grain ont été multipliés par un facteur de trois et plus (Tableaux 5 et 11).

L'indice de récolte a diminué de 3%, le nombre d'épis/m² a doublé, la fertilité s'est améliorée de 5 grains/épi et le poids du grain moyen est passé de 33.9 à 46.0 mg (Tableaux 6 et 11). L'amplitude a aussi augmenté suite à l'amélioration des moyennes maximales des caractères mesurés qui restent largement supérieures aux moyennes observées couramment dans la région (Bouzerzour *et al.* 1994). C'est le cas du poids de mille grains qui atteint une valeur maximale de 61.9 g, du nombre d'épis/m² avec 798.0 épis/ m² et du rendement qui a atteint un maximum de 647.5 g/m².

Variables	Max	Moy	Min	Amplitude	et	Cv(%)
PVG	130	121	115	15	2	1.7
HT	99.8	77.1	49.4	50.4	4.6	6
LE	7.7	5.9	4.3	3.4	0.5	8.7
LC	30.5	17.5	9.2	21.3	2.2	12.7
LB	10.9	6.7	4.5	6.4	0.8	12.1
PE	964.6	612.9	393.1	571.5	151.9	24.8
Pll	1287.4	816.1	441.5	845.9	219.6	26.9
BIOm	2056.9	1429	980.3	1076.6	300.3	21
HI	46	30.45	15	31	5.5	18.1
NE	798.3	504.2	356.7	441.6	111.3	22.1
NGE	29.6	19.4	10.6	19	4.4	22.7
NGM ²	16125	9533	4857	11268	2650	27.8
PMG	61.7	46.2	31.3	30.4	7	15.3
RDT	647.4	430.5	247.3	400.1	115.3	26.8

PVG = nombre de jours à l'épiaison (jours), HT= hauteur des plantes (cm), LE= longueur de l'épi (cm), LC = longueur du col de l'épi (cm), LB = longueur des barbes (cm), PE = poids des épis à maturité (g/m²), Pll = poids de la paille à maturité (g/m²), Biom= biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²), HI = indice de récolte (%), NE = nombre d'épis/m², NGE = nombre de grains/épi, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains (g), RDT = rendement en grain (g/m²).

Tableau 11. Valeurs moyennes maximales, minimales, moyennes, amplitude, écart type de l'échantillon et coefficient de variation des caractères mesurés au cours de la campagne 1997/98

On note aussi des changements dans les liaisons entre les variables mesurées comparativement à ce qui a été observé au cours de la première année de l'étude. La durée de la phase végétative ne présente pas de liaisons significatives avec les variables qui caractérisent le statut hydrique de la plante (Tableau 12). Elle est par contre négativement et significativement corrélée avec la surface de la feuille étandard et positivement liée avec la hauteur du chaume et la longueur du pédoncule de l'épi. Elle présente aussi des liaisons positives avec la biomasse produite à maturité, avec le poids des épis/m², le nombre de grains/épi (Figure 8) et le nombre de grains/m² et avec le rendement en grain (Tableau 12). Des liaisons négatives et significatives sont notées avec le poids de 1000 grains, le nombre d'épis/ m² et la biomasse accumulée au stade épiaison. Les géotypes tardifs ont été plus avantagés au cours de cette seconde campagne suite à la bonne répartition de la pluie

et son avènement assez tardif. Ces génotypes se caractérisent par une faible biomasse accumulée au stade épisaison, peu d'épis /m² et un faible poids de 1000 grains (Tableau 12).

La hauteur du chaume présente des liaisons significatives et positives avec la longueur du col, des barbes, la biomasse aérienne et la paille produites à maturité, et la fertilité épi. Elle est négativement liée avec le nombre d'épis et l'indice de récolte. Les variétés relativement hautes produisent peu d'épis par unité de surface, probablement suite la compétition entre les tiges et les épis portées. Elles compensent cependant par la bonne fertilité épi qui semble les caractériser.

La hauteur du chaume se montre indépendante du rendement en grain, du poids des épis et du statut hydrique de la plante. A l'intérieur du matériel végétal évalué au cours de cette campagne, il est donc possible de trouver des génotypes présentant un bon statut hydrique, une bonne hauteur de chaume et un bon rendement en grain.

	PVG	BIOm	RDT	HT	
TRE	0.045ns	-0.051ns	-0.004ns	-0.050ns	ns=non
VF1	0.101ns	-0.145ns	-0.117ns	0.007ns	significatif
VF2	-0.02ns	-0.209*	-0.216*	0.008ns	
VE	0.222*	0.243**	-0.097ns	0.194*	5%≠0.179*
IC	-0.03ns	0.014ns	-0.011ns	0.009ns	
SF	-0.398***	-0.053ns	-0.261**	0.035ns	1%≠0.234***
HT	0.474***	0.390***	0.084ns	1.000	
LE	0.292**	0.055ns	0.176ns	0.151ns	
LC	0.467***	0.367***	0.094ns	0.818***	
LB	0.395***	0.226*	0.112ns	0.304***	
PE	0.295**	0.625***	0.834***	0.101ns	
BIOe	-0.363***	-0.043ns	-0.208*	0.095ns	
BIOm	0.236**	1.000	0.516***	0.390***	
PII	0.097ns	0.843***	0.082ns	0.427***	1%≠0.296***
HI	0.272**	-0.153ns	0.754***	-0.203*	
NE	-0.235**	0.321***	0.287**	-0.276**	
NGE	0.595***	0.195*	0.648***	0.226*	
NGM ²	0.423***	0.409***	0.828***	0.019ns	
PMG	-0.237**	0.108ns	0.108ns	-0.006ns	
RDT	0.383***	0.516***	1.000	0.084ns	

PVG = nombre de jours à l'épisaison (jours), TRE = teneur relative en eau foliaire (%), VF1 = vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la surface foliaire (mg H₂O/cm²), VF2 = vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la matière sèche foliaire (mg H₂O/mg ms), VE = vitesse de perte d'eau relativisée par rapport à la matière sèche de l'épi (mg H₂O/mg ms), IC = intégrité cellulaire (%), SF = surface de la feuille étendard (cm²), HT = hauteur des plantes (cm), LE = longueur de l'épi (cm), LC = longueur du col de l'épi (cm), LB = longueur des barbes (cm), PE = poids des épis à maturité (g/m²), BIOe = biomasse aérienne à l'épisaison (g/m²), BIOm = biomasse aérienne mesurée à maturité (g/m²), PII = poids de la paille à maturité (g/m²), HI = indice de récolte, NE = nombre d'épis/m², NGE = nombre de grains/épi, NGM² = nombre de grains/m², PMG = poids moyen de 1000 grains (g), RDT = rendement en grain (g/m²).

