

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la faculté des Sciences
Département d'Agronomie
pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : Production et Amélioration des végétaux

Par

Haddad Leïla

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA STABILITE
DES RENDEMENT DU BLE DUR (*Triticum durum* Desf.)
SOUS CLIMAT MEDITERRANEEN**

Soutenu le : 27 / 04 / 2010

Devant le jury :

Président	: Pr. H. Laouar	Professeur	Université Ferhat Abbas Sétif
Rapporteur	: Pr. H. Bouzerzour	Professeur	Université Ferhat Abbas Sétif
Examineurs	: Dr. A. Benmahammed	Maître de conférence	Université Ferhat Abbas Sétif
	Dr. H. Chennafi	Maître de conférence	Université Ferhat Abbas Sétif

Année 2009/2010



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail a :

Mes chers parents ;

Mes frères ;

Mes sœurs ;

Leurs épouses et époux et leurs chers enfants ;

Toute ma grande famille sans oublié personne ;

Mes collègues de magister section Agronomie et Biologie 2007/2008 ;

Mes amies et toutes personnes qui me sont chers ;

Pour le soutien qu'ils m'ont apporté,

Pour leur encouragement, patience et gentillesse,

Je vous remercie infiniment.

Leïla

REMERCIEMENTS

El hamdou LILAH el thi hadana liahtha oua ma qouna linahtadi loula an hadana ELLAH

Ce modeste travail est la résultante de la contribution de plusieurs personnes dont je tiens à remercier vivement :

Toute ma reconnaissance et remerciement vont au Pr Bouzerzour H qui a accepté de m'encadrer, merci infiniment de vous être montré passion, de m'avoir orientée, dirigée, conseillée et encouragée veuillez trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie en particulier

Le Dr. Laour H. pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury,

Le Dr. Chennafi H. et le Dr. Benmahammed A., pour le temps pris sur le leur, pour évaluer ce modeste travail,

Le personnel de La station de l'ITGC de Sétif pour l'accueil, pour l'aide à la mise en place de l'expérimentation, pour le matériel végétal et l'équipement utilisé,

Le personnel du laboratoire du Département d'Agronomie de l'Université Ferhat Abbas, pour les facilités qu'ils nous ont accordé,

Et

Je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I.1. Composition qualitative pour 100 g de grains entiers du blé dur (Hébrard, 1996)	03
Tableau I.2. Superficies (S) nationales emblavées en blés dur et tendre (MADR, 2005).....	04
Tableau I.3. Consommation moyenne (kg/hab/an) algérienne de céréales, entre 1961-2005 (Faostat, 2005)	04
Tableau I.4. Evolution de la production des blés dur et tendre (MADR, 2006)	05
Tableau I.5. Evolution des rendements ($q\ ha^{-1}$) du blé dur et du blé tendre par espèce (MADR, 2006)	05
Tableau I.6. Production (MT) mondiale de blé dur (Faostat, 2007)	06
Tableau II.1. Numéro et Pedigree des génotypes testés au cours de 6 campagnes agricoles sur le site de la station expérimentale de l'ITGC de Sétif	28
Tableau III.1. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des variables mesurées au stade épiaison	33
Tableau III.2. Valeurs moyennes des variables mesurées au stade épiaison	33
Tableau III.3. Coefficient de corrélation entre les variables mesurée au stade épiaison	34
Tableau III.4. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des variables mesurées à maturité	34
Tableau III.5. Valeurs moyennes des variables mesurées au stade maturité	35
Tableau III.6. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des variables mesurées au cours de la phase de remplissage du grain	36
Tableau III.7. Contribution des assimilés du col de l'épi au remplissage du grain	43
Tableau III.8. Durée (j et %) des phases de développement et du cycle de la culture	43
Tableau III.9. Moyennes des rendements grains ($t\ ha^{-1}$) des différents génotypes dans chaque milieu et en moyenne de l'ensemble des milieux (MG)	52
Tableau III.10. Paramètres de stabilité du rendement grain caractéristiques des différents génotypes	52
Tableau III.11. Classement des génotypes évalués comme stables ou instables par les différents indices de stabilité utilisés	60
Tableau III.12. Coefficients de corrélation de rangs (Pearson) entre les paramètres de mesure de la stabilité et le rendement grain dans les milieux stressant et favorable, et en moyenne de l'ensemble des milieux	60
Tableau III.13. Effets directs (en gras) et indirects (italique) des variables déterminantes du rendement grain par campagne	64

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure I.1. Phylogénie des blés (d'après Feldman, 2001)	08
Figure I.2. Le cycle de développement du blé (Henry et De Buyser, 2000)	09
Figure I.3. Phases de formation des différentes composantes du rendement (Meynard et David, 1992)	11
Figure I.4. Localisation des marqueurs moléculaires et des QTL des sucres solubles sur le chromosome 1B du blé (Yang et al., 2007)	20
Figure I.5. mise en évidence d'une interaction x milieu du rendement dans un réseau expérimental comportant 3 génotypes dans 4 milieux (Foucteau ., 2001)	21
Figure II.1. Vue du dispositif expérimental de l'essai mise en place sur le site de recherche de la station de L'ITGC de Sétif au cours de la campagne 2008/2009	25
Figure II.2. Feuille étendard, l'épi et col de l'épi au stade maturité physiologique	27
Figure III.1. Pluie et température moyenne mensuelles des trois dernières campagnes sur le site expérimental ITGC de Sétif	31
Figure III.2. Changement $\{\Delta HT(\%) = 100[1 - (HT_{\text{Épiaison}}/HT_{\text{Maturité}})]\}$ de la hauteur du chaume des variétés étudiées entre les stades épiaison et maturité	36
Figure III.3. Evolution de la hauteur du chaume des différentes variétés au cours de la phase de remplissage du grain	37
Figure III.4. Biomasse aérienne mesurée à l'épiaison et à maturité chez les différentes variétés	38
Figure III.5. Comparaison du rendement machine (RDTM) et celui estimé par rang de 1 m long (RDT)	41
Figure III.6. Evolution du poids du col de l'épi au cours de la phase de remplissage du grain.....	41
Figure III.7. Evolution du remplissage du grain des différentes variétés et maturité physiologique	44
Figure III.8. Durée à l'épiaison et à maturité (comptée à partir du 1mai) des différentes variétés	44
Figure III.9. Représentation des variables mesurées et des génotypes étudiés sur le plan des axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales.....	45
Figure III.10. Relation entre la durée de la phase végétative (PV) et le rendement (RDTM)	47
Figure III.11. Pluies et températures mensuelles des 6 campagnes d'étude	51
Figure III.12. Stabilité temporelle et performances de rendement des génotypes présentant des valeurs S faibles (Massara ₁ et Semito) et élevées (Deraa et Heider/Martes//Huevos de oro)	54
Figure III.13. Stabilité temporelle et performances de rendement des génotypes présentant des valeurs P faibles (Cyprus ₁ et Heider/Martes//Huevos de Oro) et élevées (MBB et Semito)	55
Figure III.14. Variation des performances de rendement des génotypes contribuant fortement (Cyprus ₁ et Deraa), moyennement (Heider/Martes//Huevos de Oro) et faiblement (Mrb ₅ et Heider) à l'interaction génotype x milieu (GxE)	56
Figure III.15. Comportement prédictif des génotypes divergents pour la réponse à la fertilité du milieu (Massara ₁ et Belikh ₂ avec $b < 1$; Cyprus ₁ et Heider/Martes//Huevos de Oro, avec $b = 1$; et	

Adamillo/Duilio//Semitto, avec $b>1$)	59
Figure III.16. Similitude des différents indices de mesure de la stabilité des performances généotypiques de blé dur	61
Figure III.17. Effet de compensation entre le NGM^2 ($\times 1000$ grains m^{-2}) et le PMG (g) chez différentes variétés	64
Figure III.18. Variation du rendement grain en fonction de la variation du NGM^2 avec ou sans compensation du PMG pour différents géotypes de blé dur testés	65

LISTE DES ABREVIATIONS

ABRÉVIATION	EXPLICATION
G X E	Interaction génotype avec l'environnement ou milieu
ADE	Aide à la décision économique
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
CIC	Le Conseil International des Céréales
ITCF	Institut technique des céréales et des fourrages
QTL	Quantitative traits loci (loci des caractères quantitatifs).
HT (cm)	Hauteur du chaume en centimètres
BIOE (g/m ²)	Biomasse à l'épiaison
BIOM (g/m ²)	Biomasse à maturité
NE (m ²)	Nombre d'épis par mètre carré
WNE (g/m ²)	Poids des épis
NGE	Nombre de grain par épi
NGM (/m ²)	Nombre de grains par mètre carré
PMG (g)	Poids de mille grains
PE (g/m ²)	Poids des épis
SF (cm ²)	Surface de la feuille étendard en centimètre carré
PSF (mg/cm ²)	Poids spécifique foliaire
Lcol	longueur du col en centimètre
Wcol	poids du col en gramme
T	Matière sèche transloquée
RDT (g/m ²)	Rendement grain
RDTM (g/m ²)	Rendement machine
PV (j)	Durée de la phase végétative en jours
PRG (j)	Durée de la phase remplissage de grain en jours
ACP	Analyse en composantes principales

SOMMAIRE

	page
INTRODUCTION	01
CHAPITRE I - REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1- IMPORTANCE DU BLE DUR	03
I.1-1- IMPORTANCE ALIMENTAIRE	03
I.1-2- IMPORTANCE ECONOMIQUE	03
I.1-2-1- EN ALGERIE	03
I.1-2-2- DANS LE MONDE	05
I.2- HISTORIQUE ET ORIGINE DU BLE DUR	06
I.2-1- HISTORIQUE DU BLE DUR	06
I.2-2- ORIGINE DU BLE DUR	07
I.2-2-1- ORIGINE GEOGRAPHIQUE DU BLE DUR	07
I.2-2-2- ORIGINE GENETIQUE DU BLE DUR	07
I.3- BIOLOGIE ET CYCLE VEGETATIF	07
I.4- L'ELABORATION DU RENDEMENT DU BLE DUR	10
I.5- LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES A LA PRODUCTION DU BLE DUR ET L'ADAPTATION DE LA PLANTE	13
I.5-1- LES HAUTES TEMPERATURES	13
I.5-2- LES BASSES TEMPERATURES	14
I.5-3- LE STRESS HYDRIQUE	14
I.5-4- MECANISMES D'ADAPTATION DE LA PLANTE AUX STRESS ABIOTIQUES	15
I.5-4-1- ADAPTATION PHENOLOGIQUE	15
I.5-4-2- ADAPTATION MORPHOLOGIQUE	16
I.5-4-3- ADAPTATION PHYSIOLOGIQUE	17
I.6- L'AMELIORATION GENETIQUE DE L'ADAPTATION AUX STRESS ABIOTIQUES	18
I.6-1- LA METHODE CLASSIQUE	18
I.6-2- LA SELECTION ASSISTEE PAR LES MARQUEURS MOLECULAIRES (MAS)	19
I.6-3- L'INTERACTION GENOTYPE -ENVIRONNEMENT ET LA STABILITE DES RENDEMENTS	20
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES	
II.1- ETUDE DU COMPORTEMENT VARIETALE	25
II.1-1- MISE EN PLACE DE L'EXPERIMENTATION	25
II.1-2- SUIVI ET NOTATIONS	26
II.1-2-1- LA DUREE DES PHASES DE DEVELOPPEMENT	26
II.1-2-2- LA MATIERE SECHE ACCUMULEE AUX STADES EPIAISON ET MATURITE	26
II.1-2-3- LA SURFACE ET LE POIDS SPECIFIQUE DE LA FEUILLE ETENDARD	26
II.1-2-4- LA TRANSLOCATION DES ASSIMILATS STOCKES DANS LA TIGE	26

II.1-2-5- LE RENDEMENT ET SES COMPOSANTES	27
II.1-3- ANALYSES DES DONNEES	28
II.2- VARIATION TEMPORELLE DES RENDEMENTS DU BLE DUR	28
II.2-1- CONDUITE DE L'EXPERIMENTATION	28
II.2-2- NOTATIONS.....	28
II.2-3- ANALYSES DES DONNEES	29
II.2-3-1- ANALYSE DE L'INTERACTION	29
II.2-3-2- PARAMETRES STATISTIQUES DE MESURE DE LA STABILITE	29
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION	
III.1- ETUDE DU COMPORTEMENT VARIETAL	31
III.1-1- APERCU SUR LE CLIMAT DE LA CAMPAGNE	31
III.1-2- VARIABLES MESUREES AU STADE EPIAISON	32
III.1-3- VARIABLES MESUREES AU STADE MATURITE	34
III.1-3-1- LA HAUTEUR DU CHAUME	34
III.1-3-2- LA BIOMASSE AERIENNE	37
III.1-3-3- LE NOMBRE ET LE POIDS DES EPIS M ²	38
III.1-3-4- LE POIDS DE 1000 GRAINS, LE NOMBRE DE GRAINS/EPI, DE GRAIN M ² ET LE RENDEMENT	39
III.1-3-5- LA CONTRIBUTION DES ASSIMILAS DU COL DE L'EPI AU REMPLISSAGE DU GRAIN	40
III.1-3-6- LA DUREE DES PHASES DE DEVELOPPEMENT	42
III.1-4- TYPOLOGIE VARIETALE	45
III.1-5- SYNTHESE	48
III.2- ANALYSE DE LA VARIATION TEMPORELLE DU RENDEMENT	50
III.2-1- VARIABILITE GENOTYPIQUE DU RENDEMENT GRAIN	50
III.2-2- ANALYSE DE LA STABILITE DU RENDEMENT GRAIN	50
III.2-3- SIMILITUDE DES INDICES	59
III.2-4- FACTEURS EXPLICATIFS DE L'INTERACTION	62
CONCLUSION	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	67

Introduction

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une culture d'hiver typiquement méditerranéenne, dont la production est utilisée exclusivement pour l'alimentation humaine, sous formes de pâtes alimentaires, couscous, et pain (Bataillon *et al.*, 2006). En Algérie, cette culture est conduite en pluviale. Elle est soumise à la variabilité climatique qui se traduit par des contraintes hydriques et thermiques erratiques, notamment dans l'étage bioclimatique semi-aride (Benchohra et Khelloufi, 2000). Cet étage se caractérise par de larges fluctuations spatio-temporelles des quantités de pluies et des températures. De ce fait, les stress abiotiques sont fréquents, et plus particulièrement lorsque le cycle de la culture tire à sa fin (Bahlouli *et al.*, 2005).

La phase de remplissage du grain se déroule le plus souvent sous des températures élevées associée à l'apparition du déficit hydrique (Chenaffi *et al.*, 2006). Ces contraintes imposent une limite à l'expression du potentiel de production des cultivars, ce qui explique, en partie, la stagnation des rendements de cette culture, qui n'ont pas connu d'amélioration notable durant plus d'un siècle (Amokrane *et al.*, 2002). Sous ces conditions contraignantes, le sélectionneur est à la recherche de génotypes qui possèdent un haut potentiel et la régularité de rendement.

La stabilité du rendement est un critère important pour le développement de cultivars destinés à des milieux à pluviométrie variable (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2003). Selon Sinebo *et al.*, (2004), les producteurs préfèrent adopter des génotypes qui se distinguent par la régularité et à un haut potentiel de rendement. La sélection de génotypes stables et à haut potentiel de rendement est compliquée par la présence de l'interaction génotype x environnement, par la faible héritabilité du rendement en grain, et par l'absence de stratégie de sélection pour la résistance aux stress abiotiques (Bouzerzour et Dekhili, 1995 ; Kirigwi *et al.*, 2004).

En présence d'interaction génotype x environnement (GE), la sélection directe, sur la base du rendement, ou indirecte, sur la base des caractères liés, s'est révélée inefficace dans l'identification de génotypes stables, à haut potentiel de rendement et résistants aux stress abiotiques (Boyd *et al.*, 2003; Forster et Ellis, 2004; Coventry *et al.*, 2006). Toutefois, pour des stress abiotiques d'intensité moyenne, il est possible de sélectionner des génotypes résistants et qui se distinguent aussi par de hauts rendements grains (Fellah *et al.*, 2002).

L'adaptation au milieu est un important objectif de sélection. Eberhart et Russell (1966) mentionnent qu'un génotype adapté est celui qui a une contribution faible à nulle à l'interaction. Brancourt-Hulmel (2000) mentionne que l'étude de l'adaptation d'un génotype revient à analyser sa contribution à l'interaction génotype x environnement. Annichiarico (2002) fait la distinction en adaptation qui est la stabilité dans l'espace (lieux) et la stabilité temporelle, qui représente une variation faible à nulle du rendement, dans le temps. Pour les producteurs, c'est la stabilité temporelle qui est la plus importante, alors que pour les

producteurs semenciers adaptation et stabilité sont toutes deux importantes à cumuler chez un génotype à haut potentiel de rendement (Annichiarico, 2002). L'objectif de la présente contribution est d'étudier le comportement de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) et d'analyser la stabilité temporelle du rendement sous conditions semi- arides.

CHAPITRE I - REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- IMPORTANCE DU BLE DUR

I.1-1- IMPORTANCE ALIMENTAIRE

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une importante place parmi les céréales dans le monde. Le grain du blé dur sert à la production de pâtes alimentaires, du couscous, et à bien d'autres mets comme le pain, le frik, et divers gâteaux (Troccoli *et al.*, 2000). Il est utilisé pour faire les chapatis dans le sous-continent indien et tortillas en Amérique Central et du Sud (Pena et Pfeiffer, 2005). La paille est utilisée comme litière et comme aliment pour les animaux (Doré et Varoquaux, 2006). Le grain de blé dur a une grande valeur nutritionnelle, suite à sa richesse en protéine et la présence du gluten qui donne aux pâtes alimentaires une meilleure tenue à la cuisson (Tableau I.1).

Tableau I.1. Composition qualitative pour 100 g de grains entiers du blé dur (Hébrard, 1996).

Constituants	quantité	Constituants	quantité
Eau (g)	13	Ca (mg)	35
Energie (kj)	1383	Mg (mg)	100
Energie (kcal)	331	P (mg)	390
Glucides (g)	63	Na (mg)	5
Lipides (g)	2.5	K (mg)	-
Protides (g, N x 6.25)	14	Fe (mg)	4.5
Fibres alimentaires(g)	9.5	Vit B1 (mg)	0.5
Vit B2 (mg)	0.09	Vit PP (mg)	6
Vit E (mg)	3	Biotine (mg)	0.01
Acide folique (mg)	0.04		

I.1-2- IMPORTANCE ECONOMIQUE

I.1-2-1- EN ALGERIE

La superficie totale de l'Algérie est de 238 millions d'hectares dont 191 millions sont occupés par le Sahara. La superficie agricole totale représente 3% du total. La surface agricole utile est de 7,14 millions d'hectares, dont près de la moitié est laissée en jachère chaque campagne. Les cultures herbacées couvrent 3,8 millions d'hectares, la céréaliculture constitue la principale activité, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement emblavées représentent 3,6 millions d'hectares, soit 50.42 des terres labourées (Cadi, 2005).

Le blé dur est une ancienne culture dont l'origine remonte à la venue des arabes (Laumont et Erroux, 1961). Cette spéculation se partageait avec l'orge, l'essentiel des emblavements ; alors que le blé tendre d'origine coloniale connut un certain développement après l'indépendance (Tableau I.2). La superficie occupée par le blé dur est de 1 457 913 hectares

(ha), en moyenne pour la période 1996/97- 2003/2004 ; alors que celle du blé tendre est de 816 216 ha (Tableau I.2). L'importance des superficies occupées par ces deux espèces, comparativement à la superficie occupée par l'orge, est influencée par le prix à la production garanti par l'état. Ces prix sont de 4800, 3800 et 2800 DA respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge.

Tableau I.2. Superficies (S) nationales emblavées en blés dur et tendre (MADR, 2005).

	S (ha)	S (ha)
Campagne	BD	BT
1997	1510940	734420
1998	1714720	874210
1999	1487960	791140
2000	1485830	860170
2001	1419040	834760
2002	1350740	813770
2003	1321580	812510
2004	1372495	808750
Moyenne	1457913	816216

De tout temps, les algériens ont été de gros consommateurs de céréales (Tableau I.3). Selon Hakimi (1993), l'orge et le blé dur assuraient le gros des besoins alimentaires des habitants et de leur cheptel, au cours de la période coloniale et bien avant cette dernière. Depuis l'indépendance, une forte demande alimentaire se faisait sentir sur le blé dur et le blé tendre, alors que l'orge devient à destination fourragère (Hakimi, 1993).

Tableau I.3. Consommation moyenne (kg/hab/an) algérienne de céréales, entre 1961-2005 (Faostat, 2005).

	1961	1970	1980	1990	2000	2003	2005
Consommation	110	120	182	193	190	201	215

Actuellement, le pays se classe au premier rang mondial pour la consommation de blé avec une moyenne dépassant largement les 200 kg/hab/an (Table I.3), comparativement à l'Egypte dont la moyenne est de 131 kg/hab/an et à la France dont la moyenne est de 98 kg/hab/an (Faostat, 2005). La croissance démographique, le changement de modèle de consommation et le soutien des prix des produits de base, ont fait que le volume des céréales consommées a augmenté de 427%, entre 1961 et 2003, passant de 1,2 millions de tonnes (MT) à 6,4 MT (Faostat, 2005).

La production du blé dur, comme celle du blé tendre, est très fluctuante (Tableau I.4). Pour preuve et sur la période 2000-2005, la production de blé dur a varié de 4 863 340 à 20 017 000 q,

avec une moyenne de 13 414 780 q (Tableau I.4). Comparativement, celle de blé tendre a varié de 2 740 270 à 11 625 590 q, avec une moyenne de 7 271 314 q, pour la même période (Tableau I.4). La production totale des blés a varié de 7 603 610 à 29 648 520 q, avec une moyenne de 20 686 094 q. Cette production est loin de couvrir la demande qui est de plus en plus importante, suite au faible nombre de produits de substitution et au soutien des prix des céréales (Badrani, 2004).

Tableau I.4. Evolution de la production (q) des blés dur et tendre (MADR, 2006)

Camp/culture	BD	BT	Total
1999-2000	4 863 340	2 740 270	7 603 610
2000-2001	12 388 650	8 003 480	20 392 130
2001-2002	9 509 670	5 508 360	15 018 030
2002-2003	18 022 930	11 625 590	29 648 520
2003-2004	20 017 000	7 290 000	27 307 000
2004-2005	15 687 090	8 460 185	24 147 275
Moyenne	13 414 780	7 271 314	20 686 094

Les rendements de la céréaliculture algérienne sont très bas, comparativement à la moyenne mondiale qui est de 29 q ha⁻¹, et celles des pays voisins qui est de 20 q ha⁻¹ (Faostat, 2005). Les rendements algériens de blé dur, comme ceux du blé tendre, stagnent à une moyenne de 10 q ha⁻¹, avec de fortes variations interannuelles (Tableau I.5). La faiblesse de la production, dont les causes sont multiples, associée à une forte demande alimentaire, font que le pays se présente comme un gros importateur potentiel. En effet l'Algérie a importé sur la période 1988-1997, 2.3 millions de tonnes (MT) an⁻¹ de blé dur, soit le tiers de l'offre mondiale. L'Union Européenne est le principal fournisseur de l'Algérie (ADE, 1999). Les quantités des blés importées lors de la campagne 2005/2006 ont atteint 5.5 MT pour une facture de 510 millions de dollars US (Kellou, 2008).

Tableau I.5. Evolution des rendements (q ha⁻¹) du blé dur et du blé tendre par espèce (MADR, 2006)

campagne	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	Moyenne 95-05
BD	8,9	11,1	11,7	14,2	15,3	15	11,5
BT	9,7	11,1	9,4	14,9	10,4	15,1	10,9

I.1.2.2. DANS LE MONDE

Le blé dur occupe 8 à 10% du total des terres réservées aux blés dur et tendre, dans le monde. Le CIC (2002) estime que la superficie moyenne consacrée annuellement à la culture du blé dur est 18 millions d'hectares, pour une production annuelle moyenne de 27.5 millions de tonnes (Tableau I.6). La culture du blé dur est concentrée au Moyen-Orient, en Afrique du Nord, en Russie, aux Dakotas, au Canada, l'Inde et l'Europe méditerranéenne. Avec une production de

8.08 MT par an, moyenne de la période 1994-2007, l'Union européenne est le plus grand producteur de blé dur (Tableau I.6). Le Canada arrive au deuxième rang avec 4,6 MT par an, suivi des États-Unis et de la Turquie, avec 2.67 et 1.99 millions de tonnes métriques respectivement (Tableau I.6). Ces quatre pays fournissent à eux seuls les deux tiers de la production mondiale.

Tableau I.6. Production (MT) mondiale de blé dur (Faostat, 2007)

Producteurs	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Algeria	0.56	1.19	2.04	0.46	1.50	0.90	0.49	1.22	0.95	1.81	1.82	1.00	1.00	1.30
Morocco	2.34	0.50	2.27	0.88	1.54	0.80	0.43	1.04	1.03	1.77	2.03	0.75	1.20	1.50
Tunisia	0.44	0.47	1.62	0.80	1.10	1.14	1.10	0.94	0.37	1.31	1.40	1.15	1.10	1.60
Syria	1.95	2.35	2.45	1.90	2.60	1.00	1.10	2.40	2.30	2.30	2.10	2.10	2.10	2.50
Turkey	1.08	1.30	1.50	2.20	2.40	1.60	2.00	1.60	2.30	2.30	2.40	2.30	2.30	2.70
EU	7.16	6.17	7.59	6.70	8.72	7.20	9.07	7.53	9.52	8.34	11.86	7.33	7.66	8.30
India	1.70	1.90	1.80	1.80	1.00	1.00	1.00	1.20	1.40	0.80	1.20	1.20	1.20	1.10
Mexico	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.20	1.20	1.20	0.48	1.20
USA	2.63	2.78	3.16	2.39	3.76	2.70	2.99	2.27	2.18	2.63	2.45	2.56	2.30	2.60
Canada	4.64	4.65	4.63	4.35	6.04	4.34	5.71	2.99	3.88	4.28	4.96	4.75	4.80	4.60
Argentina	0.10	0.10	0.19	0.29	0.16	0.18	0.19	0.14	0.10	0.15	0.18	0.16	0.16	0.40
Australia	0.06	0.20	0.26	0.28	0.40	0.40	0.40	0.40	0.10	0.45	0.40	0.40	0.40	0.70
Russia	1.80	1.00	1.30	2.00	0.50	1.00	1.00	1.30	1.50	1.20	1.00	1.20	1.20	1.70
Kazakh	0.70	0.50	0.50	0.50	0.30	0.40	0.10	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	3.00
Monde	26.2	24.2	30.4	25.6	31.1	23.7	26.6	24.2	26.8	28.6	33.1	26.2	26.0	33.2

I.2. HISTORIQUE ET ORIGINES DU BLE DUR

I.2.1. HISTORIQUE DU BLE DUR

Le blé dur est une monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la famille des *Gramineae* (*Poaceae*) (Feillet, 2000). Les deux espèces les plus cultivées sont le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Selon les archéologues, la culture du blé dur est apparue entre 9000 et 7000 BC dans la région qui s'étend sur la Palestine, la Syrie, la Turquie, l'Iran et l'Iraq, dite le croissant fertile (Dubcovsky et Dvorak, 2007). Cette période coïncidait avec un épisode climatique sec, aboutissant à l'arrêt du mode de vie de 'chasseur-cueilleur', et engendrant la domestication progressive des plantes, associée à la création des premières communautés villageoises (Wadley et Martin, 1993). La culture du blé a commencé à se répandre au-delà du Croissant fertile au cours de la période néolithique, pour atteindre la mer Égée, le sous-continent indien, l'Afrique et l'Europe, selon les mouvements migratoires des peuplades d'antan (Wayne, 1995).

1.2.2. ORIGINES DU BLE DUR

1.2.2.1. ORIGINE GEOGRAPHIQUE DU BLE DUR

La domestication du blé dur a eu lieu dans le croissant fertile (Dubcovsky et Dvorak, 2007). Selon Lev-Yadun *et al.*, (2000), le creuset de la céréaliculture se situerait dans une zone localisée autour de l'amont du Tigre et de l'Euphrate, dans les territoires de la Syrie et de la Turquie. Les blés sauvages tétraploïdes sont largement répandus au Proche-Orient (Bozzini, 1988). Comparativement aux blés diploïdes, leurs grands épis et leurs gros grains, les rendaient beaucoup plus intéressants pour la domestication (Feldman, 2001).

1.2.2.2. ORIGINE GENETIQUE DU BLE DUR

La domestication et la culture des différentes espèces de blé (*Triticum* et *Aegilops*) a été un élément fondateur des premières civilisations humaines dans le croissant fertile. Ces différentes espèces de blé ont subi des transformations au fil du temps, les faisant passer de l'état de graminées sauvages à des espèces cultivées. Les différents blés ont été générés par des événements successifs de polyploïdisation intervenant après des croisements interspécifiques entre des espèces ancestrales diploïdes. Le premier événement, impliquant *Triticum monococcum* et *Aegilops speltoides*, a conduit à l'apparition du blé dur tétraploïde, *Triticum turgidum*.

Le deuxième événement de polyploïdisation a eu lieu entre le blé dur tétraploïde et *Aegilops tauschii*, donnant naissance au blé tendre, *Triticum aestivum*, de structure chromosomique hexaploïde (Chantret *et al.*, 2005). Le génome A provient de *Triticum monococcum*, alors que le donateur du génome B est l'*Aegilops speltoides* (Dvorak, 1998 ; Gitte *et al.*, 2006). *Triticum durum* a une garniture chromosomique AB (McKey, 1968), c'est une espèce allotétraploïde (AABB = $2n=4x=28$, Figure 1.1). Comme telle, chaque paire de chromosomes du génome A a une paire de chromosomes homéologues du B, à laquelle elle est étroitement apparentée (Wall *et al.*, 1971).

1.3- BIOLOGIE ET CYCLE VEGETATIF

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est un monocotylédone. C'est une graminée annuelle de hauteur moyenne (Bozzini, 1988). La plante de blé dur comporte un système racinaire, de type fasciculé. Les racines séminales sont produites par la plantule durant la levée, elles sont reliées par des racines adventives qui se forment plus tard, à partir des nœuds à la base de la plante (Clarke *et al.*, 2002). Le système aérien est constitué par les talles, tiges cylindriques, dressées, habituellement creuses et subdivisées en entre-nœuds (Clarke *et al.*, 2002). Le chaume (talle) se forme à partir de bourgeons axillaires des nœuds à la base de la tige principale, ou brin-maitre. Les feuilles se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine

de la feuille (limbe) se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux (oreillettes) (Bozzini, 1988).

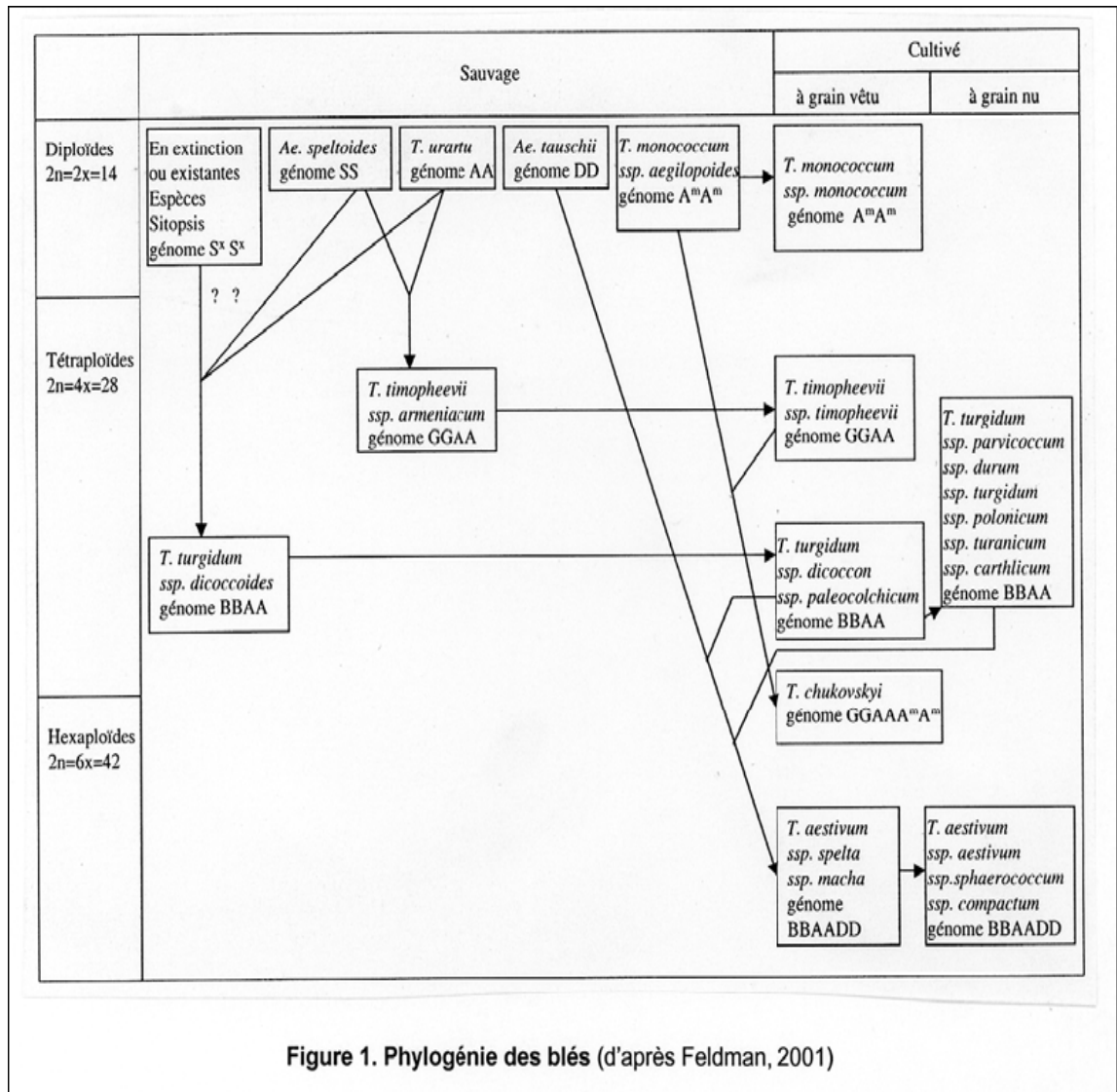


Figure 1. Phylogénie des blés (d'après Feldman, 2001)

Figure I.1. Phylogénie des blés (d'après Feldman, 2001).

L'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entre-nœuds (Bozzini, 1988). Chaque épillet compte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole. Chaque fleur parfaite est renfermée dans des structures semblables à des bractées, soit la glumelle inférieure (lemma ou lemme) et la glumelle supérieure (paléa). Chacune compte trois étamines à anthères biloculaires, ainsi qu'un pistil à deux styles à stigmates plumeux. À maturité, le grain de pollen fusiforme contient habituellement trois noyaux. Chaque fleur peut produire un fruit à une seule graine, soit le

caryopse. Chaque graine contient un large endosperme et un embryon aplati, situé à l'apex de la graine et à proximité de la base de la fleur (Bozzini, 1988).

Le cycle végétatif est subdivisé en deux grandes périodes, végétative et reproductrice (Figure I.2). C'est au cours de la période végétative que la plante produit des feuilles et des racines. Cette phase végétative s'étend de la germination à l'ébauche de l'épi (Bozzini, 1988). La germination du grain de blé commence quand il en a absorbé environ 25% de son poids d'eau. La racine principale, couverte d'une légère enveloppe ou coléorhize, apparaît, de même que le coléoptile recouvrant la gemmule, il perce la couche superficielle du sol, percé à son tour par la première feuille (Grandcourt et Prats, 1970).

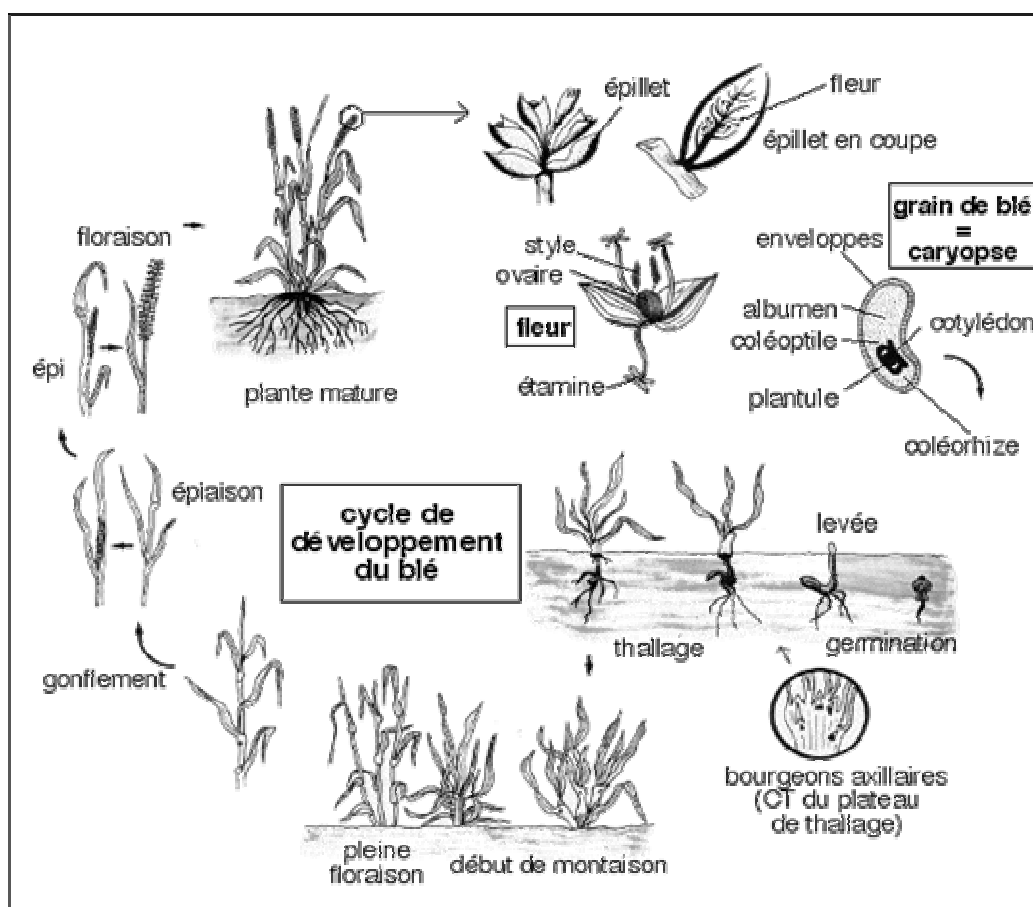


Figure I.2. Le cycle de développement du blé (Henry et De Buyser, 2000).

Le tallage est un mode de développement propre aux graminées. Il débute à la troisième feuille, lorsqu'un renflement apparaît à 2cm de la surface du sol, c'est le futur plateau de tallage. La première talle apparaît généralement à l'aisselle de la première feuille lorsque la plante est au stade 4 feuilles. Par la suite, à chaque nouvelle feuille correspond l'apparition

d'une talle. En même temps que se déroule la quatrième feuille, et que pointe la première talle, de nouvelles racines sortent de la base du plateau de tallage : ce sont les racines secondaires, les racines primaires deviennent inactives.

La période reproductrice comprend la formation et la croissance de l'épi. Elle s'étend du stade épi-1cm, montaison, au stade floraison. La montaison débute à la fin du tallage. Elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus (Grandcourt et prats, 1971). Cette phase s'achève une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle : c'est le stade gonflement (Bozzini, 1988).

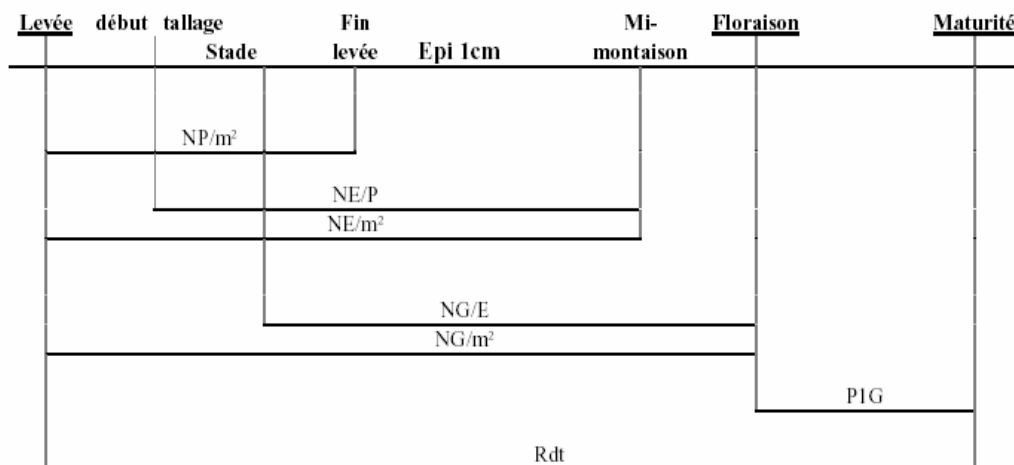
L'épiaison se caractérise par l'émission de l'épi hors de la gaine de la feuille étendard. Les épis sortis de leur gaine, fleurissent, généralement, 4 à 8 jours après l'épiaison. Le nombre de grains par épi est fixé, à ce stade (Bozzini, 1988). C'est au cours de cette période que s'achève la formation des organes floraux et s'effectue la fécondation. La floraison est caractérisée par l'apparition des étamines sur l'épi. Cette phase correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de grains par épi (Masle, 1980).

Pendant la phase de formation et de maturation du grain, il n'y a plus de croissance des feuilles et des tiges. Le produit de l'activité photosynthétique est entièrement dirigé vers le grain qui grossit, met en place ses enveloppes et accumule des éléments carbonés et azotés. Les glucides proviennent de l'activité photosynthétique des feuilles encore vertes (les dernières sorties) et constituent l'amidon du grain. Les acides aminés proviennent de la migration des réserves azotées accumulées dans les parties végétatives (feuilles, tiges, épis) et constituent les protéines du grain (Gate *et al.*, 2003). Le grain passe par trois stades consécutifs : laiteux, pâteux et grain mûr. Entre les stades laiteux et pâteux, la quantité d'eau contenue dans le grain est stable; c'est le palier hydrique, phase critique du remplissage du grain, où un dessèchement prématuré de la plante peut bloquer la migration des réserves et provoquer un " échaudage" du grain (Robert *et al.*, 1993).

I.4. L'ELABORATION DU RENDEMENT DU BLE DUR

L'élaboration du rendement implique l'enchaînement de multiples mécanismes liés à la croissance et au développement du peuplement cultivé à travers la morphogénèse et le fonctionnement des organes, en relation avec les facteurs et conditions du milieu (Combe et Picard, 1994). Le rendement est un trait complexe, qui est la résultante des caractères

impliqués directement et indirectement dans sa formation, tel que le poids du grain, le nombre de grains par épi, le nombre d'épis par unité de surface et la biomasse (Mekhlouf et Bouzerzour, 2000). Le rendement est déterminé par trois composantes principales : le nombre d'épis, de grains par épi et le poids de 1000 grains (Figure I.3). Durant la phase épi-1cm-épiaison se mettent progressivement en place les organes de stockage représentés par le nombre de grains produit par m².



Légende :

- Stade A, ou stade double ride* : début de la différenciation de l'épi sur la tige principale
- NP/m²* : Nombre de pieds par m²
- NE/P* : Nombre d'épis par pied
- NE/m²* : Nombre d'épis par m²
- NG/E* : Nombre de grains par épi
- NG/m²* : Nombre de grains par m²
- PIG* : Poids d'un grain
- Rdt* : Rendement

Figure I.3. Phases de formation des différentes composantes du rendement (Meynard et David, 1992).

La période floraison maturité correspond à l'accumulation des hydrates de carbone et de l'azote dans le grain (Gallais et Bannerot, 1992). Cette période correspond à la formation de la dernière composante constitutive du rendement qui est le poids de 1000 grains (Robert et al, 1993). En effet le rendement du blé est la résultante du fonctionnement du peuplement végétal au cours de deux phases : la formation du grain (levée floraison) et le remplissage du grain (floraison maturité physiologique du grain). Le nombre de grain réel formé est conditionné par les conditions climatiques (humidité et température) et les techniques culturales appliquées à la culture entre le semis et la floraison (Hebert, 1976).

Bahlouli *et al.*, (2008) mentionnent que, dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie, l'expression d'un rendement élevé chez le blé dur est associée positivement aux nombres d'épis et de grains par épi, le poids de 1000 grains a un effet négatif. Gallais et Bannerot (1992) rapportent aussi un effet négatif du poids de 1000 grains sur le nombre de grains

par m², ce qui indique une compétition entre grains pour les photo-assimilats produits. Moragues *et al.*, (2006), comparent la formation du rendement chez les génotypes de blé dur du sud et du nord de la méditerranée. Ils notent que le rendement des génotypes du nord était corrélé à la variation du poids de 1000 grains, alors le nombre d'épis par m² était la composante déterminante d'un haut rendement chez les génotypes du sud. Ces résultats suggèrent que le premier critère de choix d'un génotype est sa capacité de tallage-épis, suivi de la fertilité des épis et en dernier lieu le poids de 1000 grains. Entre deux génotypes qui ont les mêmes nombres d'épis et de grains par épi, le choix portera sur celui qui a le meilleur poids de 1000 grains. Moragues *et al.*, (2006) suggèrent que le nombre d'épis par m² soit un critère de sélection dans les zones sèches du sud de la méditerranée.

La formation des composantes du rendement et donc du rendement grains, est sous la dépendance de la durée du cycle de développement. Ben Abdallah et Ben Salem (1992) déclarent que l'adaptation aux zones arides semble être associée à une durée de la phase levée-épiation plus courte. En effet une durée moins longue de cette phase permettrait à la variété d'échapper aux sécheresses tardives intervenant dans ces zones. Selon Fussel *et al.*, (1991), des augmentations significatives des productions céréalières dans les zones arides seraient possibles moyennant une sélection pour une floraison précoce. Abbassenne *et al.*, (1998) mentionnent que le rendement grains est la résultante de la durée de la phase de remplissage, de la vitesse de remplissage et de la capacité de translocation des assimilats stockés dans la tige. Une longue durée de remplissage est souvent indicatrice d'une activité photosynthétique optimale, par contre une vitesse de remplissage élevée est indicatrice des effets des stress hydriques et thermiques (Sofield *et al.*, 1977).

Au cours de la phase de remplissage, la cinétique d'accumulation de la matière sèche du grain est sous la dépendance de deux sources d'assimilats. Le produit de la photosynthèse de la feuille étendard et les réserves produites lors de la pré- anthèse et qui sont stockées dans les tiges, puis transférées vers le grain (Bahlouli *et al.*, 2008). Sous stress abiotiques, les génotypes qui possèdent la capacité de transférer une partie des réserves stockées dans le col de l'épi vers le grain, font un meilleur rendement (Ehdaie *et al.*, 2006). La sélection pour la capacité génotypique de stockage des glucides dans le col de l'épi et leur utilisation en post- anthèse pour la finition ou le remplissage du grain est suggérée.

La biomasse aérienne contribue aussi fortement à l'élaboration du rendement. Moragues *et al.*, (2006) rapportent que les variétés locales du nord et du sud de la méditerranée divergent pour la biomasse aérienne et sa répartition. Les variétés du nord produisent plus de talles herbacées, conduisant à une biomasse aérienne et un indice foliaire élevés au stade épiation. Les variétés du sud, mieux adaptés aux environnements secs, investissent plus de biomasse dans le maître-brin. Ceci conduit à une meilleure contribution des réserves produites au cours de la

pré-anthèse, au rendement. Cette contribution des réserves de la tige au rendement est évaluée à 40 et 90% chez les géotypes du nord et du sud (Moragues *et al.*, 2006).