Tableau 12. Coefficients de corrélations phénotypiques entre les variables mesurées en 1997/98

La biomasse présente des corrélations significatives et positives avec la paille produite, le poids des épis, les composantes du rendement, hormis le poids de 1000 grains, et avec le rendement en grain (Tableau 12). L'indice de récolte n'est pas significativement corrélé avec la biomasse suggérant qu'il est possible de sélectionner des génotypes présentant une biomasse aérienne et un indice de récolte élevés (Tableau 12).

Le rendement en grain est négativement lié à la vitesse de perte d'eau foliaire exprimée en mg H₂O/mg ms, à la surface de la feuille étendard et à la biomasse aérienne accumulée au stade épisaison (Tableau 12). Les génotypes perdant beaucoup d'eau par unité de matière sèche produite, ceux arborant des feuilles étendards de grandes dimensions ainsi que ceux accumulant une biomasse aérienne élevée au stade épisaison ont tendance à donner des rendements relativement plus faibles. Le rendement en grain est aussi corrélé avec le poids

des épis/ m², avec les nombres d'épis/ m², de grains/épi et de grains/m² ainsi qu'avec l'indice de récolte (Figure 8).

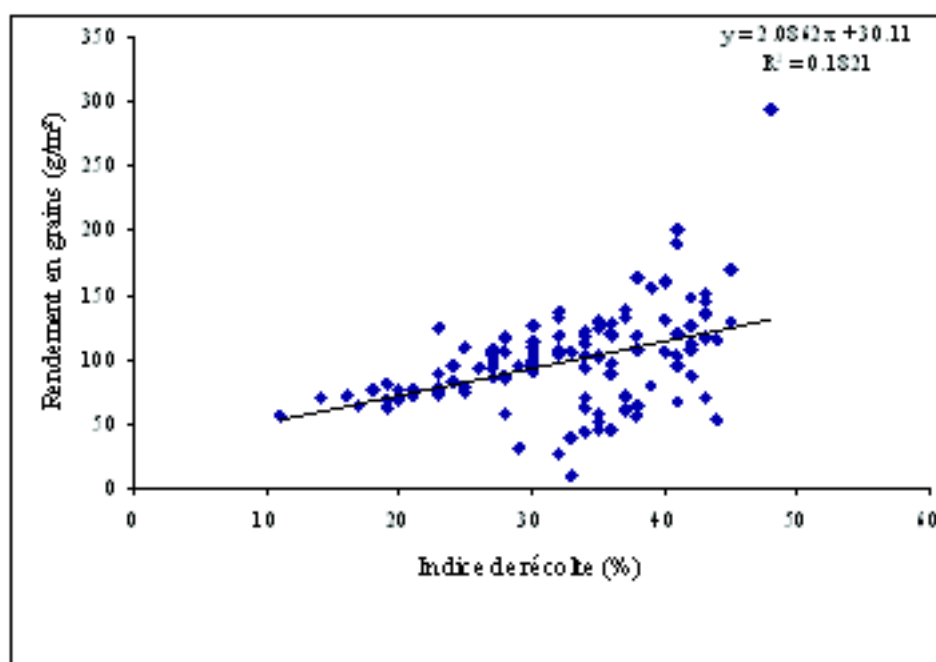


Figure 8. Relation entre le rendement en grain et l'indice de récolte des 119 génotypes

III.2 - Similitude du comportement génotypique inter-années

Les corrélations phénotypes inter-caractères sont le plus souvent d'origines environnementales. L'information qu'elles apportent est de ce fait influencée par l'effet environnement spécifique à chaque campagne. L'identification des caractères utilisables comme critères de sélection, basée sur les corrélations est peu efficace (Benmahammed, 1995). L'utilisation des corrélations inter-années par caractère et inter-caractères est de ce fait plus informative. Elle renseigne sur le degré de similitude de comportement génotypique pour un caractère donné.

Les valeurs prises par le coefficient de corrélation entre les biomasses aériennes mesurées à maturité ($r = -0.079_{ns}$), la hauteur du chaume ($r = 0.173_{ns}$), le poids des épis ($r = 0.042_{ns}$), la paille ($r = -0.154_{ns}$), la fertilité des épis ($r = -0.007_{ns}$) des deux années sont non significatifs. Celui des rendements en grains est significatif et de signe négative ($r = -0.291^{***}$), alors que celui des nombres d'épis/m² ($r = 0.294^{***}$), des poids de 1000 grains ($r = 0.226^*$) et des durées de la phase végétative ($r = 0.539^{***}$) sont positifs et significatifs.

Ces corrélations stressent le peu de ressemblance dans l'expression d'un même caractère, comme la biomasse aérienne produite ou la hauteur du chaume chez un génotype donné au cours de deux années successives. On note même une inversion de l'expression des caractères selon les environnements, comme c'est le cas pour le rendement en grain. Un génotype jugé comme relativement performant lors de la première année tend à avoir un comportement médiocre au cours de la deuxième année.