Ces résultats montrent que le stockage et le transfert des assimilats est une caractéristique adaptative aux environnements méditerranéens. Le poids de l'épi au stade épiaison peut être un bon indicateur du rendement potentiel à espérer lorsque le remplissage du grain se fait dans des conditions de croissance, assez favorables (Meynard, 1987). Mekhlouf et Bouzerzour (2000) indiquent que le rendement en grains de blé dur, conduit en zone semi-aride, est fortement tributaire de la biomasse et du nombre d'épis. Ils mettent en évidence aussi, que le nombre d'épis et la biomasse aérienne sont les facteurs limitant l'obtention de bons rendements.

Ben Abdallah et Ben Salem (1992) mentionnent que la relation entre le rendement et les caractéristiques du couvert végétal varie en fonction de l'année et du site de culture. Le rendement est corrélé positivement au nombre d'épis et à la hauteur du chaume, en année défavorable. Les variétés à paille haute ont une meilleure adaptation au déficit hydrique.

I.5. LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES A LA PRODUCTION DU BLE DUR ET L'ADAPTATION DE LA PLANTE

I.5.1. LES HAUTES TEMPERATURES

Le blé dur est cultivé, dans le bassin méditerranéen, sous conditions environnementales stressantes et variables (Edmeades *et al.*, 1989). Le climat méditerranéen se caractérise par deux saisons qui se succèdent, l'une froide (octobre-février), brève, et relativement pluvieuse, et l'autre longue (mars-septembre), chaude et sèche. Les stress hydrique et thermique (gel et hautes températures) affectent ainsi le développement de la céréale tout au long de son cycle de développement (Bouzerzour et Monneveux, 1992). Ces conditions sont les plus défavorables à l'expression du potentiel génétique de la culture (Jones et Qualset, 1984). En effet, les températures varient considérablement dans le bassin méditerranéen, en fonction de la latitude et de l'éloignement à la mer. L'effet de la continentalité est très marqué (Baldy, 1992)

L'exposition de la culture aux hautes températures réduit l'espérance de rendement et de la qualité du grain (Chaker et Brinis, 2005). Le stade végétatif de la méiose est particulièrement sensible aux températures élevées. Le nombre de grains par épi est affecté. Les températures élevées réduisent la taille et le poids des organes, diminuant ainsi la taille des puits (Gate, 1995). L'activité physiologique du blé dur est maximale à 25°C. Des températures de 28 à 32°C sont considérées comme stressantes. Au-delà de 32°C, on peut observer des dommages irréversibles pouvant aller jusqu'à la destruction de la plante (Wardlaw et Moncur, 1995; Belhassen *et al.*, 1995).

Le stress thermique a un effet néfaste sur l'activité membranaire. Les lésions des parois membranaires, due à la chaleur, est mesurée par la fuite de l'électrolyte (Bajji *et al.*, 2002). Les

valeurs de l'intégrité membranaire inférieures à 40% sont jugées comme indicatrices de la résistance génotypique au stress calorique (Blum, 1988). Les hautes affectent le développement de la plante en réduisant la surface foliaire active. En effet sous hautes températures, la chlorophylle se dégrade, l'activité de la photosynthèse est réduite, par suite du dessèchement du couvert végétal (Gibson et Paulsen, 1999 ; Yang *et al.*, 2001). La capacité génotypique à maintenir le limbe foliaire vert, sous haute température, est indicatrice de la résistance au stress thermique.

1.5.2. LES BASSES TEMPERATURES

L'altitude et un climat de type méditerranéen imposent un hiver très froid et pluvieux, Le froid hivernal limite la croissance au moment où l'eau est disponible et allonge le cycle de la plante pour l'exposer à la sécheresse du début de l'été (Chenaffi *et al.*, 2006). Les dégâts de gel tardif sont très fréquents sur céréales, rendant l'adoption des variétés précoces trop risquée (Bouzerzour et Benmahammed, 1994 ; Chaker et Brinis, 2005 ; Prasil *et al.*, 2007). L'adoption de la stratégie de l'esquive comme moyen pour échapper aux stress thermique et hydrique de fin de cycle, est peu opérante dans le cas où les génotypes précoces sélectionnés ne sont pas génétiquement résistant au froid (Mekhlouf *et al.*, 2006^a).

Prasil *et al.*, (2007) mentionnent que le froid brutal, dit choc thermique, provoque une rigidification des lipides membranaires, induisant la fracture membranaire sous contraintes mécaniques. Il s'en suit une fuite de l'électrolyte cellulaire. Les gelées tardives provoquent l'avortement des fleurs, réduisant à néant l'espérance de rendement (Bouzerzour et Benmahammed, 1994 ; Mekhlouf *et al.*, 2006^a ; Prasil *et al.*, 2007). La viabilité du pollen est affectée à des températures inférieures à 4°C (Gate et Crimaud, 1989). La résistance génotypique au froid s'explique, en partie, par l'aptitude de la membrane à maintenir l'activité cellulaire (Mekhlouf *et al.*, 2006^a ; Prasil *et al.*, 2007).

1.5.3. LE STRESS HYDRIQUE

Dans la région méditerranéenne, le stress hydrique est une des principales contraintes de la production (Simane *et al.*, 1993). La notion de stress hydrique a toujours été assimilée à la notion de sécheresse. La sécheresse définit l'état de pénurie hydrique dont souffre la culture (Morizet, 1984). L'effet de stress hydrique sur la croissance et la phénologie du blé dépend du stage végétatif de l'avènement du stress, de la durée, de l'intensité du stress et de la sensibilité du génotype stressé (El Hafid *et al.*, 1998). Le déficit hydrique, après floraison, lorsqu'il est combiné aux fortes températures, entraîne une diminution du poids moyen du grain, suite à l'altération de la vitesse et de la durée de remplissage, provoquant ainsi l'échaudage (Benbelkacem et Kellou, 2001).

La culture de blé dur exige un total pluviométrique au dessus de 450 mm, pour une croissance sans stress hydrique. Une bonne répartition de cette pluviométrie, tout le long du cycle, serait de 350 mm du semis au stade gonflement et 150 mm du stade gonflement à la maturité physiologique (Chenaffi *et al.*, 2006). Le déficit hydrique, de nature intermittente, est une des principales causes des pertes de rendement du blé dur, pouvant aller jusqu'au sinistre total. Il affecte toutes les composantes du rendement, et en particulier le nombre de grains par épi et le poids moyen du grain (Chenaffi *et al.*, 2006).

Selon Debaeke *et al.*, (1996), le déficit hydrique précoce, au cours de la montaison, réduit le nombre d'épis et le nombre de grains par épi. Le poids moyen du grain, quant à lui, est affecté par le déficit hydrique de la post-floraison, qui accélère la sénescence foliaire et réduit de la durée de remplissage. Abbassenne *et al.*, (1998) mentionnent que, sous conditions pluviale des hautes plaines orientales, la durée de remplissage et par conséquent le poids du grain atteignent rarement leurs valeurs maximales, induisant une baisse du rendement. Le stress hydrique active la dégradation de la chlorophylle, et induit la fermeture des stomates, réduisant l'entrée du CO₂. La réduction de la photosynthèse est liée à la réduction de l'activité photochimique du photosystème II (PSII) (Ykhlef, 2002).

1.5.4. MECANISMES D'ADAPTATION DE LA PLANTE AUX STRESS ABIOTIQUES

La sécheresse est l'un des principaux facteurs limitant les rendements. Le manque d'eau, souvent associé à des stress abiotiques (gels, hautes températures, salinité) (Mekliche *et al.*, 2003). La résistance à la sécheresse a été associée à plusieurs caractéristiques d'ordre phénologique, morphologique, physiologique et biochimique reflétant différents types d'adaptation (esquive, évitement et tolérance) (Turner, 1979; Nachit *et Ketata*, 1986). Toute espèce possède donc un éventail de caractères dits adaptatifs car ils contribuent au maintien de l'équilibre entre les besoins des organismes et les conditions du milieu (Chaker *et Brinis*, 2005). (Selon Rejeb *et Ben Salem*, 1993) les variétés de céréales résistantes au déficit hydrique se caractérisent par une stratégie regroupant en même temps, un ensemble des mécanismes d'adaptation.

1.5.4.1. ADAPTATION PHENOLOGIQUE

La précocité au stade épiaison est une composante importante d'esquive des stress de fin de cycle chez le blé dur. L'adoption de variétés à cycle relativement court est nécessaire dans les régions arides à semi-arides compte tenu de la distribution temporelle des précipitations (Mekhlouf *et al.*, 2006^a). L'esquive est une des stratégies d'amélioration variétale qui consiste à raccourcir le cycle d'une variété afin de lui permettre de parvenir jusqu'à la maturité durant une période relativement moins stressante. On réduit alors le risque d'une forte perte de rendement,

en échange d'une réduction du potentiel, stratégie dite conservatrice (Monneveux, 1991 ; Amigues *et al.*, 2006).

La mise en place d'une stratégie d'esquive, selon Levitt (1980), consiste à inscrire le cycle de la culture à l'intérieur d'une période au cours de laquelle les potentiels initiaux (sol) et finaux (atmosphère) du continuum sol-plante-atmosphère sont à l'optimum ; et permettent d'éviter une baisse du potentiel hydrique de la plante. Ceci est réalisé soit par la voie des techniques culturales (choix de la date de semis), ou bien par la voie génétique (sélection de variétés précoces). Fischer et Maurer (1978) mentionnent que chaque jour de précocité confère un gain de rendement compris entre 30 et 85 kg/ha. Toutefois la précocité d'épiaison s'accompagne d'une réduction du potentiel de production, par diminution des sites de remplissage. De plus les variétés précoces ont de faibles potentiels en année favorable, et courent le risque d'être pénalisée par le gel tardif (Mekhlouf *et al.*, 2006^b).

1.5.4.2. Adaptation morphologique

La stratégie de l'évitement permet à la plante de maintenir un potentiel hydrique élevé. L'évitement consiste à empêcher que la plante, soumise à des conditions hydriques défavorables, de subir un stress hydrique sévère. Ceci est obtenu par une réduction de la transpiration s'effectuant par la cuticule et les stomates incomplètement fermés (Belhassen *et al.*, 1995). Ce type d'adaptation réduit du risque de perte de rendement, mais il a un coût en termes de rendement maximum (Amigues *et al.*, 2006). Slama *et al.*, (2005) mentionnent que l'évitement du déficit hydrique peut se traduire par des modifications morphologiques qui augmentent l'absorption d'eau. Le développement du système racinaire est un facteur important de la résistance au stress hydrique (Passioura, 2004).

Les cultivars de blé à système racinaire extensif exploitent un grand volume de sol, absorbent une grande quantité d'eau, donnant un haut rendement. Les caractéristiques du système racinaire ne jouent leur rôle dans la résistance à la sécheresse que si les racines sont bien développées, avant l'avènement du déficit hydrique (Rebetzke *et al.*, 2007). La réduction de la surface foliaire et du nombre de talles tendent à minimiser les pertes en eau en réduisant la transpiration (Slama *et al.*, 2005).

L'enroulement du limbe foliaire diminue de la surface foliaire réceptrice de l'énergie lumineuse, et permet à la plante de réduire sa transpiration. Toutefois, ce phénomène s'accompagne aussi d'une réduction de la photosynthèse, il n'a donc d'intérêt qu'en présence de déficit hydrique sévère (Slama *et al.*, 2005). La glaucescence, la pilosité des feuilles, la couleur des feuilles ou le ratio des chlorophylles a et b et la température de la feuille sont des caractéristiques indicatrices de la résistance aux stress abiotiques. Les barbes améliorent le

rendement en conditions de sécheresse par augmentation de la surface photosynthétique de l'épi (Slama *et al.*, 2005).

I.5.4.3 ADAPTATION PHYSIOLOGIQUE

La stratégie de la tolérance est mise en œuvre par les plantes grâce à l'abaissement du potentiel hydrique qui maintient la turgescence (Sorrells *et al.*, 2000). Les mécanismes intervenant dans la tolérance assurent l'hydratation cellulaire et diminuent la perte en eau en maintenant un statut hydrique favorable au développement foliaire. La réduction des pertes en eau par la fermeture stomatique est un moyen d'adaptation des plantes au stress. Cette diminution de la transpiration engendre une réduction de la photosynthèse. Les génotypes qui ont la capacité photosynthétique intrinsèque la moins affectée par le stress présentent une efficacité de l'utilisation de l'eau élevée et une plus grande capacité de survie (Araus *et al.*, 2002).

L'adaptation à des milieux aux régimes hydrique et thermique variables est en partie associée à l'ajustement osmotique (Richards *et al.*, 1997). L'ajustement osmotique constitue le processus majeur permettant à la cellule de maintenir sa turgescence sous contrainte hydrique (Zhang *et al.*, 1999). L'ajustement osmotique est réalisé grâce à une accumulation des solutés (principalement vacuolaire) conduisant à un maintien du potentiel de turgescence. Les solutés responsables de la régulation osmotique sont essentiellement des acides organiques, des acides aminés (proline, glycine-bétaine), des sucres solubles et certains constituants inorganiques (Richards *et al.*, 1997).

L'ABA joue un rôle de médiateur dans les réponses au stress hydrique, principalement dans les mouvements stomatiques. Des travaux effectués au niveau moléculaire sur les effets de l'ABA et du stress hydrique confortent l'hypothèse selon laquelle cette hormone joue un rôle clé dans la réponse au stress hydrique (Cattivelli *et al.*, 1995). L'ABA intervient dans la stimulation de la croissance racinaire, la réduction de la surface foliaire, la diminution de la radiation absorbée, l'abscission des feuilles et la fermeture stomatique (Cattivelli *et al.*, 1995).

Ces mécanismes ont des effets bénéfiques sur le plan de l'économie en eau, mais accélèrent la sénescence et inhibent la photosynthèse et la croissance, ce qui contribue à réduire le rendement (EL Jaafari *et al.*, 1995). L'identification de génotypes capables de maintenir une photosynthèse active sous contrainte hydrique repose sur une réduction des mécanismes contraignants induits par l'acide abscissique (ABA).

L'efficacité d'utilisation de l'eau, définie comme la production de la biomasse par unité d'eau consommée, est un important caractère de tolérance à la sécheresse (Richards *et al.*, 2002). L'efficacité de l'utilisation de l'eau dépend toutefois non seulement des caractéristiques

biologiques propres à l'espèce, mais aussi de la durée de la saison de culture, de la fertilisation, du rapport partie racinaire sur partie aérienne et de facteurs climatiques tels que le déficit de saturation de l'air (Angus et Herwaarden, 2001).

L'efficacité d'utilisation de l'eau est un indicateur de l'adaptation des plantes à la sécheresse. Pour les plantes C3, les processus foliaires qui déterminent l'efficacité d'utilisation de l'eau, sont également ceux qui contrôlent la discrimination isotopique du carbone (Δ), lors de l'assimilation photosynthétique du CO₂. La mesure de Δ est donc une mesure indirecte de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Araus *et al.*, 2003). Les plantes fixant le plus de carbone par unité d'eau transpirée ont une concentration interne de CO₂ faible, une valeur de Δ faible et une composition isotopique riche en ¹³C (Δ peu négative) (Merah *et al.*, 1999). L'altération de l'état physiologique des plantes, causée par le stress, se reflète rapidement au niveau des signaux lumineux et thermique émis par les feuilles. Des mesures *in vivo*, basées sur la fluorescence de la chlorophylle sont utilisées pour estimer la tolérance du stress hydrique, thermique et lumineux (Havaux *et al.*, 1988).

1.6. L'AMELIORATION GENETIQUE DE L'ADAPTATION AUX STRESS ABIOTIQUES

1.6.1. LA METHODE CLASSIQUE

L'amélioration génétique des plantes représente les activités qui tendent à ajuster génétiquement les plantes pour les rendre aptes aux besoins de l'homme. Cette activité cherche à rendre les plantes mieux adaptées aux milieux physique, biologique et économique (Gallais, 1999). Parmi les objectifs auxquels l'amélioration génétique des plantes répond, figure celui d'adapter les variétés à la variabilité spatio-temporelle des conditions environnementales, pour quelles produisent plus (Doré et Varoquaux, 2006). Le but ultime d'un programme de sélection est la production de variétés ayant un rendement élevé et stable (Hadj Youcef Taïbi *et al.*, 2003).

L'amélioration du rendement passe par la caractérisation du germplasm disponible. En effet, l'identification des caractères morpho-physiologiques conduit à définir l'idéotype adéquat pour un milieu donné (Passioura, 2004). Une diversité génétique large est à la base de la plupart des processus d'amélioration des plantes. Elle doit être disponible pour améliorer le rendement potentiel. Les espèces sauvages apparentées aux blés constituent un important réservoir de gènes utilisables dans l'amélioration des formes cultivées. Les transferts les plus faciles sont ceux qui sont réalisés à partir d'espèces ayant au moins un génome homologue à celui du blé (El Jaafari *et al.*, 2000).

L'adaptation du blé aux stress peut être améliorée en introduisant chez des variétés productives des caractères morpho-physiologiques de résistance. La variabilité génétique de ces

caractères au sein du blé est souvent limitée. Les croisements interspécifiques et l'introgession de caractères favorables, présents chez les espèces primitives, constituent une voie intéressante de recherche. L'utilisation des espèces primitives tétraploïdes (génomes AB et AG, *Triticum dicoccum*, *Triticum polonicum* et *Triticum carthlicum*) apparaît particulièrement prometteuse pour l'amélioration génétique de la tolérance au stress chez le blé dur (El Jaafari *et al.*, 2000). Certains croisements réalisés avec des blés primitifs ont donné des résultats intéressants en zones sèches, tels que les croisements entre Zenati x *Triticum polonicum*, Sébou x *Triticum polonicum*, Sahel x *Triticum dicoccum*) (El Jaafari *et al.*, 2000).

La sélection peut cibler l'adaptation spécifique ou au contraire l'adaptation générale à des conditions de milieux variés (Annichiarico *et al.*, 2005). L'adaptation spécifique pourra être obtenue pour des stress particuliers, observés en l'occurrence dans des milieux particuliers. L'adaptation générale, ou adaptabilité, est conférée par une adaptation simultanée à un ensemble de contraintes du milieu, tels que le froid, le manque d'eau, le manque ou l'excès d'azote et les maladies (Brancourt-Hulmel, 2000). Cooper et Fox (1996) préconisent la sélection pour l'adaptation spécifique en présence d'interaction significative et répétable, et la sélection pour l'adaptation générale, en absence d'interaction de nature qualitative.

1.6.2. LA SELECTION ASSISTEE PAR LES MARQUEURS MOLECULAIRES (MAS)

L'utilisation des marqueurs moléculaires est particulièrement intéressante quand l'évaluation est faite pour des caractères à hérédité complexe, sensibles à la variation environnementale comme le rendement et la résistance aux stress (Nachit *et al.*, 2000). L'utilisation des marqueurs est très utile pour les caractères difficilement mesurables, tels que le système racinaire et l'ajustement osmotique (El Jaafari *et al.*, 2000). Des cartes génétiques avec la localisation des marqueurs et des QTL de résistance aux stress chez le blé dur sont rapportées par divers auteurs (Quarrie *et al.*, 1995 ; Yang *et al.*, 2007). Ainsi des marqueurs et des QTL associés à la biomasse racinaire ont été cartographiés sur les chromosomes 4Bp et 5Ap et pour la discrimination isotopique sur les chromosomes 1Bq et 6Bq (Quarrie *et al.*, 1999).

Yang *et al.*, (2007) ont cartographié les marqueurs moléculaires et les QTL contrôlant la capacité de stockage et de translocation des sucres solubles stockés dans le col de l'épi (Figure 1.4). Ainsi des marqueurs et des QTL associés au rendement et à des caractères de résistance aux stress deviennent de plus en plus disponibles chez les blés et le riz. Ces derniers pourraient servir à assister l'introgession de caractères importants en matière de résistance au stress (El Jaafari *et al.*, 2000).

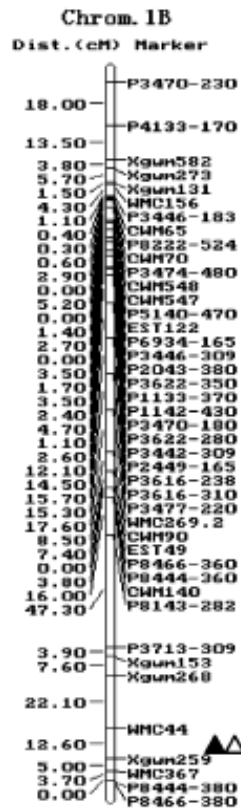


Figure I.4. Localisation des marqueurs moléculaires et des QTL des sucres solubles sur le chromosome 1B du blé (Yang *et al.*, 2007)

I.6.3. L'INTERACTION GÉNOTYPE- ENVIRONNEMENT ET LA STABILITÉ DES RENDEMENTS

Les différences de productivité, qui correspondent à un effet génétique, sont facilement mises en évidence et mesurées dans un milieu donné. Mais selon les milieux, ces différences sont d'ampleurs variables. Ainsi certaines variétés ont des performances élevées dans certains milieux, faibles dans d'autres, alors que d'autres variétés ont un comportement inverse (Kirigwi *et al.*, 2004). Le classement des rendements des différentes variétés s'en trouve ainsi modifié selon les lieux tests. Cette variabilité de la réponse des génotypes à la variation des milieux correspond à ce qu'on appelle l'interaction génotype x environnement (Figure I.5).

Elle est mesurable au même titre que l'effet génotype et l'effet environnement. Du point de vue du sélectionneur, un milieu peut être défini par les coordonnées de l'espace, au sens large, dans lequel est placée la plante. Il peut s'agir du lieu, de l'année, du complexe pédo-climatique de culture (Gallais, 1990). Un génotype peut être défini comme un arrangement de gènes (dans

un cytoplasme particulier), et un phénotype sera la valeur prise par cet arrangement pour un caractère donné (et donc un type de mesure) et dans un milieu donné (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997).

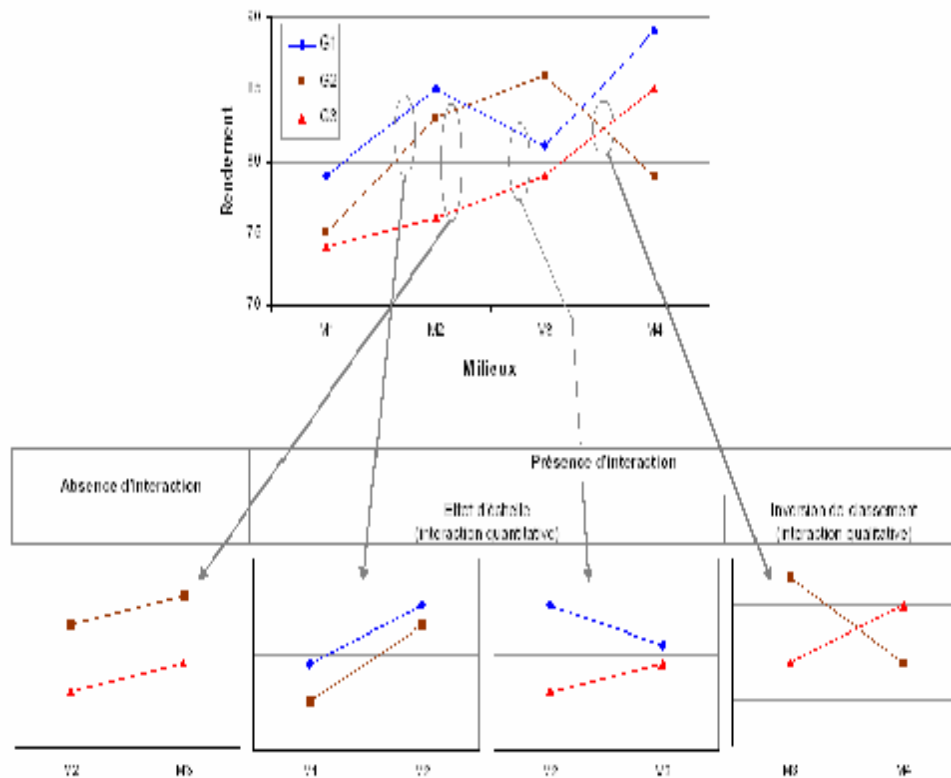


Figure 1.5. Mise en évidence d'une interaction x milieux du rendement dans un réseau expérimental comportant 3 génotypes dans 4 milieux (Foucteau, 2001).

Il est important de connaître les milieux pour comprendre le comportement des génotypes évalués dans un réseau, pour expliquer et valoriser les différences de comportement (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997). Ainsi, en matière de caractérisation des milieux, la question importante est de déterminer non seulement si des contraintes du milieu sont apparues mais aussi si elles ont eu un impact sur le comportement des génotypes. Cela permet de repérer avec plus de pertinence les variables du milieu qui serviront à mesurer l'adaptation des génotypes (Vargas *et al.*, 1999). Brancourt-Hulmel et Lecomte (2003) mentionnent que l'interaction génotype x environnement s'explique mieux en prenant en considération les variables éco-physiologiques et environnementales. Ainsi les caractéristiques du sol, la température mensuelle, et la pluviométrie sont utiles (Vargas *et al.*, 1999).

L'existence d'interaction génotype x milieu signifie que selon le milieu, l'ensemble des gènes d'un génotype ne s'exprime pas de la même façon. Certains génotypes sont plus stables que d'autres, leurs performances varient moins selon le milieu (Bouzerzour et Djekoun, 1996). Il est couramment établi que l'interaction génotype x année x lieu est plus importante que l'interaction génotype x année. Cette dernière est plus importante que l'interaction génotype x lieu. Toutefois, pour raccourcir la durée du processus de sélection, le sélectionneur préfère augmenter de façon importante le nombre de milieux pour compenser l'effet année (Tablot, 1997).

L'adaptabilité au milieu est un phénomène essentiel chez les plantes qui ne peuvent se déplacer vers un environnement plus favorable, elle est aussi essentielle pour l'agronome en raison des relations entre conditions de culture et expression des potentialités génétiques (Combe et Picard, 1994). Le plus grand objectif recherché par le sélectionneur c'est des génotypes présentant une bonne stabilité, parmi la multitude de termes employés, les termes de stabilité phénotypique, de stabilité du rendement et d'adaptation ou d'adaptabilité avec des sens parfois différents (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997).

La stabilité phénotypique caractérise l'importance des fluctuations du rendement observées pour un même génotype cultivé dans différents milieux. Plus un génotype est stable, moindre est sa variation phénotypique. Les fluctuations observées dépendent des effets du milieu d'une part et de l'existence d'effets d'interaction génotype-milieu d'autre part. C'est-à-dire que les génotypes ne réagissent pas tous de la même façon d'un milieu à un autre (Romagosa et Fox, 1993). L'adaptation d'un génotype au milieu peut avoir deux origines: la présence de gènes d'adaptation, ou plus exactement de gènes qui contrôlent les caractères jouant un rôle dans l'adaptation, et le pouvoir tampon lié à la structure génétique de certains génotypes (Romagosa et Fox, 1993).

L'expérimentation est un moyen puissant pour acquérir la connaissance des variétés et de leur réponse au milieu. Elle permet de quantifier avec précision les performances obtenues, dans une diversité de conditions de production (Lecomte, 2005). L'expérimentation variétale consiste à comparer dans un même champ d'essai les résultats obtenus par différentes variétés. L'expérimentation est répétée dans des milieux diversifiés pour évaluer les comportements variétaux vis-à-vis de la diversité des contraintes environnementales. L'ensemble des essais constitue un réseau d'expérimentation variétale (Prost *et al.*, 2007). Dans les zones écologiquement favorables ou à faibles contraintes environnementales, le choix du rendement potentiel comme objectif de sélection s'avère relativement justifié dans la mesure où les conditions de milieu permettent l'expression de cette aptitude génétique (Demarly et Chalbi, 1991).

De nombreux travaux aboutissent à la conclusion que la sélection pour le rendement est peu efficace en conditions environnementales défavorables (Ceccarelli *et al.*, 1998 ; Kirigwi *et al.*, 2004). La variance génétique et l'héritabilité de ce caractère sont, sous ces conditions, trop faibles. Plusieurs études ont montré que l'amélioration d'un caractère complexe, tel que le rendement, peut être approchée indirectement par l'intermédiaire des caractères qui lui sont fortement liés et moins influencés par l'environnement (Yan *et al.*, 2000). L'incapacité du rendement à être utilisé comme seul critère en conditions environnementales difficiles, conduit à définir une stratégie de sélection permettant l'identification et la validation des caractères de la résistance.

Le rendement est le produit de plusieurs caractères dit composantes du rendement, la connaissance des liaisons qui existent entre ces caractères et le modèle d'élaboration du rendement permettent de mieux identifier le ou les traits à utiliser comme critères de sélection. Ces informations permettent d'orienter le processus de sélection de manière à promouvoir les traits capables d'engendrer une amélioration du rendement (Mekhlouf et Bouzerzour, 2000).

En milieu semi-aride, la stabilité du rendement est bien plus importante que le rendement potentiel, car les conditions climatiques et la technologie mise en œuvre pour la production sont très rarement favorables à la culture. On doit donc attacher plus d'importance à la régularité du rendement (Boubaker, 1995). La stratégie de sélection fondée sur des rendements moyens à travers des conditions environnementales différentes est efficace (Finlay et Wilkinson, 1963 ; Eberhart et Russell, 1966 ; Rosielle et Hamblin, 1981). Cette approche limite les effets des risques et augmente les profits des agriculteurs (Sassi et Boubaker, 2006).

Les scientifiques ont défini de diverses manières la stabilité, comme ils ont utilisé différentes méthodes pour l'évaluer. Yan et Hunt (2001) définissent la stabilité comme une mesure de la variation des valeurs du caractère d'intérêt entre le potentiel et la valeur observée des génotypes évalués dans plusieurs environnements. Plusieurs méthodes sont proposées pour déterminer la stabilité d'une variété. Ces méthodes ont été revues et discutées par Lin *et al.*, (1986).

Lin *et al.*, (1986) classent les méthodes utilisées pour déterminer la stabilité en trois concepts, dits type 1, 2 et 3. La stabilité de type 1 mesure les écarts de l'effet moyen du génotype. Selon ce concept, un génotype est dit stable si sa variance, mesurée sur l'ensemble des environnements où il a été évalué, est nulle (stabilité statique). Un tel génotype performe de manière régulière quelque soit l'environnement. Il est insensible à la variation des milieux. La stabilité de type 2 est basée sur l'interaction génotype x environnement (dynamique). Un génotype est stable dans ce cas, si sa réponse à la variation environnementale est parallèle à la réponse moyenne de l'ensemble des génotypes avec lesquels il est évalué. Un génotype qui a un coefficient de régression égale à l'unité est dit stable. La stabilité de type 3 est estimée à partir

de la résiduelle de la régression (S^2_{di}), et dans ce sens, un génotype est stable si sa résiduelle de la régression est nulle.

La première méthode proposée pour estimer la stabilité a été la régression conjointe (Finlay et Wilkinson, 1963 ; Eberhart et Russell, 1966). Finlay et Wilkinson (1963) groupent les variétés en stables et instables, en fonction des valeurs prises par le coefficient de régression ($b < 1$, $b = 1$ et $b > 1$). Eberhart et Russell (1966) proposent la résiduelle de la régression comme moyen de mesurer la stabilité. Plus faible est la résiduelle, plus stable est le génotype en question. Wricke (1962) propose l'éco valence comme mesure de la stabilité phénotypique.

L'éco valence mesure la contribution du génotype à l'interaction GxE. Plus cette contribution est élevée, moins stable est le génotype considéré. L'utilisation de ces méthodes se heurte au fait que la notion de potentiel de performance n'est pas souvent intégrée dans la mesure de la stabilité. C'est-à-dire que la mesure de la stabilité n'est pas pondérée par la performance potentielle du génotype. En effet, le sélectionneur cherche toujours à éviter les génotypes aux faibles performances, pour faire un progrès génétique quelconque.

En plus, il doit développer des génotypes qui sont moins, risqués pour une agriculture de subsistance, donc il doit développer des génotypes aux performances stables, autant que possible. Le plus souvent, la performance est négativement liée à la stabilité. Le modèle AMMI présente l'avantage de pouvoir prédire le comportement futur des génotypes sur de nouveaux environnements (Zobel et al., 1988).

L'analyse AMMI utilise l'analyse de la variance classique pour les effets moyens, suivie d'une analyse en composantes principales de l'interaction. Cette méthode permet de séparer les effets génotypiques du bruit de fond, due à l'erreur. En effet cette analyse subdivise les degrés de liberté des traitements en deux parties, l'une relevant du modèle et l'autre relevant de la résiduelle. Le modèle recouvre le comportement des génotypes (pattern), alors que la résiduelle absorbe le bruit ou erreur (Zobel et al., 1988). Ceci permet d'ajuster les moyennes génotypiques et d'avoir des estimations plus précises.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

II.1. ETUDE DU COMPORTEMENT VARIETAL

II.1.1. MISE EN PLACE DE L'EXPERIMENTATION

L'expérimentation a été mise en place à la Station Expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif au cours de la campagne 2008/09 (Figure II.1). Les génotypes de blé dur (*Triticum durum*. Desf) étudiés ont été semés le 24 du mois de novembre 2008 sur des parcelles élémentaires de six rangs de 5 m de long avec un espace inter-rangs de 20 cm, soit une superficie parcellaire de 6 m² dans un dispositif à randomisation complètement aléatoire avec trois répétitions. Le précédent cultural est une légumineuse alimentaire (pois chiche); les techniques culturales appliquées sur ce site sont un labour profond au mois de septembre, avec une charrue à soc réversible, suivi de deux passages au cover-crop, pour reprendre le labour et détruire les adventices installées. Au mois de novembre, l'engrais phosphaté (super 46%) est épandu à raison de 100 kg ha⁻¹. Cette opération est suivie par un cultivateur et une barre désherbeuse pour niveler le sol, après quoi l'opération de semis commence. Au stade tallage (mois de mars), l'engrais azoté est apporté à raison de 100 kg ha⁻¹ sous forme d'urée à 35%. Le désherbage chimique est effectué, juste après l'apport de l'engrais azoté, avec le GrandStar [*Methyl triberunon*] à raison de 12 g ha⁻¹. Le matériel végétal est constitué essentiellement de lignées sélectionnées par la Station ITGC de Sétif, qui sont Mrb₅, Mrb₃(Jori_{C69}/Hau), Korifla (DS₁₅/Geir), Gta's' (Crane/4/polonicumPI₁₈₅₃₀₉// *Triticum Glut enano*/2*/Tehuacan₆₀/3/Grulla), Vitron synonyme Yavaro's (Turkey₇₇/3/Jori/ Anhinga//Flamingo), Ofanto (Appulo/Valnova), Boussalam (Heider/Martes//Huevos de Oro), Waha (Plc/Ruff//Gta's') et Mohammed Ben Bachir (sélection généalogique d'une population locale de la région de Ain Roua).



Figure II.1. Vue du dispositif expérimental de l'essai mis en place sur le site de recherche de la station de L'ITGC de Sétif au cours de la campagne 2008/2009.

II.1.2. Suivi et notations

L'analyse du comportement des géotypes étudiés est basée sur les mesures des variables suivantes qui ont été déterminées au cours du cycle végétatif.

II.1.2.1. LA DUREE DES PHASES DE DEVELOPPEMENT

La durée des phases levée -épiaison et épiaison- maturité physiologique a été déterminée en nombre de jours calendaires. La maturité physiologique a été estimée comme étant la date calendaire où le poids de 1000 grains atteint son maximum (Simmons *et al.*, 1995).

II.1.2.2. LA MATIERE SECHE ACCUMULEE AUX STADES EPIAISON ET MATURITE

La matière sèche totale et sa répartition entre la tige et l'épi sont mesurées aux stades épiaison et à maturité complète. La végétation échantillonnée est fauchée d'un segment de rang de 1.0m de long, par parcelle élémentaire. Le poids de la matière sèche est déterminé après passage à l'étuve à une température de 90°C pendant 48 heures. Les résultats obtenus sont exprimés en g m⁻². Le taux d'accumulation de la matière sèche est estimé par le coefficient de régression (b, g m⁻² j⁻¹) de la quantité de la matière sèche sur la durée (t) au cours de laquelle s'est accumulée la biomasse considérée.

II.1.2.3. LA SURFACE ET LE POIDS SPECIFIQUE DE LA FEUILLE ETENDARD

La surface foliaire est estimée à partir d'un échantillon de 10 feuilles, dont on mesure la longueur totale et la largeur moyenne. La surface foliaire est déduite par la formule : SF (cm²) = 0.606(L x l) où L = Longueur totale des 10 feuilles, l = largeur moyenne des 10 feuilles et 0.606 = coefficient de régression reliant la surface des feuilles photocopiées sur papier grammage sur celle déduite par le produit L x l (Mefti *et al.*, 2008). Le poids spécifique foliaire (PSF) est calculé par le rapport du poids sec (PS) de l'échantillon de 10 feuilles sur la surface foliaire (SF): PSF (mg cm⁻²) = PS/SF (Asseng *et al.*, 2003)

II.1.2.4. LA TRANSLOCATION DES ASSIMILATS STOCKES DANS LA TIGE

Deux fois par semaine, dès le stade épiaison, on échantillonne 5 tiges épiées. On extrait les graines, puis on détermine le poids des graines et celui du pédoncule ou col de l'épi (Figure II.2). La différence entre le poids de la matière sèche totale de l'échantillon et celui des graines produites est prise comme une estimée de la matière sèche accumulée dans les tiges, au moment de l'échantillonnage. La fraction de la matière sèche stockée dans le col de l'épi et qui est transférée vers le grain est déduite par:

$$T = MSCol_{Max} - MSCol_{Min}$$

où T = le poids de la matière sèche du col de l'épi transférée vers le grain (g m^{-2}), $\text{MSCol}_{\text{Max}}$ = le poids maximal du col de l'épi au cours de la phase de remplissage (g m^{-2}), $\text{MSCol}_{\text{Min}}$ = poids de la matière sèche du col de l'épi à maturité (g m^{-2}). T est relativisé par rapport à la matière sèche accumulée dans les graines produites par m^{-2} (RDTM) comme suit :

$$T (\%) = 100(T/\text{RDTM})$$



Figure II.2. Feuille étendard, l'épi et col de l'épi au stade maturité physiologique

II.1.2.5. LE RENDEMENT ET SES COMPOSANTES

A maturité on mesure les rendements grain et paille et les composantes du rendement. Ces composantes sont déterminées à partir de la végétation des bottillons récoltés sur un segment de rang de 1 m de long. Le rendement et la biomasse totale de ces échantillons servent au calcul de l'indice de récolte et au comptage des épis. La hauteur du chaume est mesurée, juste avant la récolte de l'essai, en cm, du sol jusqu'au sommet de la strate moyenne des épis barbes non incluses. Le poids de mille grains est déterminé par comptage et pesage de 250 graines prises de la récolte de chaque parcelle élémentaire. Le nombre de grains épi⁻¹ (NGE) est déterminé à partir du rendement en grain (RDT, g m^{-2}), du nombre d'épis m^{-2} (NE, m^{-2}) et du poids moyen de 1000 grains (PMG, g) par calcul :

$$\text{NGE} = (1000 \text{ RDT})/(\text{PMG} \times \text{NE})$$

Le rendement machine est déterminé sur la base de la récolte mécanique de l'expérimentation.

II.1.3. Analyses des données

Les données collectées à partir des différentes mesures faites sur l'expérimentation ont été soumises à l'analyse de la variance, utilisant le logiciel Cropstat 7.2.3 (2009). Le calcul des corrélations phénotypiques et l'analyse en composantes principales (ACP) ont été réalisés avec le logiciel Statistix 1.8 (2007).

II.2. VARIATION TEMPORELLE DES RENDEMENTS DU BLE DUR

II.2.1. Conduite de l'expérimentation

Un essai a été mis en place sur le site de la station expérimentale de l'ITGC de Sétif, au cours des campagnes agricoles 2000/2001 à 2005/2006. Le matériel végétal est composé de 15 génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) provenant de sélections locales, et d'introductions de l'Icarda et de l'Europe (Tableau II.1). Ces génotypes ont été semés dans un dispositif en blocs avec trois répétitions, sur des parcelles élémentaires de 5 m de long par 1.2 m de large. La densité de semis adoptée est de 250 graines m⁻². L'essai a été fertilisé avec 100 kg ha⁻¹ d'engrais phosphaté à 46 %, avant le semis et 100kg ha⁻¹ d'engrais azoté (urée à 35%) au stade tallage. Le contrôle des mauvaises herbes est fait chimiquement avec du GranStar à raison de 12 g ha⁻¹.

II.2.2. Notations

Les notations effectuées au cours du suivi des différentes campagnes d'étude portent sur la datation du stade épiaison, la hauteur de la végétation, mesurée juste avant la récolte mécanique de l'essai et la détermination du rendement et des composantes du rendement grain. La procédure suivie pour ces notations est similaire à celle décrite par Chenaffi *et al.*, (2006).

Tableau II.1. Numéro et Pedigree des génotypes testés au cours de 6 campagnes agricoles sur le site de la station expérimentale de l'ITGC de Sétif

Numéro	Génotype	Pedigree	Origine
1	ADS_439_97	Adamillo/Duillio//Semito	Italie
2	Massara ₁	-----	Icarda
3	Mrb ₅	Jori C ₆₉ /Haurani	Icarda
4	Cyprus ₁	GdoVZ ₅₁₂ /Cit//Ruff/Fg/3/GgoVZ ₄₄₉	Europe
5	Waha	Pic/Ruff//Gta/Rtte	Algérie
6	Belikh ₂	L92-6AP-1AP-1AP-0AP	Icarda
7	Mrb ₁₆ //Ente/Mario	Mrb ₁₆ //Ente/Mario	Icarda
8	Bicre	Stk/4/Jo/3/Cr//Cit ₇₁	Icarda
9	Deraa	-----	Icarda
10	Daki	Gta/Tc ₆₀ //Stk/3/Chahba ₈₈	Icarda
11	Boussalam	Heider/Martes//HO	Algérie
12	Heider	variété population	Jordanie
13	MBB	variété population	Algérie
14	Semito	Capeiti ₈ /Valnova	Italie
15	Belioni ₃₂₅₈	variété population	Algérie

II.2.3. Analyses des données

II.2.3.1. Analyse de l'interaction

L'analyse de la variance du rendement grain est réalisée par campagne, pour identifier les meilleurs géotypes par environnement, et sur l'ensemble des campagnes, pour tester l'effet de l'interaction géotype x environnement. L'analyse en chemin est faite par année (milieu) pour estimer les effets directs et indirects des variables déterminantes du rendement grain (Garcia Del Moral *et al.*, 2003). Les variables influentes sont déterminées par le modèle de l'analyse de la régression progressive du rendement sur le nombre de grains produit par m² (NGM²), le poids de 1000 grains (PMG), la hauteur du chaume (HT) et la durée de la phase semis - épiaison (PREC). Les effets directs (P_i) sont estimés par les coefficients de régression partiels (béta) donnés par la régression progressive. Les effets indirects (P_j) sont déduits par le produit du coefficient de corrélation (r) entre les deux caractères d'intérêts (i et j) et l'effet direct (P_j) du caractère lié.

II.2.3.2. PARAMETRES STATISTIQUES DE MESURE DE LA STABILITE

L'analyse de la stabilité est approchée par le calcul de l'écovalence de Wricke (1962), l'indice de la supériorité génotypique de Lin et Binns (1988), l'indice de la sensibilité à la contrainte abiotique de Fischer et Maurer (1978), et la régression conjointe de Finlay et Wilkinson (1963). L'écovalence (W_i) est calculée par :
$$W_i = \sum (Y_{ij} - Y_i - Y_j + Y_{..})^2$$

où W_i = écovalence du géotype i, Y_{ij} = est la valeur du géotype i dans l'environnement j, Y_i = est la moyenne génotypique, calculée sur l'ensemble des environnements, Y_j = la moyenne de l'ensemble des géotypes dans l'environnement j, et Y_{..} = la moyenne générale de l'ensemble des géotypes et des milieux.

L'indice P de Lin et Binns (1988^a) est calculé comme suit :
$$P_i = [\sum (Y_{ij} - M_j)]^2 / 2n$$

où Y_{ij} = le rendement du géotype i dans l'environnement j, M_j = le rendement du géotype le plus performant dans l'environnement j; n = le nombre d'environnements testés. Parce que l'indice P_i porte sur l'effet moyen géotype et l'interaction, Lin et Binns (1988^b) suggère d'utiliser la contribution du géotype à l'interaction (GxE) comparativement à la contribution du témoin. Cette contribution est calculée comme suit :
$$GxE_i = [\sum (Y_{M_{BBj}} - Y_{M_{BB}} - Y_{ij} + Y_i)^2] / 2(n-1)$$

avec Y_{ij} = rendement du géotype i dans le milieu j, Y_i = Moyenne des rendements du géotype i sur l'ensemble des milieux, Y_{M_{BBj}} = rendement du témoin MBB dans le milieu j, Y_{M_{BB}} = moyenne des rendements du témoin MBB sur l'ensemble des milieux.

L'indice de sensibilité de Fischer et Maurer (1978) est calculé par: $S_i = (1 - Y_s/Y_{us}) / (1 - Y_{MS}/Y_{MUS})$

où Y_s = le rendement du génotype considéré obtenu dans le milieu stressant, Y_{us} = le rendement du même génotype réalisé dans le milieu non stressant, Y_{MS} = la moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes testés dans le milieu stressant et Y_{MUS} = la moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes testés dans le milieu non stressant.

Dans la méthode de la régression conjointe, le rendement du génotype est régressé sur l'indice du milieu I_j ($I_j = Y_{.j} - Y_{..}$) pour générer deux statistiques : le coefficient de régression b , spécifique à chaque génotype évalué et le carré moyen des écarts de la déviation, noté S^2_{di} . La déviation de l'unité du coefficient de régression est testée par rapport à l'écart type du b . La résiduelle de la régression (S^2_{di}) est testée par rapport à l'erreur résiduelle de l'analyse de la variance combinée comme suggéré par Annichiarico (2002).

Les indices non paramétriques, $S_i^{(2)}$ et $S_i^{(3)}$, de stabilité, développés par Nassar et Huehn (1987) ont été calculés en utilisant les formules suivantes :

$$S_i^{(2)} = \sum (r_{ij} - r_i)^2 / (n-1)$$

$$S_i^{(3)} = \sum (r_{ij} - r_i)^2 / r_i$$

où r_{ij} = ordre de classement ou rang du rendement du génotype i dans le milieu j , r_i = moyenne des rangs du génotype i sur l'ensemble des milieux, et n = nombre de milieux ou environnements.

La stabilité a été approchée aussi par la méthode de la somme des classements (rangs) des rendements et de la variance de Shukla (1972) qui est proportionnelle à l'écovalence selon Kang, (1988). Dans cette méthode les rendements d'un lieu j sont classés par ordre décroissants, le génotype ayant le rendement maximum prend le rang 1. Les valeurs de la variance de Shukla (1972) sont classées par ordre croissant, le rang 1 est donné au génotype ayant la plus faible variance. On déduit ensuite la somme des rangs (S_{rang}) des rendements et de la variance (Kang, 1988, Rose *et al.*, 2008).

Les statistiques non paramétriques de Fox *et al.*, (1990) sont déduites du classement des performances génotypiques par milieu et sur l'ensemble des milieux. Les classements génotypiques situés dans le premier tiers (classes 1 à 5) sont les meilleurs (TOP), les classements situés dans le tiers médian (classes 6 à 10) sont moyennes (MID), et ceux formant le dernier tiers (classes 11 à 15) sont faibles (Low). Les calculs statistiques ont été effectués avec les logiciels Cropstat 7.2.3 (2009), Openstat (2009) et Excel (2003).

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Etude du comportement variétal

III.1.1. Aperçu sur le climat de la campagne

Les trois dernières campagnes se caractérisent par un volume pluviométrique, enregistré entre septembre et juin, variable du point de vue volume et répartition (Figure III.1). Le cumul de pluie varie de 317.8 mm (2007/08) à 392.7 mm (2006/07). Du point de répartition, on note que 2006/07 se distingue par une fin d'hiver- début printemps très pluvieuse, un automne presque sec et une fin de cycle humide. A l'inverse la campagne 2007/08 présente un hiver sec, un automne et un printemps pluvieux, avec des pointes pour les mois de septembre et mai approchant les 80mm. Alors que la campagne 2008/09 se caractérise par une répartition homogène des pluies de septembre à avril, puis c'est la sécheresse qui s'installe (Figure III.1).