Ce comportement différentiel en fonction des années est dû à l'interaction du génotype avec les conditions de croissance spécifiques à l'année considérée. Certains caractères montrent cependant une relative stabilité vis à vis des changements des conditions de croissance du milieu. Ces caractères sont la durée de la phase végétative, le nombre d'épis et le poids de 1000 grains. Ces relations indiquent que les génotypes tendent à garder relativement le même ordre de classification pour ces caractéristiques malgré les changements des conditions de croissance.

III.3 - Architecture typique, stabilité et performance de rendement

La variation des conditions de croissance de l'environnement de production et les réponses différenciées des génotypes engendrent des interactions génotype x milieu qui rendent imprévisibles les niveaux de production des sélections faites. Les réponses différenciées ont pour origine la variation des différents caractères composants l'architecture de la plante comme la hauteur, la durée du cycle et la matière sèche accumulée à un stade donné (Richards et al .1997).

La multitude des causes (sensibilité de réponse des différents caractères) engendrant les interactions génotype x milieu crée le besoin de chercher à grouper dans un même fond génétique plusieurs caractéristiques désirables pour l'expression du potentiel et de la stabilité du rendement. Le comportement moyen des génotypes des groupes 4 et 5 qui présentent une architecture typique favorisant le rendement en grain au cours de la campagne 1996/97, est donné par le tableau 13 et la figure 9.

No-	Pedigree	RDT (g/m ²)	BIOm (g/m ²)	HT (cm)	PVG (j)
Témoins					
5-	MBB	252.9	1177.6	91.8	124.0
17-	Waha	455.3	1515.2	67.2	115.3
	X témoins	354.1	1346.4	79.5	119.6
Groupe 4					
35-	Chen/Auk	530.9	1160.2	64.5	118.7
44-	Gabgel79	507.9	1547.2	73.9	122.7
62-	Mbvd4	607.4	1742.5	71.3	123.0
66-	Mbvd9	567.4	1509.7	71.7	124.7
80-	Cham1/Mrb//Oumguer2	378.7	1281.2	57.1	116.0
82-	Richi/Cham1- 1S	416.0	1636.9	78.6	118.3
88-	Gignan/Algerian//Cham1.3/Wadlmz2-1S	334.8	1118.2	90.9	126.3
89-	Gignan/Algerian/Cham1.3/Wadlmz2.2S	461.4	1488.0	72.6	117.6
	X Groupe4	475.6	1435.4	72.6	120.9
Groupe 5					
81-	Heba3/Brachoua2	389.8	1338.0	75.8	115.6
83-	Sicilian/Algerian//Genil.3 1S	371.3	1238.3	76.2	117.3
90-	Mexican.311/Iraq//Mrb5//Sabil2	516.1	1695.0	70.8	117.6
	X Groupe 5	425.7	1423.9	74.3	116.8
	XG 119 Génotypes	430.0	1429.0	77.1	121.3

X = moyenne.

Tableau 13. Comportement des génotypes des groupes 4 et 5 et des témoins au cours de la deuxième année d'expérience

Les génotypes des deux groupes et surtout ceux du groupe 4 sont mieux structurés pour les caractères désirables à une architecture typique comparativement à la moyenne des témoins de référence et à la moyenne de la population constituée des 119 génotypes. Les moyennes du groupe 4 sont très proches de celles de la population pour la durée de la phase végétative, la biomasse aérienne mesurée à maturité, inférieures de 6 % pour la hauteur du chaume et nettement meilleures pour le rendement en grain (Figure 9).

Les moyennes caractéristiques du groupe 5 sont aussi assez proches de celles de la population pour le rendement et la biomasse aérienne. Elles sont inférieures de 4 % pour la durée de la phase végétative et la hauteur du chaume. La moyenne de rendement des témoins est nettement inférieure à celle de la population et à celles des deux groupes sélectionnés sur la base d'une architecture typique favorable à l'expression du rendement (Figure 9).

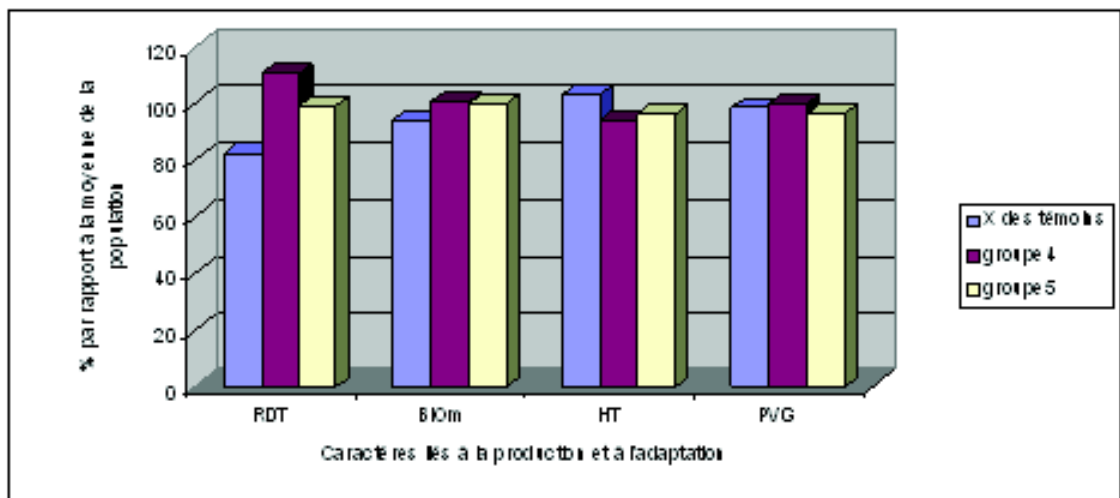


Figure 9. Valeurs relatives caractéristiques des groupes de génotypes à architecture type et des témoins (% de la moyenne des 119 génotypes)

Les contraintes environnementales que rencontre la culture des céréales sur les hautes plaines orientales relèvent du statut hydrique du sol et de l'air ambiant, et des amplitudes thermiques qu'il est difficile de maîtriser. La réponse des variétés à ces variations de types climatiques est variable selon le stade du développement et le caractère considéré. Tous les caractères sont affectés à des degrés variables par les stress. Selon Schonfeld *et al.* (1988) il y a réduction du nombre de grain par épi, du nombre d'épis par plant, du poids moyen du grain, de l'indice de récolte et du rendement en grain, sous stress.