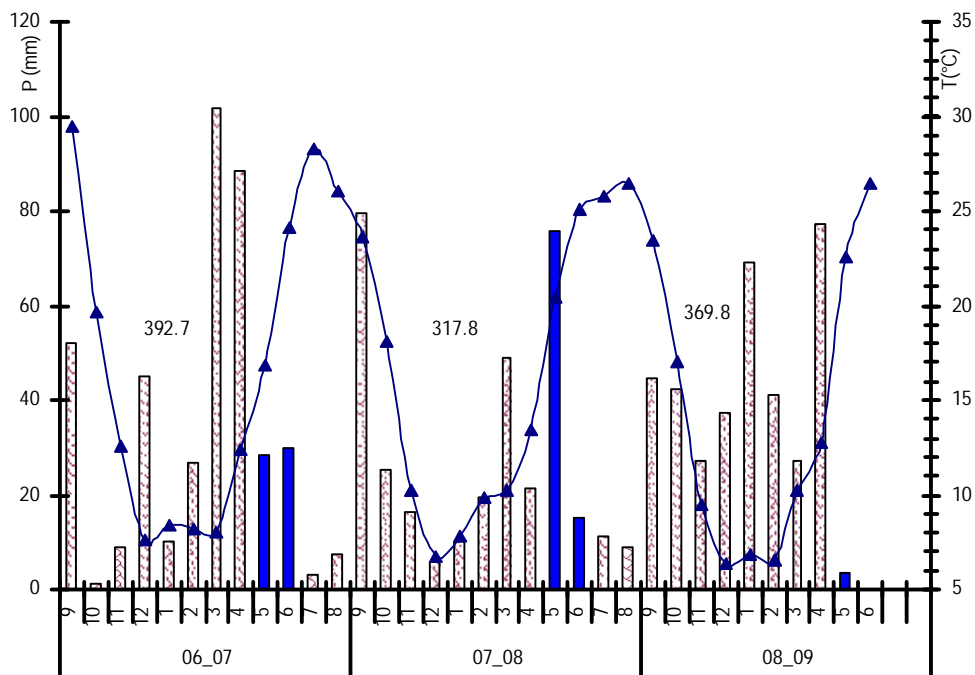


Figure III. 1. Pluie et température moyenne mensuelles des trois dernières campagnes sur le site expérimental ITGC de Sétif

L'analyse du régime thermique indique qu'au cours des trois années, les mois de novembre à mars enregistrent des températures moyennes inférieures à 10°C. Ceci empêche tout développement de la végétation et ne permet pas aux eaux des pluies automnales et hivernales d'être valorisées par la culture. Les mois d'avril, mai et juin connaissent, par contre, une élévation importante de la température de l'air, passant du dessous de 10°C à près de 25°C

(Figure III.1). Ce phénomène pousse la végétation à terminer un cycle qui vient juste de démarrer.

III.1.2. Variables mesurées au stade épiaison

Du point de vue sélection, les variables qui s'expriment tôt dans le cycle et qui différencient les géotypes ou lignées sous sélection sont intéressantes à connaître. Ceci parce qu'elles permettent de faire une sélection précoce. La sélection précoce permet de cribler un plus grand nombre de matériel végétal. Le stade épiaison est une importante étape dans le cycle de vie de la plante. C'est à ce stade que l'architecture de la plante devient apparente, indiquant le potentiel de rendement (Abbassenne *et al.*, 1998).

Parmi les variables faciles à mesurer et qui sont visibles au stade épiaison figurent la hauteur du chaume, la biomasse aérienne accumulée, les épis émergents et la surface de la feuille étandard. La hauteur du chaume est une caractéristique indicatrice de la capacité de la plante à produire plus de paille en conditions normales. Elle est aussi avantageuse sous stress hydrique, vue qu'elle conditionne le rendement économique et la translocation des assimilés stockés temporairement au niveau du col de l'épi (Annichiarico *et al.*, 2005 ; Ehdai *et al.*, 2006 ; Menad, 2009).

Les épis et la biomasse aérienne sont des indicateurs de la capacité du géotype à produire plus de grains. En effet Mazouz (2006) indique que la biomasse aérienne accumulée au stade épiaison peut-être utilisée comme un indicateur de la capacité différentielle des géotypes à faire une bonne utilisation des facteurs du milieu au cours de la période de la pré-anthèse. Elle est aussi un bon indicateur de l'activité photosynthétique de la même période. Les géotypes qui accumulent rapidement une biomasse élevée au stade épiaison souffrent moins des effets des stress de la post-anthèse qui sont plus fréquents.

La biomasse aérienne accumulée est la résultante de la contribution de plusieurs caractères tels que la hauteur du chaume, la durée de la phase végétative, la vitesse de croissance végétative et le nombre de grains produits par unité de surface. La surface de la feuille étandard et le poids spécifique foliaire sont indicateurs de la capacité photosynthétique au cours de la phase de remplissage du grains (Abbassenne *et al.*, 1998 ; Asseng *et al.*, 2003). Identifier les géotypes qui accumulent tous ces caractères sous contraintes est intéressant vu qu'ils sont plus aptes à valoriser le milieu et à tolérer les contraintes climatiques. L'analyse de la variance des valeurs prises par ces variables indique un effet géotype significatif (Tableau III.1). Des différences d'ordre génotypique existent donc entre les variétés étudiées.

Tableau III.1. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des variables mesurées au stade épiaison

Source de Variation	Carrés moyens des écarts						
	ddl	HT	NE	BIOE	WNE	SF	PSF
Génotype	08	1213.4**	22782.8*	320778**	20479**	99.46**	960.4
Résiduelle	18	15.64	6925.0	16645.7	669.2	11.52	22.51

*,** : effet significatif au seuil de 5 et 1% respectivement. HT= hauteur en cm ; NE = nombre d'épis m⁻² ; BIOE = biomasse en g m⁻² ; WNE = poids des épis en g m⁻² ; SF= surface de la feuille étendard, en cm² ; PSF= poids spécifique foliaire en mg cm²

La variété Mohammed Ben Bachir (MBB) exprime les meilleures valeurs pour la hauteur du chaume, la biomasse accumulée, le nombre et le poids des épis et la surface de la feuille étendard. Mrb₃ est significativement plus courte que MBB, mais elle présente aussi les meilleures valeurs pour la biomasse aérienne, le nombre et le poids des épis, la surface et le poids spécifique de la feuille étendard (Tableau III.2). Gaviota 's', Ofanto, Vitron et Waha figurent parmi les génotypes qui présentent les plus faibles valeurs pour la hauteur, la biomasse et le nombre et le poids des épis. Boussalam présente des valeurs intermédiaires pour l'ensemble des variables mesurées au stade épiaison (Tableau III.2).

Tableau III.2. Valeurs moyennes des variables mesurées au stade épiaison

Génotypes	Variables mesurées					
	HT	BIOE	NE	PE	SF	PSF
Boussalam	77.5	1062.1	552.7	310.3	20.3 ^a	89.4
Gaviota's'	44.0	594.6	425.0	157.9	9.7	105.4
Korifla	72.0	1252.2 ^a	575.0	327.3 ^a	17.8 ^a	112.9
MBB	106.3 ^a	1443.1 ^a	618.5 ^a	323.3 ^a	19.8 ^a	115.7
Mrb ₃	71.6	1326.2 ^a	700.0 ^a	355.4 ^a	16.9 ^a	174.3 ^a
Mrb ₅	57.3	698.7	588.8	185.5	12.9	97.5
Ofanto	46.3	709.7	447.2	179.7	17.1 ^a	66.3
Vitron	48.3	633.7	477.7	157.3	16.8 ^a	90.8
Waha	52.5	810.1	541.6	198.1	12.9	100.7
Ppds _{5%}	6.7	221.3	142.7	44.3	4.8	8.1

^a = meilleur génotype pour le caractère mesuré. HT= hauteur en cm ; NE = nombre d'épis m⁻² ; BIOE = biomasse à l'épiaison en g m² ; PE = poids des épis en g m² ; SF= surface de la feuille étendard, en cm² ; PSF= poids spécifique foliaire en mg cm²

L'étude des corrélations indique que la hauteur est liée positivement à la biomasse, le nombre et le poids des épis et à la surface foliaire alors que le nombre des épis est lié à la biomasse, au poids des épis et au poids spécifique foliaire (Tableau III.3). Chez les variétés étudiées, la biomasse aérienne est déterminée par le poids des épis: Biomasse (g m⁻²) = 3.812 PE (g m⁻²) + 18.31, R²= 0.928 (Tableau III.2 et III.3).

Tableau III.3. Coefficient de corrélation entre les variables mesurées au stade épiaison.

	HT	NE	BIO	WNE	SF	PSF
HT	1.000			$r_{5\%} = 0.650$		
NE	0.683	1.000				
BIO	0.899	0.796	1.000			
WNE	0.821	0.801	0.963	1.000		
SFE	0.694	0.399	0.674	0.674	1.000	
PSF	0.385	0.776	0.622	0.640	0.034	1.000

HT= hauteur en cm ; NE = nombre d'épis m⁻² ; BIOE = biomasse en g m² ; WNE = poids des épis en g m⁻² ; SF= surface de la feuille étandard, en cm² ; PSF= poids spécifique foliaire en mg cm⁻²

III.1.3. Variables mesurées au stade maturité

III.1.3.1. La hauteur du chaume

L'analyse de la variance des mêmes variables, en plus du poids de 1000 grains, du nombre de grains par épi et du rendement, mesurées au stade maturité indique un effet génotype significatif (Tableau III.4). Pour la hauteur du chaume, MBB présente la meilleure moyenne avec une valeur de 118.1 cm. Elle est suivie de Mrb₅ et Boussalam qui ont une hauteur moyenne de 98.0 et 92.0 cm. Les autres variétés présentent une hauteur moyenne variant entre 81.2 cm pour Korifla et 86.2 cm pour Mrb₃ (Tableau III.5).

Dans les zones arides, ce paramètre serait pertinent pour la sélection de variétés mieux adaptées à la sécheresse. Une paille relativement haute conférerait à la plante, en cas de limitation sévère de l'alimentation hydrique, une meilleure capacité à tolérer la sécheresse. Ce comportement s'expliquerait par des potentiels plus élevés de constitution de réserves glucidiques. Cette contribution de la hauteur du chaume avec les substrats stockés au niveau surtout du dernier entre nœud et du col de l'épi assure un rendement en grain sous stress (Blum., 1988). Nizam Uddin et Marshall (1989) mentionnent que la réduction du rendement, sous stress hydrique, est plus importante chez les variétés naines que chez les variétés hautes, pour un même degré de précocité. La réduction de la hauteur des chaumes est corrélée à une réduction du système racinaire, ceci se traduit par un accroissement de la sensibilité du déficit hydrique.

Tableau III.4. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des variables mesurées à maturité

Source de Variation	ddl	Carrés moyens des écarts								
		HT	BIOM	NE	PE	RDT	RDTM	PMG	NGE	NGM ²
Génotype	08	557.5**	110905**	10884.5**	19960.8**	6519.7**	1445**	24.54**	28.42**	75**
Résiduelle	18	19.56	8370.5	702.6	1055.2	823.8	153	4.09	4.66	7.6

** : effet significatif au seuil de 1%. HT= hauteur en cm ; BIOM = biomasse à maturité en g m⁻² ; NE = nombre d'épis m⁻² ; PE = poids des épis en g m⁻² ; RDT = rendement grain (g m⁻²) ; RDTM = rendement machine (g m⁻²) ; PMG = poids de 1000 grains ; NGE= nombre de grains par épi, NGM² = nombre de grains par m² dont le CME x 100 000).

Tableau III.5. Valeurs moyennes des variables mesurées au stade maturité

Géotypes	Variables mesurées								
	HT	BIOM	NE	PE	PMG	NGE	NGM ²	RDT	RDTM
Boussalam	92.0	1263.3 ^a	483.7 ^a	637.5 ^a	36.24	21.05	10158.3 ^a	368.3 ^a	329.4 ^a
Gaviota's'	82.5	916.1	441.2	544.5	38.94	20.61	9044.4 ^a	352.0 ^a	329.7 ^a
Korifla	81.2	706.0	328.8	423.5	36.78	22.20	7328.9	269.4	321.3 ^a
MBB	118.2 ^a	987.9	363.2	444.4	36.62	20.13	7337.1	269.3	286.5
Mrb ₃	86.2	963.1	368.7	493.3	35.34	25.32 ^a	9334.1 ^a	328.5	292.3
Mrb ₅	98.0	1030.9	421.3	571.7	35.47	24.56 ^a	10311.8 ^a	362.8 ^a	335.3 ^a
Ofanto	85.5	943.9	352.5	527.5	36.95	26.22 ^a	9208.5a	339.8 ^a	328.4 ^a
Vitron	86.2	715.7	335.0	430.9	43.37 ^a	19.59	6548.9	284.1	292.7
Waha	81.7	916.7	398.8	517.9	38.25	18.96	7569.7	288.7	309.6
Ppds5%	6.4	132.7	38.5	47.12	2.93	3.13	1270.7	41.6	18.1

^a = meilleur géotype pour le caractère mesuré. HT = hauteur en cm ; BIOM = biomasse à maturité en g m² ; NE = nombre d'épis m⁻² ; PE = poids des épis en g m⁻² ; PMG = poids de 1000 grains (g) ; NGE = nombre de grains par épi ; NGM² = nombre de grains m⁻² ; RDT = rendement grain (g m⁻²) ; RDTM = rendement machine (g m⁻²)

Entre les stades épiaison et maturité, la hauteur du chaume a changé de manière significative, chez certaines variétés comparativement à d'autres (Figure III.2). En effet on note que la hauteur a changé peu chez les variétés MBB, Boussalam, Korifla et Mrb₃. Par contre, il y a eu des changements importants chez les variétés Gaviota's', Mrb₅, Ofanto, Vitron et Waha (Figure III.2). Ces changements varient de 36 à 47% de la hauteur atteinte à maturité ; alors qu'ils ne représentent que 10 à 17% chez les autres variétés. Ces résultats indiquent que la hauteur est déterminée plus tôt, au cours de la pré anthèse, chez les variétés MBB, Boussalam, Korifla et Mrb₃. Par contre, chez les variétés Gaviota's', Mrb₅, Ofanto, Vitron et Waha, au stade épiaison, la hauteur exprimée ne représente que 50% de la valeur atteinte à maturité. La taille finale de la plante est atteinte au cours des premiers jours de la phase de remplissage du grain.

Le comportement des variétés MBB, Boussalam, Korifla et Mrb₃ est plus intéressant sous contrainte hydrique de fin de cycle. La hauteur finale de ces variétés est moins sensible aux effets des stress tardifs. Elle varie moins comparativement à celles des autres variétés. Elle risque, cependant, d'être plus sensible aux stress précoces de la pré anthèse. Par contre la hauteur des variétés du second groupe (Gaviota's', Mrb₅, Ofanto, Vitron et Waha) se montre sensible aux stress précoces et tardifs, dans la mesure où sa valeur finale se détermine graduellement tout le long du cycle. L'allongement de la hauteur du chaume, qui a lieu après l'épiaison, vient de la croissance du dernier entre-nœud et du pédoncule de l'épi (Ehdaie *et al.*, 2006). Le suivi de cet allongement indique un effet géotype et une interaction géotype x date de mesure significatifs (Tableau III.6).

Les résultats du suivi indiquent que la hauteur finale du chaume s'est matérialisée 15 jours après l'épiaison (Figure III.3). Ces résultats confirment aussi les différences entre les deux groupes de variétés : ceux dans la hauteur s'est formée à 80% avant l'épiaison et ceux dont la hauteur s'est formée à moitié avant et à moitié après l'épiaison (Figure III.3). L'allongement du col varie selon les génotypes. Cet allongement est nul pour Mrb₅, Mrb₃, Vitron, Korifla et Waha. Par contre le col prend sa dimension finale au cours des premiers jours après l'épiaison chez MBB, Boussalam, Gaviota's' et Ofanto. Ces résultats suggèrent que la croissance du dernier entre-nœud est active après l'épiaison chez certains génotypes, par contre chez d'autres c'est uniquement le col de l'épi qui prend sa longueur finale après ce stade.

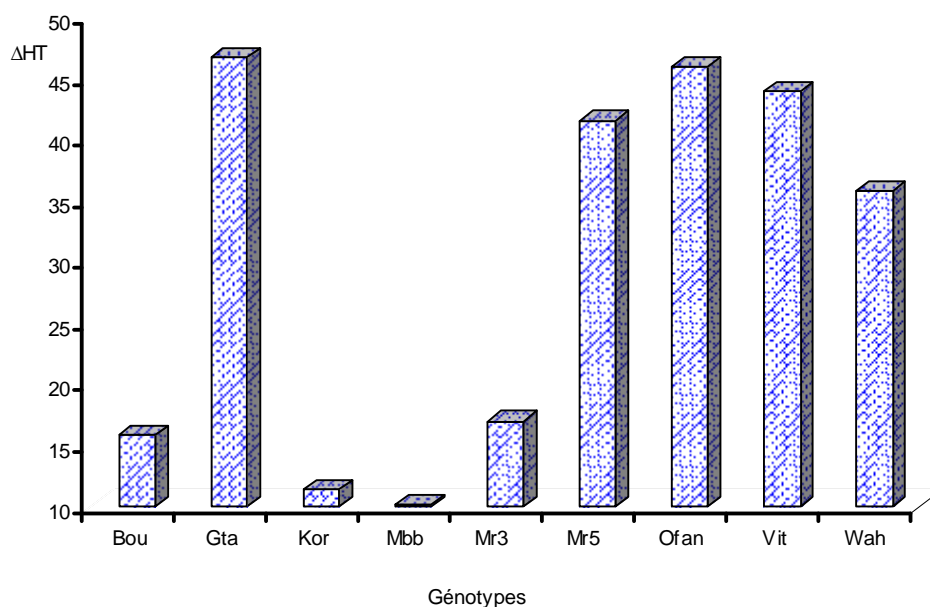


Figure III.2. Changement $\{\Delta HT(\%) = 100[1 - (HT_{\text{Epiation}}/HT_{\text{Maturité}})]\}$ de la hauteur du chaume des variétés étudiées entre les stades épiaison et maturité

Tableau III.6. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des variables mesurées au cours de la phase de remplissage du grain

Source de Variation	ddl	Carrés moyens des écarts				
		HT	L _{col}	W _{col}	W _{5NE}	W _{1Grain}
Date (D)	6	2567**	15.1*	4.13**	216.3**	296.4**
Génotype (G)	8	3079**	262.7**	4.96**	7.27**	6.72**
G x D	48	87.6**	6.10ns	0.18*	1.24ns	1.73**
Résiduelle	126	28.06	6.7	0.12	0.90	0.65

*,** : effet significatif au seuil de 5 et 1% respectivement. HT= hauteur en cm ; L_{col}= longueur du col ; W_{col}= poids du col ; W_{5NE}= poids des 5 épis (g m⁻²) ; W_{1Grain}= poids d'un grain de blé (g).

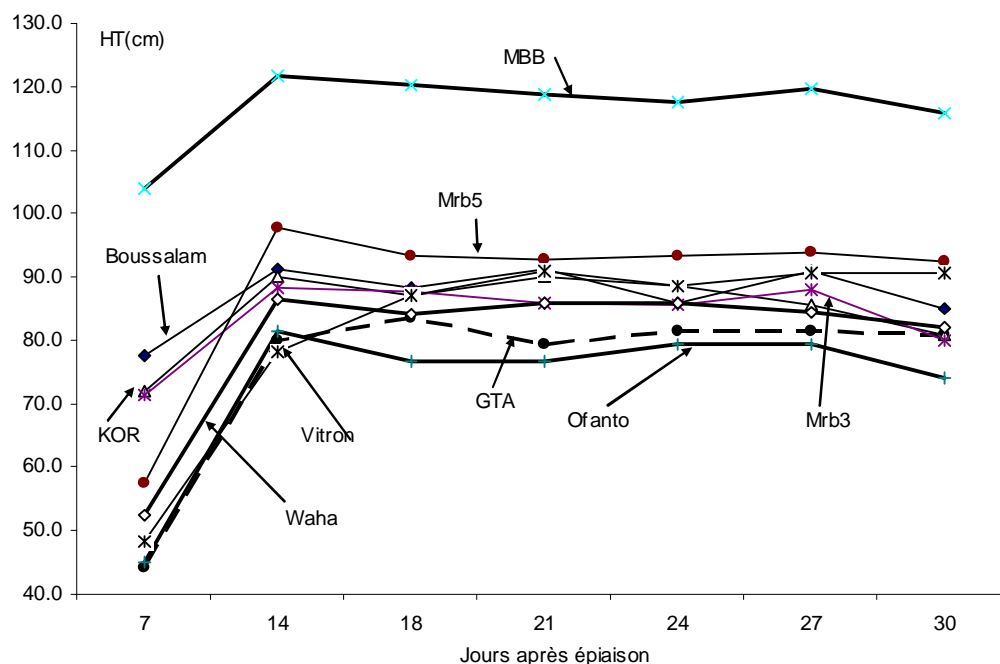


Figure III.3. Evolution de la hauteur du chaume des différentes variétés au cours de la phase de remplissage du grain.

III.1.3.2. La biomasse aérienne

A maturité, la biomasse accumulée varie significativement entre les différents génotypes (Tableau III.4). Elle prend la valeur la plus élevée, chez Boussalam, avec une moyenne de 1263.3 g m⁻². Comparativement, la biomasse de Mrb₅ ne représente que 80% celle de Boussalam. Celles des génotypes Gaviota's', MBB, Mrb₃, Waha et Ofanto atteignent 75% et les valeurs les plus faibles, représentant moins de 57%, sont mesurées chez Vitron et Korifla (Tableaux III.5). Une faible ressemblance apparaît entre les valeurs mesurées au stade épiaison et celles mesurées à maturité ($r = 0.1302^{ns}$). Ceci indique des comportements génotypiques différents à ces deux stades végétatifs. En effet, on note que certaines variétés perdent de la matière sèche entre ces deux stades. Ces variétés sont Korifla, MBB et Mrb₃. Par contre d'autres variétés, telles que Boussalam, Gaviota's', Mrb₅, Vitron et Waha, ajoutent de la matière sèche à celle accumulée au stade épiaison, provenant essentiellement du remplissage du grain (Figure III. 4).

La perte de la matière sèche entre les deux stades s'explique par la photo-respiration, la perte du feuillage desséché et la régression des talles tardives chez les variétés Korifla, MBB et Mrb₃ qui se montrent très sensibles aux stress hydrique et thermique prévalant au cours de la phase de remplissage de cette campagne (Figure III.1). Parmi les autres variétés Gaviota's', Boussalam et à un degré moindre Mrb₅, se montrent très tolérants des stress prévalants, puisque ces deux génotypes améliorent nettement la biomasse accumulée entre ces deux stades végétatifs (Tableau III. 5, Figure III. 4). Ces résultats indiquent que sous stress de fin de cycle, la

biomasse accumulée au stade épiaison n'est pas un bon indicateur de celle qui s'accumule à maturité. De ce fait mesurer la biomasse au stade épiaison n'apporte pas d'information utile quant à l'identification de génotypes performants et tolérants.