La sensibilité des caractères est variable aussi selon le caractère considéré, le type et l'intensité de la contrainte. Ainsi selon Dakheel *et al.* (1993), la réduction de la hauteur du chaume est fonction du degré de stress hydrique. Hafeez-khan *et al.* (1993) constatent que le nombre d'épillets par épi est moins sensible au stress hydrique, comparativement au poids des épis qui est fortement pénalisé. Kameli et Losel (1996) notent que la matière sèche, produite sous stress, reste sous le seuil de 50%, comparativement à celle du témoin non stressé. Cette réduction est assez conséquente pour affecter le rendement en grain. L'effet pénalisant du stress thermique se matérialise par une accélération du développement et une réduction des dimensions des organes constitutifs de la plante. La résultante est un effet négatif sur la productivité globale de la plante (Fisher, 1985).

Parmi les caractéristiques désirables et constituant une architecture en faveur de l'expression du potentiel, il y a la hauteur du chaume. La hauteur est liée au pédoncule de

l'épi qui représente un site de stockage des assimilats transférables vers le grain. Turner (1997) signale que les génotypes transférant plus de réserves vers le grain sont capables de minimiser la variation du poids du grain et du rendement. Selon Siddique et al. (1989) et Clarke et al. (1991), Une biomasse élevée est une caractéristique désirable en milieux semi-arides.

Un long cycle de développement est plus favorable à la production d'une biomasse aérienne élevée. L'indice de récolte est le plus souvent lié au rendement quelque soit le type d'environnement. Son amélioration sous stress est très difficile. Elle relève plus de l'amélioration de la biomasse aérienne qui est relativement possible sous conditions semi-arides (Richards 1987). La variation de tous les caractères influençant le rendement en grain conduit donc à l'évidence que lorsque la variabilité environnementale est élevée, il y a lieu de chercher les différentes combinaisons de caractères susceptibles de concilier stabilité et potentiel de rendement. Le développement d'un idéotype de plante pour un environnement ciblé dépend donc de la capacité à identifier les caractères qui sont relativement les moins influencés par la variation environnementale et qui de ce fait amortissent ses effets sur le rendement en grain.

Selon Jana et al. (1990), il y a probablement plusieurs architectures de caractères idéales pour un environnement variable. Il y a aussi des indications que différentes combinaisons de caractères peuvent aboutir à un même rendement en grain, sous stress (Acevedo et Ceccarelli, 1989). La présente étude identifie la hauteur du chaume, la durée de la phase végétative et la biomasse aérienne en plus de rendement en grain lui même comme une combinaison de caractères formants une architecture typique pouvant conduire à l'amélioration simultanée de la stabilité et du potentiel de rendement.

Cette architecture typique a été identifiée sur la base de l'évaluation de 119 génotypes testés sur deux environnements extrêmes. La sélection a été faite en conditions de stress sévères et la réponse mesurée sous conditions optimales dans le souci de maximiser la réponse à la sélection en conditions favorables tout en maintenant les allèles de résistance à la sécheresse qui s'expriment sous contraintes. Cette architecture typique apporte un plus en matière de sélection sur la base du rendement en grain.

En effet, Fella *et al.* (2001) trouvent une relation négative entre l'adaptation, mesurée par la tolérance au stress calorique, et le rendement en grain. Les variétés tolérantes, sélectionnées sur la base du rendement en grain sous stress, produisent moins en absence de stress comparativement aux variétés sensibles. L'inverse est vrai en présence de stress, avec un écart de rendements entre environnements plus élevé chez les génotypes sensibles que chez les génotypes tolérants.

Conclusion

Les résultats de la première année d'étude ont révélé l'existence d'une importante variabilité d'origine génétique au sein du matériel végétal étudié qui justifie son exploitation à des fins de sélection pour améliorer le rendement en grain et l'adaptation au milieu.

L'information qu'apportent les corrélations intercaractères est influencée par l'effet environnement spécifique à chaque campagne. L'utilisation des corrélations inter-années par caractère et intercaractères est de ce fait plus informative.

Les corrélations interannées par caractère montrent le peu de ressemblance dans l'expression de nombreux caractères étudiés au cours des deux campagnes. Parmi ces caractères on peut citer le nombre de grains par épi, la hauteur du chaume, la biomasse aérienne à maturité, le poids des épis et celui de la paille mesurés à maturité. Certains caractères ont cependant montré une relative stabilité vis-à-vis des changements des conditions du milieu. C'est le cas de la durée de la phase végétative, le nombre d'épis/m² et le poids de mille grains. Les rendements en grains des deux campagnes, qui représentent la résultante de l'expression des autres caractères, ont une liaison négative significative. Ce résultat montre les limites et l'inefficacité de la sélection monocaractère directe basée sur le rendement grain.

La sélection multicaractère est le moyen judicieux pour déterminer des combinaisons de caractères susceptibles de concilier stabilité et potentiel de production.

Le modèle donné par la régression progressive a retenu le nombre de grains au m² et le poids de mille grains qui expliquent 98,7 % de la variation du rendement grain. Le modèle a donc retenu en premier lieu les caractères qui composent directement le rendement grain. Son utilisation va donner les mêmes résultats que la sélection monocaractère directe basée sur le rendement en grain. Pour éviter un tel processus nous avons groupé les 119 génotypes sur la base des caractères liés à la productivité et à l'adaptation dont les plus importants sont la durée de la phase végétative, la hauteur du chaume, la biomasse aérienne produite au stade maturité et le rendement grain.

Ce groupage réalisé avec la technique de la classification hiérarchique sur la base des données de la première campagne, classe les 119 génotypes en 6 groupes divergents. Les groupes 4 et 5 sont les plus intéressants par rapport aux variables qui conditionnent le rendement et sa stabilité. Ils ont des valeurs supérieures à la moyenne de la population évaluée pour le rendement en grain, la biomasse produite à l'épiaison et à maturité, le poids des épis et de la paille mesurés à maturité, le nombre d'épis au m² et le nombre de grains par épi.

Les groupes 4 et 5 sélectionnés en conditions de stress sévères ont eu un bon comportement en conditions favorable de la seconde campagne, et sont mieux structurés pour former une architecture typique de caractères désirables comparativement à la moyenne de référence waha et mbb.

La présente étude identifie la hauteur du chaume, la durée de la phase végétative et la biomasse aérienne à maturité en plus du rendement grain comme une combinaison de caractères formant un ideotype pouvant conduire à l'amélioration simultanée de la stabilité et de la productivité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbassenne F., Bouzerzour H., Hachemi L. (1997a).** Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi aride d'altitude. *Annales Agronomiques de INA* 18: 24-36.
- Abbassenne F., Bouzerzour H., Hachemi L. (1997b).** Taux de remplissage et durée de la phase de remplissage chez 14 génotypes de blé dur (*T. durum* Desf.) en zone semi aride. *Revue de la Recherche Agronomique de l'INRA*. 3: 9-17.
- Acevedo E., Ceccarelli S. (1989).** Role of the physiologist-breeder in a breeding program for drought resistance conditions. In: *Drought resistance in cereals*. F.W.G. Baker ed. CAB International, Wallingford. P. 117-139.
- Acevedo E. (1991).** Improvement of winter cereal crops in mediterranean environments. In: *Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediterranean environments*. Acevedo E., Conesa A.P., Monneveux P., Srivastava J.P. eds. INRA, Paris (les colloques n° 55). P. 275-305.
- Aidaoui A., Tartani T. (2000).** Gestion de l'irrigation du blé dur par des indicateurs de l'état hydrique. In *Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region: New Challenges*. Royo C., Nachit M.M., Di Fonzo N., Araus J.L. eds. CIHEAM Options Méditerranéennes: Série A. (Séminaires Méditerranéens n° 40). Zaragoza (Spain). P. 579-582
- Annicchiarico P., Perenzin M. (1994).** Adaptation patterns and definition of macro-environments for selection and Recommendation of common-wheat genotypes in Italy. *Plant Breeding*. 113: 197-205.
- Araus J.L., Amaro T., Voltas J., Nakhoul H., Nachit M.M. (1998).** Chlorophyll floescence as a selection criterion for grain yield in durum wheat under mediterranean conditions. *FCR*, 55 : 209 - 223.
- Bahlouli F., Bouzerzour H., Benmahammed A. (2001).** Etude de la réponse à la sélection de la précocité chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi aride d'altitude. *Ann. Inst. nat. agron. El Harrach*, 22 (1-2): 1-25.
- Baldy G. (1974).** Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques, leur influence sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. *Doc. Projet Céréale*. 152 p.
- Baldy C. (1993).** Effets du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en Méditerranée occidentale. In : *Tolérance à la sécheresse des céréales en zones méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale*. Monneveux P. et Ben salem M. eds. INRA, Paris (les colloques n° 64). P. 83-100.
- Bansal K.C., Sinha S.K. (1991).** Assessment of drought resistance in 20 accessions of *Triticum aestivum* and related species. 1. Total dry matter and grain yield stability. *Euphytica* 56: 7-14.

- Bartels D., Furini A., Ingram J., Salamini F. (1996).** Responses of plants to dehydration stress: a molecular analysis. *Plant Growth Regulation* 20 : 111-118.
- Belaid A., Moussaoui M. (1999).** Le blé dur dans le monde: Production, commerce et effets attendus des récents changements économiques. In: Séminaire régional sur l'amélioration du blé dur dans les régions arides de l'Asie de l'ouest et de l'Afrique du nord (WANA), Alger les 27-29 Novembre, 1999, 20 pages.
- Belhassen E., This D., Monneveux P. (1995).** L'adaptation génétique aux contraintes de la sécheresse. *Cahiers Agricultures* 4 : 251-261.
- Ben Abdallah N., Ben Salem M. (1993).** Paramètres morphophysologiques de sélection pour la résistance à la sécheresse des céréales. in: Tolérance à la sécheresse des céréales en zones méditerranéennes. Diversité génétique et amélioration variétale. Monneveux P. Ben Salem M. eds. INRA, Paris (les colloques n° 64). P. 275-298.
- Benlaghli M., N. Bouattoura, P. Monneveux, C. Borries (1990).** Les blés des Oasis: étude de la diversité génétique et de la physiologie de l'adaptation au milieu. *Options Méditerranéennes* 11:171-195
- Benlaribi M., Monneveux P., Grignac P. (1990).** Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Agronomie* 10:305-322.
- Benmahammed A. (1995).** associations et héritabilités de quelques caractères à variation continue chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). thèse de magister INA. 80p.
- Blouet A., Gaillard B., Massé J. (1984).** Le gel et les cereales. Exemple d'étude des risques de gel hivernal en lorraine. *Perspectives Agricoles* N° 85.
- Blum A. (1996).** Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation* 20: 115-148.
- Blum A., Mayer J., Gozlan G. (1982).** Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Res.* 5:137-146.
- Blum A., Mayer J., Gozlan G. (1983).** Associations between plant production and some physiological components of drought resistance in wheat. *Plant, Cell and Environment* 6: 219-225.
- Blum A., Golan g., Mayer J., Sinmena B., Shpiller L., Burra J. (1989).** The drought response of landraces of wheat from the northern Negev desert in Israel. *Euphytica.* 43: 87-96.
- Blum A., Pnuel Y. (1990).** Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in a mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.* 41:799-810.
- Bouzerzour H., Zerargui H., Dekhili M. (1994).** Relationships among duration of vegetative and grain filling periods, yield components and grain yield in durum wheat. *Awamia* 75: 15-21.
- Bouzerzour H., Dekhili M. (1995).** Heritabilities, gains from selection and genetic correlations for grain yield of barley grown in two constructing environments. *F.C.R.* 41: 173-178.
- Bouzerzour H., Zerargui H., Dekhili M. (1995).** Relationships among duration of vegetative and grain filling periods, yield components and grain yield in durum wheat. *Awamia* 75: 15-23.