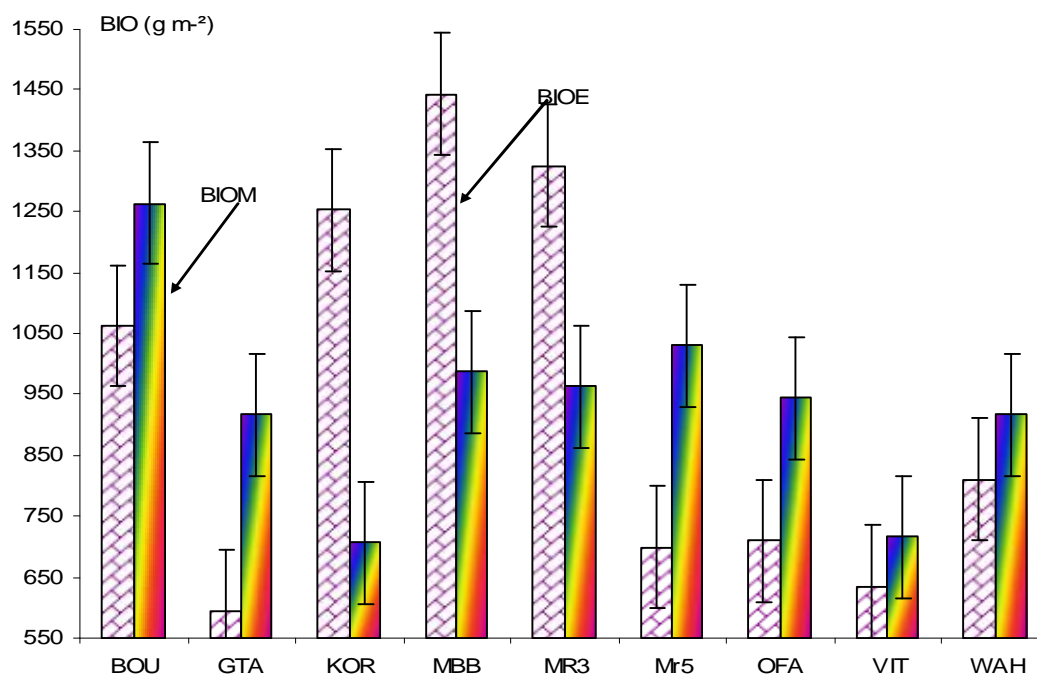


Figure III.4. Biomasse aérienne mesurée à l'épiaison et à maturité chez les différentes variétés.

Meynard (1987) rapporte que lorsque le remplissage du grain se fait dans des conditions de croissance favorables, le poids de l'épi au stade épiaison est un bon indicateur du rendement potentiel attendu. Cependant ces résultats montrent que ces comportements différents sont une cause probable de la présence de l'interaction génotype x milieu du rendement en grain. Benkherchouch *et al.*, (2008) mentionnent que les variétés adaptées au climat des hauts plateaux se caractérisent par une croissance élevée en début du cycle, parce que l'eau est disponible à ce moment là et qu'elle peut être utilisée. Comparativement aux génotypes qui reportent leur croissance vers le début du printemps, pour des raisons de satisfaction des besoins physiologiques en matière de vernalisation et photopériode, subissent les effets des stress de fin de cycle. Ces derniers gardent cependant l'avantage d'éviter les gels tardifs printaniers.

III.1.3.3. Le nombre et le poids des épis m⁻²

L'analyse de la variance montre un effet génotype significatif pour les épis et le poids des épis (Tableau III.4). Les meilleures valeurs pour les épis et le poids des épis sont mesurées chez les génotypes Boussalam, 483.7 épis m⁻² pour un poids moyen de 637.5 g suivi de Gaviota's' avec

une moyenne de 441.2 épis m⁻² pour un poids moyen de 544.5 g et Mrb₅ avec un nombre d'épis de 421.3 et un poids de 571.7 g (Tableau III.5). Korifla, MBB, Mrb₃, Ofanto, et Vitron présentent les plus faibles moyennes pour les épis et le poids des épis. Waha occupe une position intermédiaire (Tableau III.4, III.5). Le poids des épis à maturité est très corrélé avec le nombre des épis m⁻² : $PE (g m^{-2}) = 1.2316 NE (m^2) + 32.122, R^2 = 0.8269$.

Le nombre d'épis déterminé à l'épiaison est peu lié avec celui déterminée à maturité ($r = -0.10^{ns}$). Il en est de même pour le poids des épis déterminés à ces deux stades végétatifs ($r = -0.15^{ns}$). Ce peu de ressemblance vient du fait que les variétés Korifla, MBB et Mrb₃ ont perdu plus d'épis (-280 épis m⁻², en moyenne) au cours de la phase de remplissage comparativement aux variétés Boussalam, Gaviota's' Mrb₅, Ofanto, Vitron et Waha qui ont plus ou moins maintenu la population d'épis déterminée au stade épiaison. Ces pertes importantes des épis expliquent la baisse de la biomasse aérienne mesurée à maturité, chez ces mêmes génotypes. Ces pertes s'expliquent par la régression des talles tardives portant épis. La régression des talles tardives est liée au degré de sensibilité des variétés vis-à-vis des stress abiotiques prévalent au cours de la phase de remplissage du grain, dont notamment l'élévation brusque de la température de l'air et le manque d'eau (Figure III.1). Elles peuvent être lues comme une stratégie développée par les variétés en question pour produire du grain.

Un déficit hydrique à la montaison se traduit par la chute du nombre d'épis par m², la régression intense des talles et la réduction du nombre de grains par épi, notamment par augmentation du taux d'avortement des épillets et l'induction de stérilité du pollen (Slama *et al.*, 2005). Benbelkacem et Kellou (2001) mentionnent l'apparition du déficit hydrique au début de la montaison réduit de 10 à 25% le nombre d'épis. Ben Salem *et al.*, (1991) rapportent que dans les zones arides, le rendement est plus lié au tallage épis qu'au tallage herbacé. Ce qui s'explique par le fait que dans ces zones, toutes les talles produites, sous l'effet de la compétition pour l'eau, n'arrivent pas à former des épis.

III.1.3.4. Le poids de 1000 grains, le nombre de grains/épi, de grains m⁻² et le rendement

L'analyse de la variance montre des effets génotypes significatifs pour le poids de 1000 grains, le nombre de grains par épi, de grains m⁻² et le rendement en grain (Tableau III.4). La variété Vitron se détache en tête avec une moyenne de 43.37 g pour le poids de 1000 grains. Le reste des variétés ont un poids de 1000 grains, significativement plus faible, et qui varie de 35.34 à 38.94 g (Tableau III.5). Mrb₃, Mrb₅ et Ofanto présentent le nombre de grains/épi le plus élevé, variant entre 24.5 et 26.2 grains /épi. Le reste des variétés ont un nombre de grains par épi significativement plus faible et qui varie de 18.9 à 22.2 grains/épi.

Boussalam, Mrb₅, Mrb₃, Gaviota's' et Ofanto présentent le nombre de grains m⁻², le plus élevé. Waha, Vitron, MBB et Korifla produisent le nombre de grains m⁻² le plus faible (Tableau

III.5). Le classement variétal pour le nombre de grains m^{-2} se maintient pour le rendement en grain, où Boussalam, Gaviota's', Mrb₅ et Ofanto se classent en tête et produisent de manière équivalente. Korifla, MBB, Vitron et Waha produisent les plus faibles rendements en grains (Tableau III.5).

Parmi les variables du tableau III.5, le rendement est largement déterminé par le nombre de grains m^{-2} et le poids de 1000 grains : $RDT (g m^{-2}) = 0.036 \pm 0.001NGM^2 + 7.085 \pm 0.680 PMG - 256.7$, $R^2 = 0.992$. Ces résultats corroborent en partie avec ceux de BenKherchouch *et al.*, (2008) qui rapportent l'analyse des relations du rendement avec les composantes suggère que seul le nombre de grains par épi a eu un effet déterminant sur le rendement. En l'absence de données de la hauteur et du nombre de grains m^{-2} , le rendement est simplement déterminé par le poids des épis : $RDT (g m^{-2}) = 0.511 \pm 0.096PE + 57.5$, $R^2 = 0.801$. En l'absence des données du poids des épis, du nombre de grains m^{-2} et de la hauteur du chaume, le rendement est déterminé par les composantes directes : $RDT (g m^{-2}) = 0.770 \pm 0.015NE + 12.874 \pm 0.356NGE + 6.758 \pm 0.395PMG - 518.7$, $R^2 = 0.998$.

Ces résultats montrent que la biomasse aérienne et la hauteur du chaume affecte directement peu le rendement en grain à l'intérieur des variétés étudiées. Par contre le nombre de grains m^{-2} et le poids des épis peuvent servir de critère de sélection des variétés performantes. Ces variables ne sont déterminées que tardivement au même titre que le rendement en grain. Cependant le nombre et le poids des épis, appréciés visuellement, peuvent servir d'indicateurs des performances des lignées sous sélection et du comportement variétal sous stress. Le rendement (RDTM) machine est bien lié avec celui (RDT) estimé sur la base de 1 m linéaire par parcelle élémentaire. La seule exception est la variété Korifla dont le RDT est bien inférieur au RDTM (Figure III.5).

III.1.3.5. La contribution des assimilés du col de l'épi au remplissage du grain

L'évolution du poids du col de l'épi des différentes variétés est indiquée en figure III.6. Les variétés qui ont un col plus lourd sont Mrb₅, MBB, Ofanto et Korifla. Waha, Gta's', Mrb₃ et Boussalam ont plutôt un col plus léger (Figure III.6). Le col montre une réduction de poids au cours de la phase de remplissage. La baisse du poids du col est variable selon les variétés (Figure III. 6). Elle est importante chez les génotypes comme Mrb₅, Korifla, Ofanto et Waha et plutôt faible chez des génotypes comme MBB, Mrb₃ et Gta's'. On note aussi une différence de date à partir de laquelle cette baisse du poids du col de l'épi débute. Elle est très précoce pour Waha, soit 18 jours après épiaison. Elle est très tardive pour Boussalam, soit 27 jours après épiaison (Figure III.6).

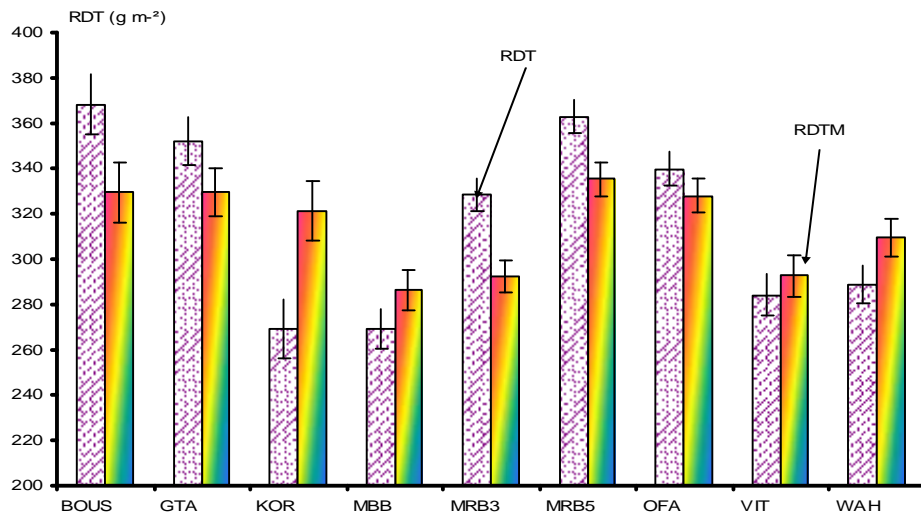


Figure III.5. Comparaison du rendement machine (RDTM) et celui estimé par rang de 1 m long (RDT)

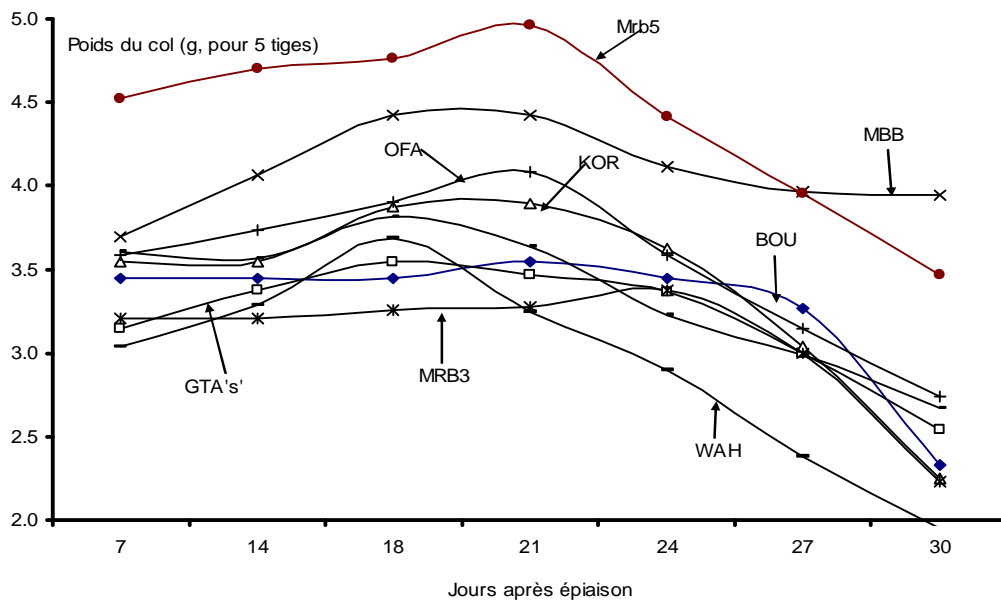


Figure III.6. Evolution du poids du col de l'épi au cours de la phase de remplissage du grain.

Considérant que cette perte du poids du col de l'épi est constituée d'assimilats qui sont directement dirigés vers les grains en pleine formation, la contribution est variable selon la variété. La contribution du col de l'épi au remplissage du grain varie de 36.3 g m⁻² pour MBB à 135.6 g m⁻² pour Waha. Des contributions appréciables sont notées pour les variétés MRB₅ (126.4 g m⁻²), Boussalam (116.1 g m⁻²) et Korifla (105.2 g m⁻²). Cette contribution, exprimée en pourcentage du rendement machine, varie de 12.7% chez MBB à 43.8% pour Waha (Tableau III.7).

Les variétés donnant un rendement élevé sont celles qui transfèrent le plus d'assimilés du col vers le grain, la corrélation entre la contribution et le rendement grain est significative ($r = 0.6875^*$).

Au cours du déroulement de la phase de remplissage, la cinétique d'accumulation de la matière sèche du grain est sous la dépendance de deux sources principales d'assimilés qui sont la photosynthèse de la feuille étendue et la part des réserves produites lors des périodes de pré- et post-anthèse et stockées dans les tiges et qui est transloquée (Bahlouli *et al.*, 2008). Blum et Pnuel (1996) mentionnent que le flux des assimilés vers le grain dépend d'une part de la quantité d'assimilés stockés dans les tiges et d'autre part de l'assimilation post-anthèse. La quantité est fonction du nombre de tiges produites par m^2 , du type de variété, de la hauteur du chaume et des conditions climatiques spécifiques à l'année.

Sous stress hydrique, le pédoncule de l'épi représente un site de stockage des réserves d'assimilés en vue d'un meilleur remplissage des grains. La part des assimilés transférés est relativement marginale en bonnes années pour devenir important lors des années défavorables, lorsque le stress hydrique affecte fortement l'appareil photosynthétique (Bahlouli *et al.*, 2008). Ceci suggère qu'une forte accumulation de sucres solubles dans les tiges, constitue une protection contre les dommages dus à une exposition de la plante à une contrainte sévère du milieu. Les quantités des assimilés transloqués dépendent de l'état de fonctionnement des vaisseaux conducteurs, de la capacité du génotype à utiliser les réserves pour le remplissage du grain et de l'écart du poids du grain de son potentiel suite au déficit de l'activité de photosynthèse de la post-anthèse (Wardlaw, 2002).

Ainsi, lorsque les conditions climatiques sont moins contraignantes, lors de la phase de remplissage, la plante fait moins appel aux réserves d'assimilés et arrive à assurer le remplissage du grain avec le produit de l'activité de photosynthèse de la post-anthèse. Par contre, lorsque les conditions climatiques durant cette phase sont contraignantes, l'activité photosynthétique de la post-anthèse est réduite ou devient nulle, la plante fait alors appel aux assimilés stockés dans les tiges, réduit la durée de la phase végétative et accroît son taux de remplissage (Bahlouli *et al.*, 2008). Selon Amigue *et al.*, (2006), le déficit hydrique accélère la sénescence des feuilles, ce qui favorise la translocation des réserves carbonées et azotées des feuilles vers le grain, au détriment du maintien de la photosynthèse.

III.1.3.6. La durée des phases de développement

Les variétés étudiées diffèrent significativement pour la date de réalisation de l'épiaison. La variété la plus précoce est Mrb₅ qui a épié le 6 du mois de mai 2009. Elle est suivie par Vitron et Gaviota's' qui ont épié le 8 du même mois. Ofanto a épié le 9 alors que Waha épia le 10 mai. Korifla et Mrb3 ont épié le 11 mai alors que Boussalam a épié le 12 mai. MBB est le dernier à

épier, le 16 mai 2009. En conditions méditerranéennes, le semis précoce augmente le rendement potentiel car le stock d'eau disponible est supérieur, la floraison anticipée et la répartition de la transpiration entre pré- et post-anthèse optimisée (Turner, 2004). Le risque provient alors du gel tardif qui peut affecter la montaison et la floraison. Tardieu *et al.*, (2006) déclarent que ce raccourcissement du cycle se traduit aussi par une réduction du rendement potentiel. Les stratégies d'esquive avec utilisation de variétés très précoces n'ont d'intérêt que pour des situations à sécheresse terminale ou à très faible réserve utile (Debaeke *et al.*, 2006). Le suivi du remplissage du grain montre que seules les variétés Korifla et Gaviota's' ont atteint leur maturité physiologique sous les conditions climatiques de cette campagne (Figure III.8).

Tableau III.7. Contribution des assimilats du col de l'épi au remplissage du grain.

Génotypes	T (g m ⁻²)	T (% RDTM)	RDTM (g m ⁻²)
Boussalam	116.1	35.2	329.4
Gaviota 's'	88.2	26.8	329.7
Korifla	105.2	32.7	321.3
MBB	36.3	12.7	286.5
Mrb ₃	81.1	27.8	292.3
Mrb ₅	126.4	37.7	335.3
Ofanto	98.7	30.1	328.0
Vitron	73.7	25.2	292.7
Waha	135.6	43.8	309.6

T = Matière sèche transloquée, RDTM = rendement en grain machine

Tableau III.8. Durée (j et %) des phases de développement et du cycle de la culture

Génotype	PV (j)	PRG (j)	Cycle (j)	PV (% cycle)	PRG (% cycle)
BOU	178	30	208	85.6	14.4
GTA	174	27	201	86.6	13.4
KOR	177	26	203	87.2	12.8
MBB	182	30	212	85.8	14.2
MR3	177	30	207	85.5	14.5
MR5	172	30	202	85.1	14.9
OFA	175	30	205	85.4	14.6
VIT	174	30	204	85.3	14.7
WAH	176	30	206	85.4	14.6

Les autres variétés ont mûri prématurément, suite à l'effet des stress hydrique et thermique. La durée de la phase végétative varie de 172 jours pour Mrb₅ à 182 jours MBB. La phase remplissage de grain varie de 26 jours pour Korifla à 30 jours pour le reste de variétés (Tableau III.8). La durée totale du cycle varie de 202 jours à 212 jours respectivement pour Mrb₅ et MBB qui occupent les extrêmes (Tableau III.8, Figure III.8). En pourcent, la durée de la phase végétative occupe 85.1 à 87.2% de la durée du cycle alors que la phase de remplissage ne représente que 12.8 à 14.9% la durée du cycle.

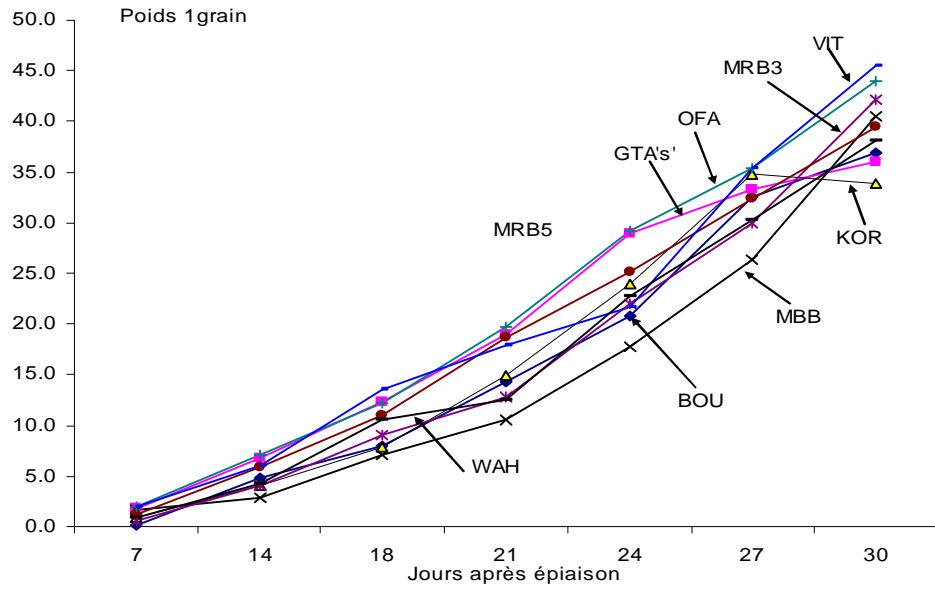


Figure III.7. Evolution du remplissage du grain des différentes variétés et maturité physiologique

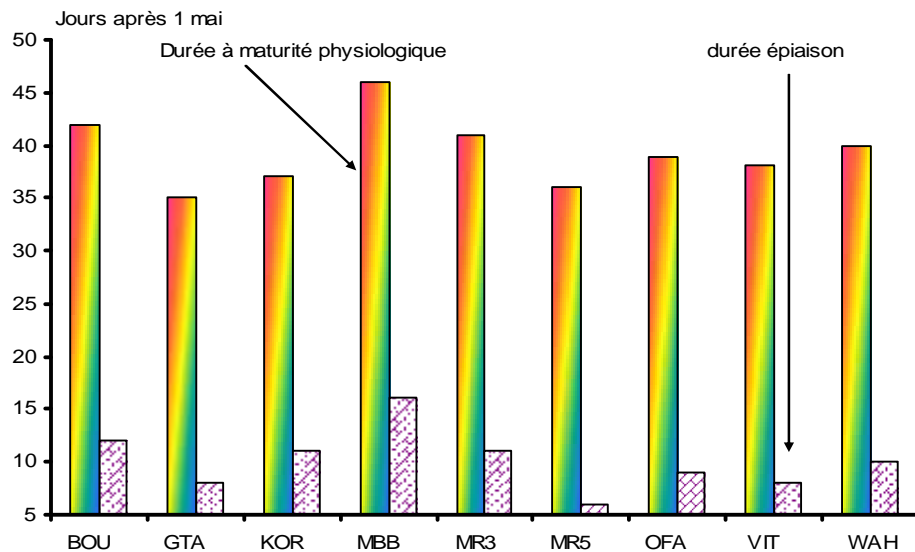


Figure III.8. Durée à l'épiaison et à maturité (comptée à partir du 1 mai) des différentes variétés

Blum (1993) met bien en évidence l'interaction entre disponibilité en eau et durée du cycle optimale pour le blé : en présence de stress hydrique (rendement <30 q/ha), la corrélation entre rendement et durée de la phase levée épiaison (indicateur de précocité) est négative alors qu'en conditions de bonne alimentation en eau (rendement >60 q/ha), ce sont les variétés

tardives qui ont l'avantage. Lorsque le stress est modéré, le rendement moyen des variétés testées n'est pas relié à la durée de cycle. Wade et Douglas (1990) suggèrent la prescription de variétés à cycle "intermédiaire" si l'on cherche une stabilité du rendement. Ben Salem et al (1991) déclare, qu'en zone aride, il est préférable d'adopter des cultivars à cycle de développement moyen ce qui permet à la variété d'échapper à la sécheresse de post-anthèse, très fréquente dans les régions méditerranéennes.

III.1.4. Typologie variétale

L'étude des relations entre les valeurs des mesures faites au cours des deux stades végétatifs bien précis permet de grouper les variétés étudiées selon leur comportement et capacité de production. Les corrélations des valeurs des variables mesurées avec les premiers axes principaux de l'analyse en composantes principales sont représentées en figure III.9.