- Bouzerzour H., A. Djekoun. (1996).** Etude de l'interaction génotype x lieu du rendement de l'orge en zone semi-aride. *Rev. Sci. & Techn. Univ. Constantine*, 7:16-28.
- Bouzerzour H., Benmahammed A., Hassous L. (1998).** Variabilité génétique, héritabilité et corrélations entre caractères mesurés sur orge en milieu semi aride.64, eds INRA Paris.: p.139-148.
- Bouzerzour H., Benmahammed A., Benkharbache, Hassous L. (2002).** Contribution des nouvelles obtentions à l'amélioration du rendement de l'orge en zone semi-aride. *Revue de la Recherche Agronomique de l'INRA*. 10: 45-58.
- Calhoun D.S., Gebeyehu G., Miranda A., Rajaram S., Van Ginkel M. (1994).** Choosing environments to increase wheat grain yield under drought conditions. *Crop Sci.* 34 : 673-678.
- Ceccarelli S., Mekni M.S. (1985).** Barley breeding for areas receiving less than 250 mm annual rainfall. *Rachis* 4 (2): 3-9.
- Ceccarelli S., Acevedo E., Grando S. (1991).** Breeding for yield stability in unpredictable environments : Single traits, interaction between traits, and architecture of genotypes. *Euphytica* 56 : 169-185.
- Ceccarelli S., Grando S., Hamblin J. (1992).** Relationships between barley grain yield measured in low and high yielding environments. *Euphytica*. 64: 49-58.
- Ceccarelli S. (1994).** Specific adaptation and breeding for marginal conditions. *Euphytica*. 77: 205-219.
- Ceccarelli S., Grando S. (1996).** Drought as a challenge for the plant breeder. *Plant Grought Regulation*. 20: 149-155.
- Clarke J.M. (1987).** Use of physiological and morphological Traits in Breeding programmes to improve drought resistance of cereals. In : *Drought tolerance in winter cereals* (Srivastava J.P., Porceddu E., Acevedo E., Varma S., eds). ICARDA, Aleppo, p. 171-189.
- Clarke J.M., Romagosa I., Jana S., Srivastava J.P., Mccaig (1989)** relationship of excised-leaf water loss rate and of durum wheat in diverse environments. *Can. J. plant Sci.* 69: 1075-1081.
- Clarke J.M., Romagosa I., Depauw R.M. (1991).** Screening durum wheat germplasm for dry growing conditions : morphological and physiological criteria. *Crop Sci.* 31(3) : 770-775.
- Couvreur F., J.P. Dagneaud J.P., Massé J. (1979).** Les céréales et le froid. *Persp. Agric.* : 1-8.
- Couvreur (1981).** Comportement des cultures et climat. *Perspectives agricoles*. 45: 30-41.
- Dakheel A.J., Nasi I., Mahalakshmi V., Peacock J.M. (1993).** Morphophysiological traits associated with adaptation of durum wheat to harsh mediterranean environments. *Aspects of Applied Biology* 34. *Physiology of varieties* : 297-307.
- Ehdaie B., Hall A.E., Farquhar G.D., Nguyen H.T., Waines J.G. (1991).** Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in wheat. *Crop Sci.* 31: 1282-1288.

- El Hafid R., Smith D.H., Karrou M., Samir K. (1998).** Root and shoot growth, water use and water use efficiency of spring durum wheat under early-season drought. *Agronomie* 18: 181-195.
- Falconer D.S. (1981).** Introduction to quantitative genetics. 2nd Ed. Longmann Group LTD, London. 340 p.
- Fellah A., Benmahammed A., Djekoun A., Bouzerzour H. (2002).** Sélection pour améliorer la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Actes de l'IAV, Hassan II, (Maroc). 64: 35-42.
- Fisher R. A. (1985).** Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agr. Sci. Camb.* 105: 447-461.
- Gautier M.F., Labhilili M., Joudrier P. (1993).** Marqueurs de la tolérance au stress hydrique de fin de cycle chez le blé dur. In : Tolérance à la sécheresse des céréales en zones méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale. Monneveux P. et Ben salem M. eds. INRA, Paris (les colloques n° 64). P. 423-427.
- Gebeyehou G., Knott D.R., Baker R.J. (1982).** Rate and duration of grain filling in durum wheat cultivars. *Crop Sci.* 22: 337-340.
- Gregory P.J. (1989).** The rôle of root characteristics in moderating the effects of drought. In : Drought resistance in cereals. F.W.G. Baker ed. CAB International, Wallingford. P. 141-150.
- Hadjichristodoulou A. (1987).** Stability of performance of cereals in low-rainfall areas as related to adaptive traits. In : Drought tolerance in winter cereals (Srivastava J.P., Porceddu E., Acevedo E., Varma S., eds.). ICARDA, Aleppo.
- Hadjichristodoulou A. (1988).** Breeding strategies for consistency of performance in unstable arid environments. Proceedings of the 7th international wheat genetics symposium. Cambridge. P. 1081-1086.
- Hafeez Khan A., Ashraf M.Y., Azmi A.R. (1993).** Osmotic adjustment in wheat. A response to water stress. *Pak. J. Sci. Ind. Res.* 36: 151-155.
- Hauchinal R. R., Tandon J.P., Salimath P.M. (1993).** Variation and adaptation of wheat varieties for heat tolerance in Peninsular India. In : Proc. Intern. Conf. On Wheat in heat stressed environment : irrigated, dry areas and rice-wheat farming systems. Eds Saunders and G.P. Hettel.: p.175-192.
- Hsissou D., Bouharmont (1994).** In vitro selection and characterisation of drought tolerant plants of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Agronomie* 2: 65-70.
- Jaffé et Rojas (1994).** Stress abiotiques et biotechnologies en Amérique Latine. *Le moniteur de la biotechnologie et du développement* 18: 5-6.
- Jana S., Srivastava J.P., Damania A.B., Clarcke J.M., Yang R.C., Pecetti L. (1990).** Phenotypic diversity and associations of some drought-related characters in durum wheat in the mediterranean region. In : wheat Genetic resources : Meeting Diverse Needs. (Srivastava J.P., Damania A.B., eds.). P. 27-44.
- Jensen A.B., Busk P.K., Messeguer R., Figueras M., Mar Albà M., Peracchia G., Messeguer R., Goday A., Pagès M. (1996).** Drought signal transduction in plants. *Plant Growth Regulation* 20: 105-110.

- Johson D. A., Richards R.A., Turner N.C., (1983).** Yield, water relations, gas exchange, and surface reflectances of near-isogenic wheat lines differing in glaucousness. *Crop Sci.* 23: 318-325.
- Jones M.M., Turner N.C., Osmond C.B. (1981).** Mechanisms of drought resistance. In : the physiology and biochemistry of drought resistance in plants. Paleg L.G. and Aspinall D. eds, New york, Academic press. P. 15-37.
- Jouve P. (1984).** Relation entre déficit hydrique et rendement des céréales (blé tendre et orge) en milieu aride. *Agronomie Tropicale* 39 (4) : 308-315.
- Kameli A., Losel D.M. (1995).** Contribution of carbohydrates and other solutes to osmotic adjustment in wheat leaves under water stress. *Journal of Plant Physiology.* 145: 363-366.
- Kameli A., Losel D.M. (1996).** Growth and sugar accumulation in durum wheat plants under water stress. *New phytol.* 132 : 57-62.
- Kirby E.J.M., Appleyard M., Fellows G. (1985).** Effects of sowing date and varieties on main shoot leaf emergence and number of leaves of barley plant. *Agronomie*, 5: 117-126
- Kirby E.J.M., Yard A.M. (1981).** Cereal development guide. Eds. Baron A. Cereal unit: 70 p.
- Lawlor D.W. (1994).** Physiological and biochemical criteria for evaluating genotypic responses to heat and related stresses. In: Saunders, D. A. and G. P. Hettel EDS, *Wheat in heat stressed environments, irrigated, dry areas and rice-wheat farming systems*, Mexico, D.F., Cimmyt, p.127- 142.
- Ledent J.F. (1978).** Etude intravariétale des relations entre le rendement par épi et les caractères morphologiques chez le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) : relations morphologiques à la floraison. *Ann. Agron.* 29 (6): 625-640.
- Levitt J. (1972).** Responses of plants to environmental stress. Vol. 2, Academic press, New York. 697 p.
- Mekhlouf A., Dehbi F., Bouzerzour H., Hannchi A., Benmahammed A., Adjabi A. (2006).** Relationships between cold tolerance, grain yield performance and stability of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes grown at high elevation area of eastern Algeria. *Asian Journal of Plant Science* 5 (4) : 700-708.
- Monneveux P., Nemmar M. (1986).** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie.* 6: 583-590.
- Monneveux P. (1991).** Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales? In: L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. AUPELF-UREF. John Libbey Euritest.: p.165-186.
- Monneveux P., Al-Hakimi A., Rekika D., Zaharieva M., Djekkoun A. (1994).** Utilisation des ressources génétiques apparentées pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse du blé dur: Résultats préliminaires et essai d'analyse. in: Facteurs abiotiques et production du blé en zones méditerranéennes. Deuxièmes journées scientifiques sur le blé, Constantine, Algérie. P. 1-12.

- Monneveux P., Belhassen E. (1996).** The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant Growth Regulation* 20: 85-92.
- Morgan J.M., Hare R.A., Fletcher R.J. (1986).** Genetic variation in osmoregulation in bread and durum wheats and its relationship to grain yield in a range of field environments. *Aust. J. Agric. Res.* 37: 449-457.
- Morgan J.M. (1989).** Physiological traits for drought resistance. In : *Drought resistance in cereals*. F.W.G. Baker ed. CAB International, Wallingford. P. 53-64.
- Mullet J.E., Whitsitt M.S. (1996).** Plant cellular responses to water deficit. *Plant Growth Regulation* 20: 124 -129.
- Nachit M.M., Jarrah M. (1986).** Association of some morphological characters to grain yield in durum wheat under Mediterranean dryland conditions. *Rachis* 5: 33- 35.
- ONM (1998).** Données climatologiques de la région de Sétif, 17 p.
- Oosterom E.J.Van, Acevedo E. (1992).** Adaptation of barley (*Hordeum vulgare* L.) to harsh Mediterranean environments. 1. Morphological traits. *Euphytica* 62: 1-14.
- Oosterom E.j.Van, S. Ceccarelli, J.M. Peacock (1993).** Yield response of barley to rainfall and temperature in Mediterranean environments. *J. Agri. Sci.* 121: 307-313.
- Ortiz-Ferrara G., Yau S.K. & Assad Moussa M. (1991).** Identification of agronomic traits associated with yield under stress conditions. in: *Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediterranean environments*. Colloques 55, eds Montpellier, INRA Paris. p. 67-88.
- OTI (1974).** Projet d'étude devant permettre la définition de programmes de développement sur la zone de rénovation rurale des hautes plaines Sétifiennes. Tome I, Wilaya de Sétif, 145 pages.
- O'Toole J. C. et Stockle C. O (1989).** Assessment of traits in plant breeding: The role of conceptual and simulation modeling. in: *Proceeding of seminar on Improving winter wheat cereals under temperature and soil salinity stresses (Spain)*. p. 220-231.
- Papadakis J.S. (1938).** *Ecologie agricole*. Eds Jules Duculot. Gembloux. 303 pages.
- Passioura J.B. (1981).** Water collection by roots. In : *the physiology and biochemistry of drought resistance in plants*. Palegg L.G. and Aspinall D. eds, New york, Academic press. P. 39-53
- Passioura J.B. (1996).** Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation* 20: 79-83.
- Pecetti L., Annicchiarico P., Kashour G. (1993).** Flag leaf variation in mediterranean durum wheat landraces and its relationship to frost and drought tolerance and yield response in moderately favourable conditions. *FAO/IBPGR Plant Genetic Ressources Newsletter* 93: 25-28.
- Poljakoff-Mayber (1981).** Ultrastructural consequences of drought. In : *the physiology and biochemistry of drought resistance in plants*. Palegg L.G. and Aspinall D. eds, New york, Academic press. P. 389-403.
- Quarrie S.A. (1996).** New molecular tools to improve the efficiency of breeding for increased drought resistance. *Plant Growth Regulation* 20: 167-178.