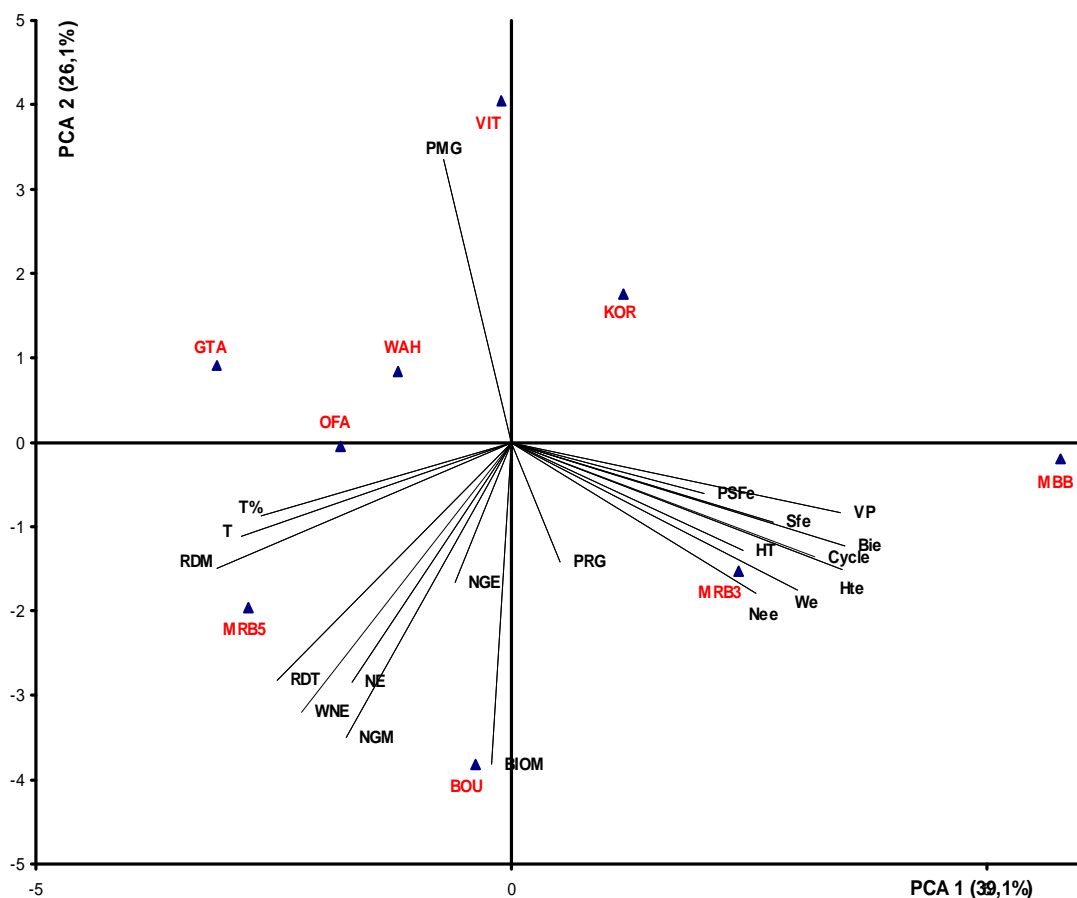


Figure III. 9. Représentation des variables mesurées et des génotypes étudiés sur le plan des axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales.

Les deux premiers axes (axes 1 et 2) de l'ACP expliquent 39.12% et 29.09%, respectivement, soit 68.21% de la variation totale (Figure III.9). Le long de l'axe 1 s'opposent les variables mesurées au stade épiaison, ainsi que la durée du cycle et celle de la phase végétative au rendement et à la quantité d'assimilats transférés vers le grain. Le long de l'axe 2 s'opposent le poids de 1000 grains au rendement estimé sur la base d'un segment de rang de 1 m de long, le nombre d'épis, le poids des épis, le nombre de grains par m² ainsi que la biomasse aérienne mesurée à maturité (Figure III.9). Le nombre de grains par épi et la durée de la phase de remplissage du grain sont peu représentés par ces deux axes.

MBB se caractérise par des valeurs élevées pour les variables mesurées au stade épiaison : la surface et le poids spécifique de la feuille étandard, le nombre et le poids des épis, la hauteur du chaume, en plus d'une longue durée du cycle et de la phase végétative et la hauteur du chaume déterminées à maturité. Cette variété se caractérise aussi par un faible rendement en grain, déterminé sur la base de la récolte mécanique de l'essai, de faibles valeurs des composantes du rendement mesurés à maturité (NE et NGM²) et une faible contribution des assimilats au remplissage du grain. Gaviota's' et Mrb₅ s'opposent à MBB pour ces caractéristiques

Sur la base des valeurs des variables mesurées au stade épiaison en comparaison avec le rendement et le transfert des assimilats, Mrb₃, Korifla, Waha et Ofanto sont des types intermédiaires entre MBB d'une part et Gaviota's' et Mrb₅, d'autre part (Figure III.9). Vitron et Boussalam se caractérisent par la grosseur du grain ou PMG qui est élevé chez Vitron et faible chez Boussalam et par la biomasse aérienne produite à maturité qui est plus importante chez Boussalam et moindre chez Vitron (Figure III.9).

L'objectif de l'étude du comportement est de comprendre comment chaque variété typique se développe et élabore son rendement dans un milieu donné. Le comportement dans la présente étude est abordé par la mesure de toute une série de variables composant l'architecture de la plante et ceci à deux stades végétatifs clés : épiaison et maturité. L'analyse des données indique des comportements très contrastés, basés sur la grosseur du grain opposé à la biomasse accumulée à maturité, d'une part ; et sur la durée du cycle et la biomasse accumulée à l'épiaison, opposées à la capacité de rendement en grain et de transfert des assimilats du col vers le grain, d'autre part. Dans la mesure où la sélection est dirigée vers l'identification des génotypes à haut rendement en grain et si possible en paille, il est intéressant de comprendre le comportement des génotypes comme Mrb₅, Gta's' et Boussalam dont le comportement est opposé à celui de MBB.

Il y a tout d'abord l'effet de la durée de la phase végétative (Figure III.10). Cet effet est assez complexe dont la mesure où la relation est de type cubique. Des génotypes comme Boussalam, Korifla, Ofanto, Waha, Vitron et Mrb₃, présentent des durées de la phase végétative presque équivalentes, mais différentes significativement pour la capacité de rendement en grain.

Cette relation n'est linéaire que pour Mrb₅, Gta's', Waha et MBB qui présentent une gradation pour la durée de la phase végétative et le rendement en grain (Figure III.10). Les différences de rendements entre Mrb₅, Waha et MBB s'expliquent aisément par la durée de la phase végétative qui esquivent ou n'esquivent pas la période de stress terminal.

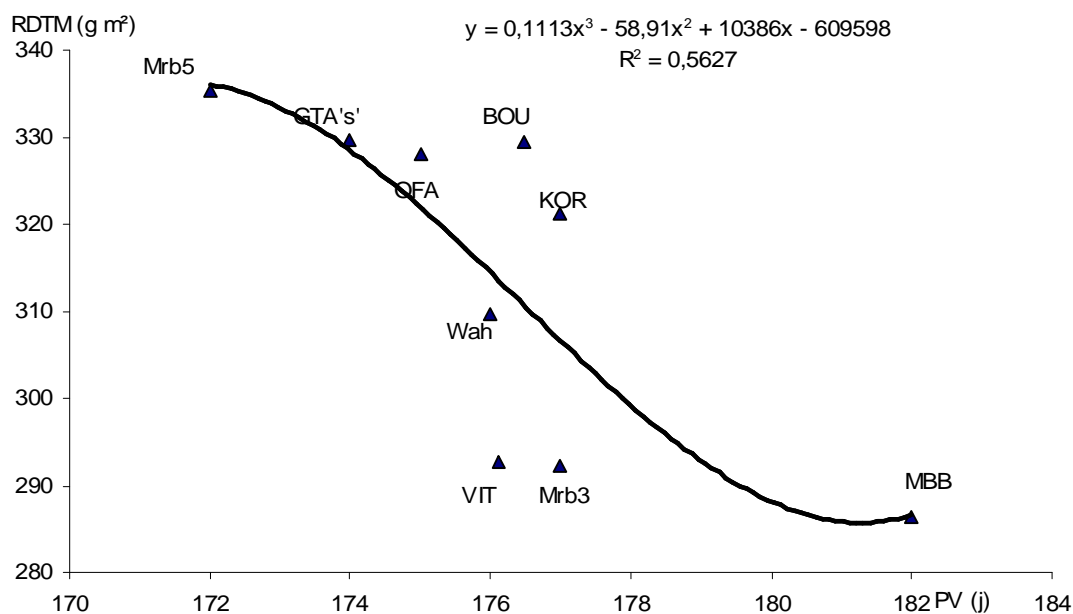


Figure III. 10. Relation entre la durée de la phase végétative (PV) et le rendement (RDTM).

Par contre les différences de rendement entre les génotypes comme Bousalam, Ofanto, Korifla, Vitron et Mrb₃, qui ont le même degré de précocité au stade épiaison, s'expliquent par la capacité génotypique de rendement spécifique à chaque génotype. Bousalam, Ofanto et Korifla utilisent une plus grande proportion (+30%) des assimilés stockés dans le col de l'épi pour minimiser la baisse de rendement liée à la durée de la phase végétative. Par contre Vitron et Mrb₃ font une moindre utilisation de cette source (Tableau III.7). Bousalam produit plus d'épis et un poids des épis m² élevé. Alors que Vitron présente un poids de 1000 grains élevé. Ces résultats suggèrent que la précocité d'épiaison, la capacité de translocation des assimilés, le nombre et le poids des épis m² sont des caractéristiques désirables à cumuler chez un génotype donné pour avoir un haut rendement en grain.

On note aussi des différences de valorisation de la biomasse accumulée au stade épiaison. Le rendement en grain (RDTM) représente 20 à 55% de cette biomasse. Gaviota 's', avec un ratio de 55%, est le génotype qui transforme le mieux la biomasse accumulée en grain. Alors que MBB, Mrb₃ et Korifla, avec respectivement 20, 22 et 26%, sont les variétés qui

valorisent le moins la biomasse produite. Mrb₅, Ofanto et Vitron présentent des pourcentages variant de 46 à 48%. Waha, avec 38%, se place devant Boussalam qui a un taux de 31%.

Tenant compte de la paille produite à maturité, des différences entre génotypes apparaissent aussi pour le rendement économique (RDT grain + 0.3 RDT Paille). MBB se classe en tête pour cette caractéristique avec un rendement économique de 719.4 g m⁻², suivi de Korifla et de Mrb₃, avec respectivement 696.9 et 690.2 g m⁻². Boussalam suit de près avec un rendement économique de 647.9 g m⁻², alors que le rendement économique des autres variétés varie entre 544.9 pour Mrb₅ à 482.8 g m⁻² pour Vitron.

III.1.5. Synthèse

Indépendamment du potentiel de rendement, la performance d'un génotype est très variable selon les conditions pédoclimatiques dans lequel il est cultivé et l'itinéraire technique auquel il est soumis. Lorsque cette performance change d'un lieu à un autre ou d'une campagne sur l'autre, on parle alors d'interaction génotype x environnement ou génotype x milieu. Le milieu prend un sens général de sol, climat, conduite culturale ou année (Annichiarico *et al.*, 2005). Dans le cas où l'interaction ne change pas le classement des génotypes évalués pour le caractère mesuré, on peut se permettre de l'ignorer.

Dans le cas contraire, il faut la prendre en charge soit pour l'exploiter positivement, à travers la sélection spécifique, pour mettre en valeur les différences de milieux. Ou bien il faut l'ignorer, en cherchant à sélectionner des génotypes plastiques à large adaptation dit génotypes passe partout (Lin *et al.*, 1986). Il est cependant important de connaître les causes de la présence de l'interaction et quels sont les caractères génotypiques et les variables du milieu qui en sont la source causale (Brancourt - Hulmet *et al.*, 2003).

Parmi les variables génotypiques, on a les caractères utilisés comme critères de la sélection : la hauteur du chaume, la biomasse totale accumulée, le nombre d'épis et le rendement grain qui donnent une indication sur les capacités de performances du génotype. La sensibilité d'expression de ces caractères aux changements de milieux ou d'environnements est une cause possible de l'interaction (Becker et Léon, 1988). Ainsi les résultats de cette étude montrent que des différences d'ordre génotypiques existent entre les variétés évaluées, pour les différentes variables mesurées. Ils indiquent aussi des différences de comportement variétal qui sont en relation avec les conditions du milieu : MBB présente les meilleures valeurs au stade épiaison, valeurs qui sont réprimées à maturité, suite au changement des conditions de croissance (effet de la sécheresse et haute température).

Pour un même caractère, les génotypes évalués présentent des valeurs très différentes, notamment pour les caractères qui sont liés à la performance, tels que le nombre et le poids des

épis, la biomasse aérienne, la hauteur du chaume qui est le siège de stockage des assimilés transférables vers les grains. L'expression de ces variables dans un lieu donné est susceptible de changer dans un autre lieu. Ainsi Yan *et al.*, (2000) suggèrent d'uniformiser le matériel végétal sélectionné pour la durée de la phase végétative, la hauteur du chaume, et le nombre d'épis pour éviter des différences trop fortes qui induisent l'interaction génotype x milieu. A juste titre, chez les variétés évaluées dans la présente étude, la hauteur varie de 81.2 à 118.2 cm, la biomasse aérienne de 706.0 à 1263.3 g m⁻², le nombre d'épis de 328.8 à 483.7 épis m⁻² et le poids de 1000 grains de 35.3 à 43.4 g. Les résultats indiquent aussi des différences entre groupes de variétés pour la matérialisation du caractère : la hauteur s'est formée à 80% avant l'épiaison pour certaines variétés (MBB) et à 50% pour d'autres (Gaviota's). L'allongement du col varie aussi selon les génotypes, après le stade épiaison, il est nul pour Mrb₅, et il est encore actif chez MBB et Boussalam.

Les résultats indiquent aussi que sous stress de fin de cycle, la biomasse accumulée au stade épiaison n'est pas un indicateur fidèle de celle qui s'accumule à maturité. La régression des talles tardives est liée au degré de sensibilité des variétés vis-à-vis des stress abiotiques prévalent au cours de la phase de remplissage du grain, dont notamment l'élévation brusque de la température de l'air et le manque d'eau. Les résultats montrent que la biomasse aérienne et la hauteur du chaume affecte peu le rendement en grain qui est déterminé par le nombre de grains m⁻². Sous les conditions de croissance spécifique à cette campagne, on note aussi des différences de date à partir de laquelle débute le transfert des assimilés vers les grains (15 à 27 jours après l'épiaison), et des différences de quantités d'assimilés transférées effectivement (12.7 à 43.8% du RDTM).

La durée de la phase végétative montre cependant une moindre divergence, (9 au 16 mai), MBB étant la seule variété tardive. Le suivi du remplissage du grain montre que seules les variétés Korifla et Gaviota's' ont atteint leur maturité physiologique sous les conditions climatiques de cette campagne. Les autres variétés ont mûri prématurément, suite à l'effet des stress hydrique et thermique, qui a réduit la durée de la phase de remplissage à moins de 15% de la durée du cycle. En fonction du comportement et la capacité de production exprimés sous les conditions climat-conduite de cette année, on note que MBB se caractérise par des valeurs élevées pour les variables mesurées au stade épiaison et un faible rendement en grain, qui est dû à de faibles valeurs d'épis et de grains m⁻² et une faible contribution des assimilés au remplissage du grain. Gaviota's' et Mrb₅ s'opposent à MBB pour ces caractéristiques. Vitron et Boussalam divergent pour le poids de 1000 grains, élevée chez Vitron et faible chez Boussalam et par la biomasse aérienne produite à maturité qui est plus importante chez Boussalam et moindre chez Vitron. Les différences de rendements entre Mrb₅, Waha et MBB s'expliquent aisément par la durée de la phase végétative. Ces résultats suggèrent que la précocité d'épiaison, la capacité de translocation des assimilés, le nombre et le poids des épis m⁻² sont des caractéristiques désirables à cumuler chez un génotype donné pour avoir un haut rendement en grain.

III.2. Analyse de la variation temporelle du rendement

III.2.1. Variabilité génotypique du rendement grain

La pluviométrie enregistrée au cours du cycle de la culture montre une importante variation inter et intra annuelle (Figure III.11). Le cumul pluviométrique varie de 215.9 à 521.8 mm. La répartition est relativement plus homogène en 2005/06. Elle est, par contre, très irrégulière au cours des 5 autres campagnes. Le régime thermique se caractérise par une allure bimodale, froid intense en hiver et températures élevées en fin de cycle de la culture (Figure III.11). La moyenne des rendements grains varie de 1.8 à 3.33 t ha⁻¹. Cette variation n'est pas linéairement corrélée avec celle de la pluviométrie ($r = 0.18$) suggérant l'action du stress thermique dans la réalisation d'un niveau de rendement donné. L'analyse de la variance du rendement en grain faite par campagne (milieu) indique un effet génotype significatif. De la variabilité d'ordre génotypique existent donc, pour le rendement grain, entre les différentes variétés testées.

L'analyse de la variance indique aussi que chaque milieu se caractérise par son meilleur génotype spécifique, à haut rendement grain. Ainsi en 2000/2001, 7 génotypes se classent premiers, dont Adamillo/Duillo//Semito, Massara₁, Mrb₅, Cyprus₁, Waha, Mrb₁₆/Ente//Mario et Daki (Tableau III.9). Par contre, en 2001/2002, seul MRB₅ prend la tête du classement et en 2002/2003, c'est la variété Deraa qui se classe première. En 2004/2005, c'est le génotype Cyprus₁ qui prend la tête du classement (Tableau III. 9).

Selon, Yan *et al.*, (2000), le changement du classement des génotypes d'un milieu à l'autre est une indication de la présence de l'interaction génotype x milieu. On note cependant que, quelque soit le milieu, les génotypes MBB, Beliouni, Semito et Heider se classent toujours en dernière position (Tableau III.9). Ceci est une indication de leur faible potentiel de rendement grain. L'analyse de la variance combinée du rendement en grain, mesuré au cours des 6 campagnes, confirme la présence de l'interaction génotype x milieu (test $F_{G \times E} = 39.36^{**}$, $P < 0.01$). La présence d'une interaction significative suggère d'analyser la stabilité du rendement grain pour identifier les génotypes stables et performants.

III.2.2. Analyse de la stabilité du rendement grain

L'indice S

L'indice de la sensibilité à la contrainte varie de 0.14, valeur caractéristique de Massara₁ à 1.51, valeur caractéristique du degré de sensibilité à la contrainte de la variété Deraa (Tableau III.10). L'indice S mesure la réduction du rendement grain du génotype, en passant du milieu stressant au milieu favorable, comparativement à la réduction moyenne observée pour l'ensemble des génotypes testés. Le génotype qui minimise cette réduction est tolérant au stress

qui différencie le milieu stressant du milieu favorable. En effet selon Bruckner et Froberg (1987), les faibles valeurs de S sont associées à la tolérance à la contrainte hydrique, parce qu'elles indiquent une faible réduction du rendement grain sous stress comparativement au rendement obtenu sous conditions favorables.

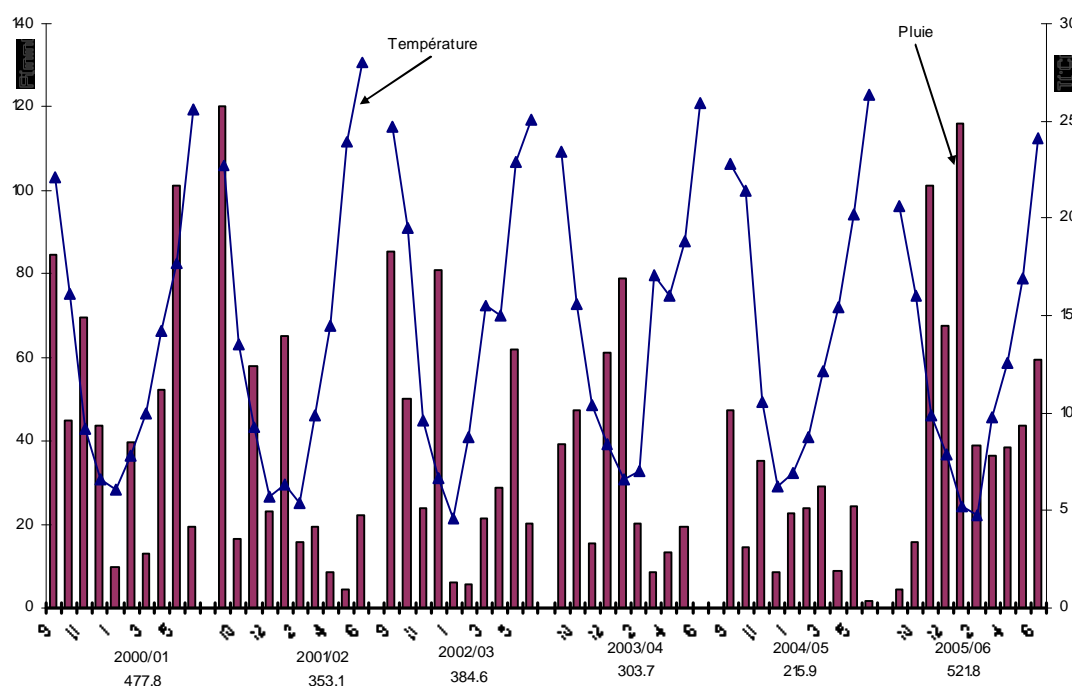


Figure III.11. Pluies et températures mensuelles des 6 campagnes d'étude.

Dans le contexte de cette étude, la différentielle du rendement en grain, entre les milieux contraignant et favorable, est essentiellement due à l'effet du stress hydrique. En effet la différence de pluviométrie entre le milieu stressant (215.9 mm et 1.80 t ha⁻¹) et le milieu favorable (384.6 mm et 3.33 t ha⁻¹) est de 168.7 mm pour une différence de rendement grain de 1.53 t ha⁻¹. La contrainte hydrique réduit du potentiel de rendement de 46%. Les géotypes Massara₁, Semito et MBB prennent les plus faibles valeurs de l'indice S, comparativement aux géotypes Deraa, Adamillo/Duilio//Semito et Heider/Martes//Huevos de Oro qui prennent les valeurs S les plus élevées. Les géotypes du premier groupe sont tolérants et ceux du second groupe sont sensibles à la contrainte hydrique (Tableau III. 10).

Au vu des performances de rendement grain de ces géotypes (Tableau III.9), il ressort que la tolérance de la contrainte est acquise au détriment de la performance de rendement grain. Il est acceptable et juste de payer ce prix, dans le cas où les géotypes prenant des valeurs S faibles se montrent plus performants sous la contrainte hydrique. Dans la présente étude, ceci

n'est pas le cas. Ainsi par exemple, Massara₁ (S= 0.14) et Semito (S= 0.46) montrent une tolérance à la contrainte hydrique élevée, mesurée par l'indice S. Sous la contrainte hydrique, donc, dans le milieu contraignant, ces deux génotypes devraient se classer en tête des performances, suite à leur capacité à tolérer le stress.

Tableau III.9. Moyennes des rendements grains (t ha⁻¹) des différents génotypes dans chaque milieu et en moyenne de l'ensemble des milieux (MG).