-
- Rawson H. M. (1986).** High Temperature tolerant wheat Field Crop Research 14: 197-212.
- Richards R.A. (1987).** Physiology and the breeding of winter-grown cereals for dry areas. In- Drought tolerance in winter cereals (Srivastava J.P., Porceddu E., Acevedo E., Varma S., eds). ICARDA, Aleppo, pp. 133-150.
- Richards R.A. (1996).** Defining selection criteria to improve yield under drought. Plant Growth Regulation. 20: 157-166.
- Richards R.A., Reitzke G.J., Van Herwaarden A.F., Duggan B.L., Condon A.G. (1997).** Improving yield in rainfed environments through physiological plant breeding. Dryland Agriculture. 36: 254 - 266.
- Ruivenkamp G., Richards P. (1994).** La recherche sur la tolérance à la sécheresse : un processus social. Le moniteur de la biotechnologie et du développement. 18: 2-4.
- Saadalla M.M., Shanahan S.F., Quick J.S. (1990).** Heat tolerance in winter wheat I. Hardening and genetics effects on membrane thermostability. Crop Sci. 30: 1243 - 1247.
- Schonfeld M.A., Johnson R.C., Carver B.F., Mornhinweg D.W. (1988).** Water relations in winter as drought resistance indicators. Crop Sci. 28: 526-531.
- Siddique K. H. M., Belford R.K., Perry M.W., Tennant D. (1989).** Growth development and light interception of old and modern wheat varieties in Mediterranean environment. Aust. J. Agri. Res. 40:473-487.
- Simane B., Struik P.C., Nachit M.M., Peacock J.M. (1993).** Ontogenetic analysis of yield components and yield stability of durum wheat in water-limited environments. Euphytica 71: 211-219.
- Spagnoletti-Veugli T.L., Qualfiet P.O. (1990).** Flag leaf variation and the analysis of diversity in durum wheat. Plant Breeding. 105: 189-202.
- Steel G.D.S., J.H.Torrie, (1980).** Principles and procedures of Statistics: a biometrical approach. Eds Mc Graw Hill Book Company. NY. 633 pages.
- Stockle C. (1991).** Computer simulation: its role in trait assessment for drought prone environment. In: Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediterranean environments. Acevedo E., Conesa A.P., Monneveux P., Srivastava J.P. eds. INRA, Paris (les colloques n° 55). P.195-210.
- Tardieu F. (1996).** Drought perception by plants. Do cells of droughted plants experience water stress?. Plant Growth Regulation. 20: 93-104.
- Tomasson R., C. Dervin, J.P. Masson, (1993).** Biométrie : Modélisation des phénomènes biologiques. Ed Masson, Paris. 900 pp.
- Turner N.C., Nicholas M.E., Hubick K.T., Farquhar G.D. (1989).** Evaluation of traits for improvement of water use efficiency and harvest index. In: Drought resistance in cereals. F.W.G. Baker ed. CAB international. P. 117-189.
- Turner N.C. (1997).** Further progress in crop water relations. Advances in Agronomy. 58: 293-338.
- Van Damme P. L. J. (1990).** Adaptations to drought stress in plants. Part I : Typology of drought tolerance and resistance. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent. 55(1): 121-126.
-

- Vartanian N. (1996).** Mutants as tools to understand cellular and molecular drought tolerance mechanisms. *Plant Growth Regulation* 20: 125-134.
- Visser B. (1994).** Aspects techniques de la tolérance à la sécheresse. *Le moniteur de la biotechnologie et du développement* 18: 4-5.
- Wardlaw, I. F., Dawson I. A., Munibi P. M. (1989).** Tolerance of wheat to high temperatures during reproductive stage. *Aust. J. Agri. Res.* 46 : 15-24.
- Wardlaw I.F., L. Moncur (1995).** The response of wheat to high temperature following anthesis. In : the rate and duration of grain filling. *Aust J. Plant. Physiol.* 22: 391-397.
- Winter P.C., Hickey G.I., Fletcher H.L. (2000).** L'essentiel en génétique. 401p.
- Worland A. J., Apendina M. L., Sayers E. J. (1994).** The distribution in European winter wheat of genes that influence ecoclimatic adaptability while determining photoperiod insensitivity and plant height. *Euphytica* 80: 219-228.
- Zavala-Garcia F., Bramel-Cox P.J., Eastin J.D., Witt M.D. Andrews D.J. (1992).** Increasing the efficiency of crop Selection for unpredictable environments. *Crop Sci.* 32: 51-57.