Génotype	Milieux						MG
	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	
ADS	3.61 ^a	2.53	3.93	3.59	1.61	1.47	2.79
Massara ₁	3.36 ^a	3.08	1.91	2.55	1.78	2.41 ^a	2.52
Mrb ₅	3.25 ^a	4.27 ^a	2.41	3.22	1.63	2.58 ^a	2.89
Cyprus ₁	3.54 ^a	2.27	5.57	3.07	2.60 ^a	2.11	3.19
Waha	3.32 ^a	3.33	3.08	4.32 ^a	1.49	1.80	2.89
Belikh ₂	2.67	3.05	2.88	3.07	1.89	2.56 ^a	2.68
MrbEM	3.42 ^a	2.43	3.35	3.27	2.01	2.40 ^a	2.81
Bicre	2.89	2.73	2.20	3.98 ^a	1.61	2.47 ^a	2.65
Deraa	2.83	2.00	5.93 ^a	2.84	1.79	2.16	2.93
Daki	3.50 ^a	1.78	3.45	3.18	1.69	2.47 ^a	2.68
HMHO	2.54	3.38	5.00	3.33	1.97	2.34 ^a	3.09
Heïder	3.00	3.85	3.06	3.59	1.47	1.63	2.98
MBB	2.88	3.28	2.02	3.26	1.47	1.63	2.42
Semito	2.41	1.37	2.36	2.94	1.87	2.20	2.19
Belïouni	2.57	3.84	2.87	2.91	1.53	1.76	2.58
MG	3.05	2.88	3.33	3.27	1.80	2.18	2.75
Ppds5%	0.45	0.26	0.28	0.33	0.15	0.25	---

a = génotype performant par environnement ; MG =moyenne générale

Tableau III.10. Paramètres de stabilité du rendement grain caractéristiques des différents génotypes

Génotype	S _i	P _i	GxE _i	W _i	S _i ⁽²⁾	S _i ⁽³⁾	S _{rang}	b _i	S ² _{di}	TOP	MID	BOT
ADS	1.28	3.22	0.41	1.41	28.57	19.93	47	1.62	0.16**	50	33	17
Massara ₁	0.14	5.13	0.14	2.41	22.40	12.44	65	0.38 ^a	0.42**	33	33	34
Mrb ₅	0.70	2.60	0.09	2.89	17.77	14.41	50	0.79	0.70**	33	50	17
Cyprus ₁	1.16	1.19	1.21	5.13	24.97	20.24	51	1.28	1.25**	50	33	17
Waha	1.12	2.61	0.12	1.54	18.57	12.95	49	1.54	0.25**	33	33	34
Belikh ₂	0.75	3.89	0.15	0.54	15.47	10.09	48	0.61 ^a	0.06 ^{ns}	33	33	34
MrbEM	0.87	3.05	0.28	0.40	08.97	07.69	36	0.87	0.09**	50	50	00
Bicre	0.58	4.16	0.13	1.88	19.37	12.36	57	0.81	0.46**	33	33	34
Deraa	1.51	2.42	1.60	7.56	23.60	13.11	69	1.58	1.73**	17	33	50
Daki	1.11	3.94	0.50	1.48	16.57	11.56	48	0.97	0.37**	50	33	17
HMHO	1.32	1.60	0.71	2.64	17.60	14.67	48	1.33	0.61**	66	17	17
Heïder	0.72	2.13	0.05	0.89	22.57	13.82	52	0.89	0.22**	33	33	34
MBB	0.59	5.88	0.00	1.68	15.20	06.91	74	0.93	0.42**	00	33	67
Semito	0.46	8.00	0.43	1.86	15.77	07.06	76	0.39	0.28**	17	17	66
Belïouni	1.02	4.64	0.11	1.57	14.70	07.00	70	1.01	0.39**	17	17	66

a, * = b significativement < 1 et significativement > 1, respectivement ; ns, ** = résiduelle de la régression non significative et significative au seuil de 1% respectivement. Si = indice de la sensibilité à la contrainte, Pi = indice de la supériorité génotypique, GxE_i = contribution à l'interaction, Wi = écovaleance, Si(2) = indice de Nassar et Huehn, Si(3) = indice de stabilité de Nassar et Huehn, S_{rang} = somme des classements de Kang (1988), bi = coefficient de régression de Finlay et Wilkinson (1963), S²_{di} = résiduelle de la régression ; Top, MID, BOT = statistiques de Fox et al. (1990)

Or il n'en est rien, puisque dans ce milieu, les meilleurs rendements sont exprimés par d'autres génotypes moins tolérants tels que Cyprus₁ (S=1.16) et Mrb16/Ente// Mario (S= 0.87). En

plus cette tolérance, exprimée par l'indice S, est souvent due au fait que le génotype dit tolérant n'est pas apte à valoriser les milieux favorables, vu que les valeurs de l'indice S sont positivement liées au rendement grain du milieu favorable ($r = 0.8521^{**}$, $P < 0.01$) et non liées à ceux du milieu contraignant.

Ces résultats montrent que l'indice S est peu utile en sélection pour identifier les génotypes tolérants et performants. Selon Rosielle et Hamblin (1981) la sélection sur la base des faibles valeurs de l'indice S réduit du potentiel de rendement dans les environnements favorables. Les résultats de cette étude montrent que le potentiel est aussi réduit sous conditions contraignantes. En matière de régularité des rendements, il ressort que la sélection pour la tolérance réduit du potentiel mais pas de variabilité des rendements. La variation temporelle des rendements grains mesurés chez deux génotypes caractérisés par de faibles valeurs S est similaire à celle notée chez deux génotypes présentant des valeurs S élevées (Figure III.12). Par contre le niveau de rendement est plus important chez Deraa et Heider/Martes//Huevos de Oro que chez Massara₁ et Semito (Figure III.12).

L'indice P

Les valeurs de l'indice de la supériorité génotypique varient de 1.19, valeur mesurée chez Cyprus₁ à 8.00, valeur de Semito (Tableau III.10) Cet indice mesure la distance qui sépare la performance du génotype d'intérêt de la meilleure performance réalisée dans le milieu considéré. Selon Crossa et al (2002), cet indice intègre les notions de performance et de stabilité. Cependant la stabilité et le potentiel de performance sont mesurés par rapport au meilleur génotype par milieu et non pas par rapport à la moyenne de l'ensemble des génotypes testés et sur l'ensemble des milieux.

Selon, Rose *et al.*, (2008), les faibles valeurs de cet indice sont les plus désirables en sélection, parce qu'elles sont les caractéristiques des génotypes performants et stables. La corrélation négative existante entre les valeurs P et le rendement mesuré dans le milieu favorable ($r = -0.672^{**}$, $P < 0.01$) indique qu'il est possible d'identifier des génotypes performants et stables, parmi les variétés testées. Ces résultats rejoignent ceux de Clarke *et al.*, (1992) qui rapportent une corrélation de -0.91^{**} entre les valeurs de P et le rendement grain du milieu favorable.

Dans ce contexte, les cultivars Cyprus₁ ($P = 1.19$) et Heider/Martes//Huevos de Oro ($P = 1.60$) sont classés comme étant performants et stables. A l'inverse, les génotypes MBB ($P = 5.88$) et Semito ($P = 8.00$) sont classés comme étant instables et peu performants (Tableau III.11). La comparaison des performances de ces deux groupes de génotypes, au comportement contrasté, montre qu'effectivement on note une différence significative du point de vue performance de rendement grain et de stabilité (Figure III.13). La sélection sur la base des faibles valeurs de

L'indice P identifie, donc, des génotypes performants et stables. Le plus souvent, de tels génotypes valorisent nettement mieux les milieux favorables et se comportent autant, sinon mieux, que les génotypes instables (valeur de P élevées) dans les milieux contraignants (Figure III.13). La stabilité liée à l'indice P est de type dynamique, elle est fonction du potentiel de rendement du milieu. Selon Lin et Binns (1988^a), ce type de stabilité, à l'inverse de la stabilité de type statique, intègre la réponse génotypique à la fertilité du milieu.

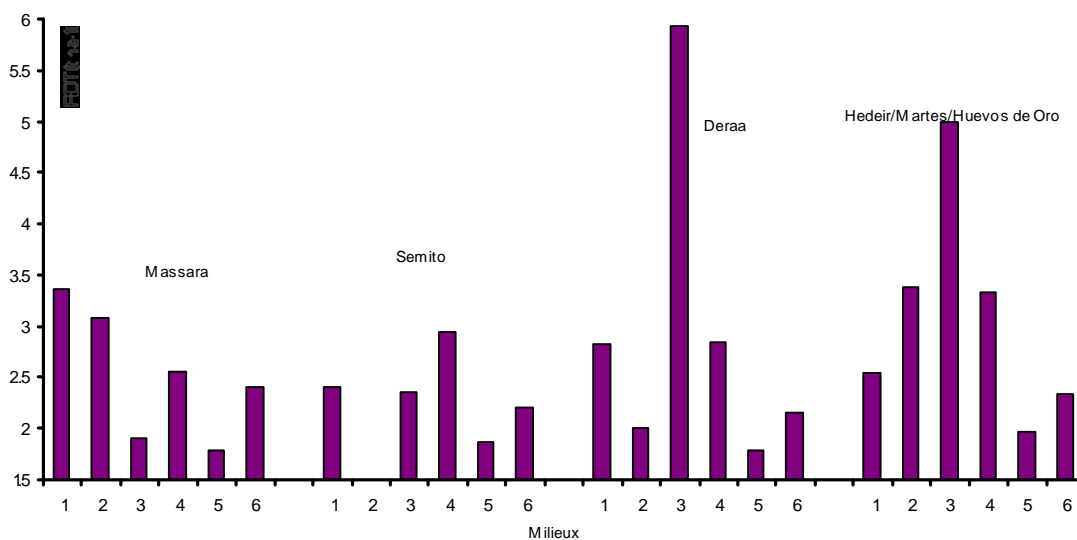


Figure III.12. Stabilité temporelle et performances de rendement des génotypes présentant des valeurs S faibles (Massara₁ et Semito) et élevées (Deraa et Heider/Martes//Huevos de oro).

La contribution génotypique à l'interaction

La contribution génotypique à l'interaction génotype x milieu (GxE) varie de 0.00, chez MBB, variété témoin, à 1.60 chez Deraa (Tableau III.10). Les faibles valeurs sont indicatrices d'une faible contribution à l'interaction et donc d'une bonne stabilité du rendement, stabilité dans le sens statique du terme. Prenant la contribution du témoin MBB comme référence, les plus faibles valeurs de la GxE sont observées chez Heider (0.05) et Mrb5 (0.09). Par contre les valeurs, les plus élevées, sont notées chez Cyprus₁ (1.21) et Deraa (1.60) (Tableau III.10). Cyprus₁ et Deraa sont déclarées instables par contre Heider et Mrb5 sont jugées stables, sur la base de leur contribution à l'interaction génotype x milieu. Ce type de stabilité statique n'intègre, en lui-même, aucune information sur la performance de rendement génotypique.

Cependant dans le cas de la présente étude, la corrélation ($r= 0.983$, $P < 0.01$), entre les valeurs prises par la GxE et le rendement observé dans le milieu favorable, indique que la performance de rendement grain est liée à des valeurs élevées de la GxE, donc à l'instabilité. Ces résultats indiquent que le choix de génotypes stables, caractérisés par de faibles valeurs

GxE, aboutit à la réduction du potentiel de rendement grain. A l'inverse, la sélection des génotypes performants améliore le potentiel de rendement mais réduit la stabilité.

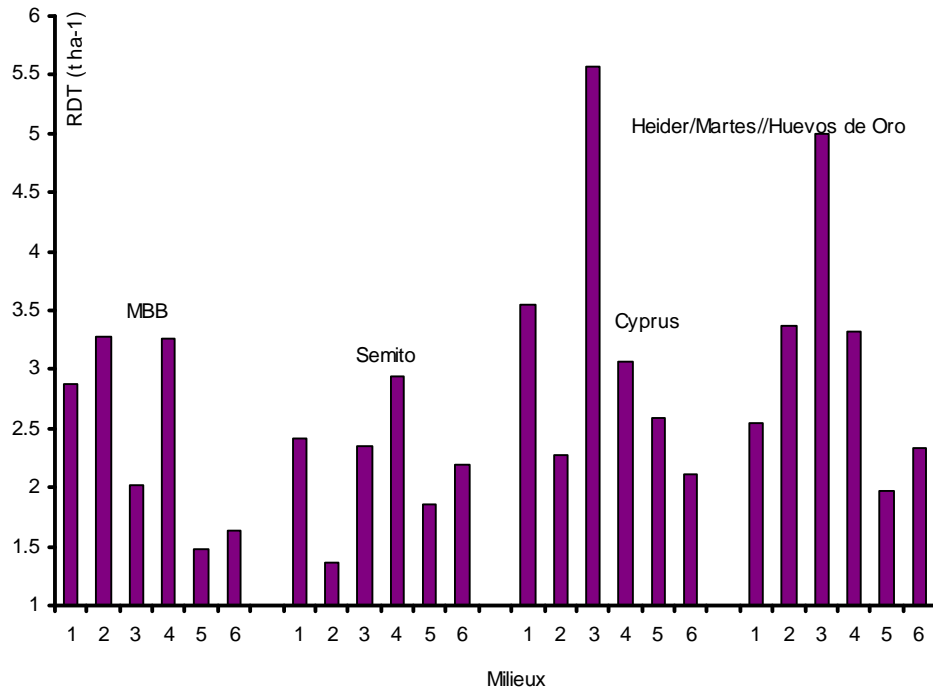


Figure III.13. Stabilité temporelle et performances de rendement des génotypes présentant des valeurs P faibles (Cyprus₁ et Heider/Martes//Huevos de Oro) et élevées (MBB et Semito).

L'utilisation de ce paramètre de stabilité, en sélection, nécessite de déterminer le poids à donner à la stabilité, relativement à la performance de rendement. Le sacrifice partiel de la stabilité au profit du rendement identifie des génotypes au comportement intermédiaire. Ceci est le cas de Heider/Martes//Huevos de Oro, ($G \times E = 0.71$) comparativement aux génotypes Cyprus₁ ($G \times E = 1.21$) et Deraa ($G \times E = 1.60$), instables et les génotypes stables, Heider ($G \times E = 0.05$) et Mrb₅ ($G \times E = 0.09$) (Figure III.14).

L'écovalence W_i

L'écovalence est une autre méthode de mesure de la contribution génotypique à l'interaction. Une valeur W_i nulle ou proche de zéro est indicatrice de la stabilité, les valeurs W_i élevées sont indicatrices de l'instabilité. Les génotypes Mrb₁₆/Ente//Mario, Belikh₂ et Heider se distinguent par de faibles valeurs W_i , ils sont stables. Par contre les valeurs élevées de W_i sont

notées chez Cyprus₁ et Deraa, qui sont, de ce fait, instables (Tableau III.10). Comme la GxE, Wi ne cumule pas l'information de la performance et de la stabilité. La corrélation entre les valeurs Wi et le rendement grain du milieu favorable est positive ($r = 0.691$, $P < 0.01$) suggérant que les génotypes performants sont relativement instables. L'utilisation de ce paramètre de stabilité en sélection engendre les mêmes problèmes que celles mentionnées pour la sélection sur la base de la GxE, dont entre autre le poids à donner à la stabilité relativement à la performance de rendement grain.

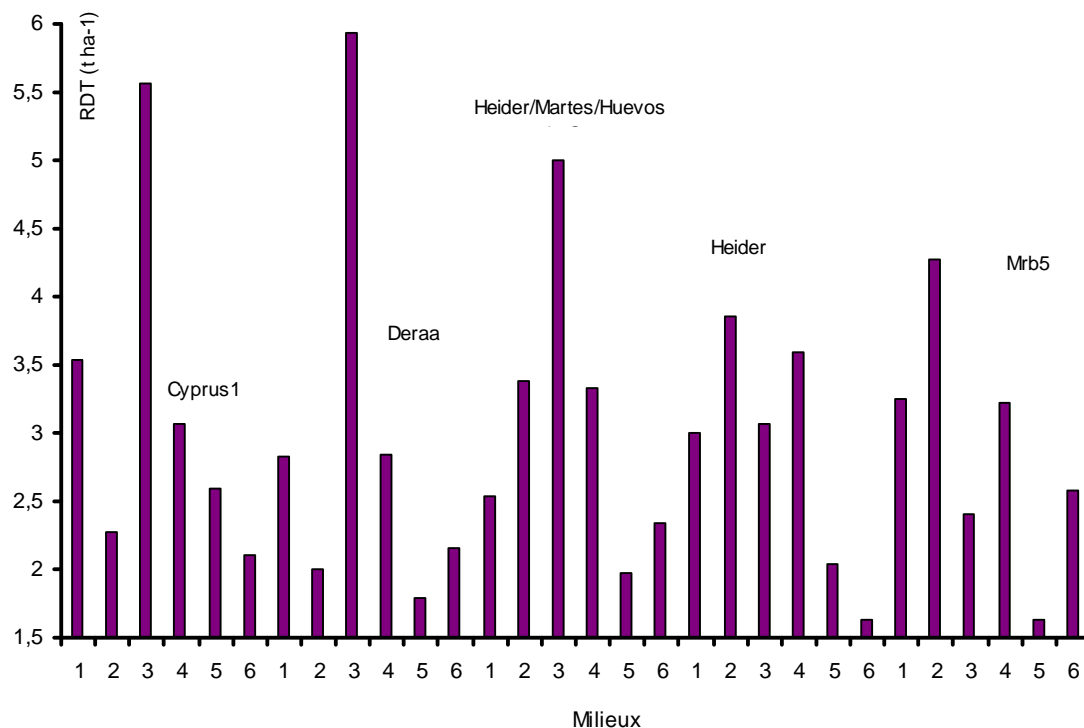


Figure III.14. Variations des performances de rendement des génotypes contribuant fortement (Cyprus₁ et Deraa), moyennement (Heider/Martes//Huevos de Oro) et faiblement (Mrb₅ et Heider) à l'interaction génotype x milieu (GxE).

Les indices de classement des performances de rendement grain

La statistique $S_i^{(2)}$ représente la variance des classements du rendement génotypique. Les génotypes stables, d'après ce paramètre, sont ceux qui maintiennent un classement plus ou moins constant dans les différents milieux (Becker et Léon, 1988). Ils ont donc une faible variance de classement, mais pas forcément un bon classement, qui est un indicateur des performances génotypiques. L'indice $S_i^{(2)}$ classe Adamillo/Duilio//Semito ($S_i^{(2)} = 28.57$) et Cyprus₁ ($S_i^{(2)} = 24.97$) comme génotypes instables et Mrb16/Ente/Mario ($S_i^{(2)} = 8.97$) comme génotype très stable (Tableau III.11). En effet sur les 6 milieux, le classement des performances de rendement

de Adamillo/Duilio// Semito varient de 1 à 15, celui de Cyprus₁ varie de 1 à 13 ; comparativement au classe de Mrb16/ Ente//Mario qui varie de 2 à 11. La statistique $S_i^{(3)}$ représente la somme des carrés des écarts $[\sum(r_{ij} - r_i.)^2]$ des classements, relativisée par rapport à la moyenne ($r_i.$) de classements sur l'ensemble des milieux. L'indice $S_i^{(3)}$ classe, lui aussi les génotypes Adamillo/Duilio//Semito et Cyprus₁ comme étant instables. Par contre il classe, comme stables, les génotypes MBB, Semito, Beliouni et Mrb16 /Ente//Mario (Tableau III.11).

Ces résultats indiquent que la stabilité des classements est similaire à la stabilité basée sur l'interaction GxE. Elle mesure la capacité du génotype à garder un classement constant dans différents milieux, donc contribue peu à l'interaction, sans toutefois informer sur la capacité de performance du génotype concerné. Ces deux indices sont positivement corrélés entre eux ($r = 0.831^{**}$, $P < 0.01$), et non corrélés au rendement grain des milieux favorable et contraignant. La sélection des faibles valeurs de ces indices identifie des génotypes aux faibles performances aussi bien en milieu favorable qu'en milieu contraignant.

Ceci est le cas de MBB, Semito et Belliouni. L'exception étant le génotype Mrb16/Ente/Mario qui présente de faibles valeurs de ces indices, associées à des performances intermédiaires (Tableaux, III.9 et III.10). La somme des classements de Kang (1988) sépare nettement entre les groupes identifiés par les indices de Nassar et Huehn (1987), elle positionne Mrb16/Ente/Mario dans la classe stable et classe MBB, Semito et Beliouni comme instables (Tableau III.11). L'utilisation de ces indices en sélection, dans les conditions de la présente étude, privilégie la stabilité au détriment du potentiel de rendement.

Les statistiques non paramétriques de Fox *et al.*, (1990) décrivent la fréquence des classements des performances génotypiques. Elles indiquent que Heider/Martes//Huevos de Oro se classe parmi les TOP dans 67% des milieux testés. Il est suivi par Adamillo/Duilio//Semito, Cyprus₁, Mrb16/ Ente//Mario et Daki, qui se classent parmi les TOP dans 50% des milieux (Tableau III.11). Ces résultats indiquent que Heider/Martes//Huevos de Oro montre une plus grande stabilité et adaptation au milieu comparativement au reste des génotypes testés. Mrb16/Ente//Mario apparaît comme étant plus risqué efficient dont le sens où il ne se classe pas du tout parmi les BOT (Tableau III.11). Les génotypes indésirables sont MBB, Semito, Beliouni et à degré moindre Deraa, qui se classent le plus souvent parmi les BOT (Tableau III.11).

La régression conjointe

Finlay et Wilkinson (1963) mentionnent que le coefficient de régression est un important indicateur de l'adaptation génotypique. Un coefficient de régression égal à 1.0, indique une stabilité moyenne. Lorsque ce coefficient est associé à un haut rendement, le génotype en question a une adaptation large. Lorsque ce coefficient est associé à un faible rendement, le génotype en question n'est pas adapté aux conditions de production, il est indésirable. Lorsque

le coefficient prend des valeurs qui dévient significativement au dessus de l'unité, il est révélateur de la sensibilité génotypique à l'amélioration de la fertilité du milieu (réponse), sensibilité associée à une stabilité au dessous de la moyenne. Le coefficient de régression, dont la valeur est inférieure à l'unité, représente les génotypes résistants aux changements des conditions de production et présentant une stabilité au dessus de la moyenne. Les génotypes dont le $b > 1$ et qui présentent un rendement grain élevé, sont spécifiquement adaptés aux milieux favorables ; ceux dont le $b < 1$ le sont pour les milieux contraignants (Finlay et Wilkinson, 1963).

La régression conjointe indique que le génotype Adamillo/Duilio//Semito répond favorable à l'amélioration de la fertilité du milieu, suite à la valeur de son coefficient de régression qui est significativement supérieure à l'unité ($b > 1$). Par contre les génotypes Massara₁ et Belikh₂, ne répondent pas à la fertilité du milieu, suite à la valeur de leur coefficient de régression qui est inférieure à l'unité ($b < 1$). Les autres génotypes ont un coefficient de régression qui ne dévie pas significativement de l'unité ($b = 1$). Ces résultats indiquent que Adamillo/Duilio//Semito est spécifiquement adapté aux milieux favorables. Par contre Massara₁ et Belikh₂, sont spécifiquement adaptés aux milieux contraignants.

Les autres génotypes montrent une adaptation générale à l'ensemble des milieux. Parmi ces derniers, Cyprus₁ et Heider/Martes//Huevos de Oro sont les plus performants en moyenne sur l'ensemble des milieux (Tableau III.10). Le comportement prédictif de ces génotypes, dans des milieux dont le potentiel varie de 0.5 à 5.0 t ha⁻¹, est indiqué en figure III.15. Massara₁ se comporte comme leader dans les milieux dont le potentiel est inférieur à 2.0 t ha⁻¹. Pour des milieux dont la fertilité est intermédiaire, dans la marge des 2.0 à 4.0 t ha⁻¹, Cyprus₁ montre une meilleure adaptation. Au-delà des 4.0 t ha⁻¹, c'est la zone d'adaptation spécifique à Adamillo/Duilio//Semito (Figure III.15).

Eberhart et Russell (1966) suggèrent l'utilisation de la résiduelle de la régression comme mesure de la stabilité des performances. Un génotype dont la résiduelle de la régression (S^2_{di}) est nulle ou proche de zéro, est stable. En effet la résiduelle de la régression est une mesure de la contribution du génotype à l'interaction. C'est une mesure des écarts de rendements par rapport à la moyenne. S^2_{di} est un paramètre de stabilité alors que le b est un paramètre de sensibilité de réponse aux changements du milieu (Eberhart et Russell, 1966).

La résiduelle de la régression (S^2_{di}) est significative pour l'ensemble des génotypes, sauf pour Belikh₂ dont les performances ne dévient pas significativement de part et d'autre de la droite moyenne. Ce génotype est stable, alors que Deraa et Cyprus₁ sont moins stables, prenant des valeurs élevées de la S^2_{di} (Tableau III.10). Belikh₂ est peu performant comparativement à Cyprus₁ et Deraa (Tableau III.9). Du point sélection, l'emploi de la S^2_{di} est similaire à celui de la contribution à l'interaction GxE et de l'écovalence W_i . Ces variances sont informatives sur la stabilité des performances mais ignorent le niveau de performances. Selon Sabaghnia *et al.*,

(2006), le génotype idéal est celui dont le rendement grain est le plus élevé, associé à un coefficient de régression qui ne dévie pas significativement de l'unité et des valeurs de W_i , $G \times E$ et s_{di}^2 nulles. De tels génotypes à succès ont tendance à avoir des valeurs du rendement et des composantes du rendement supérieures à la moyenne générale des génotypes auxquels ils sont comparés.

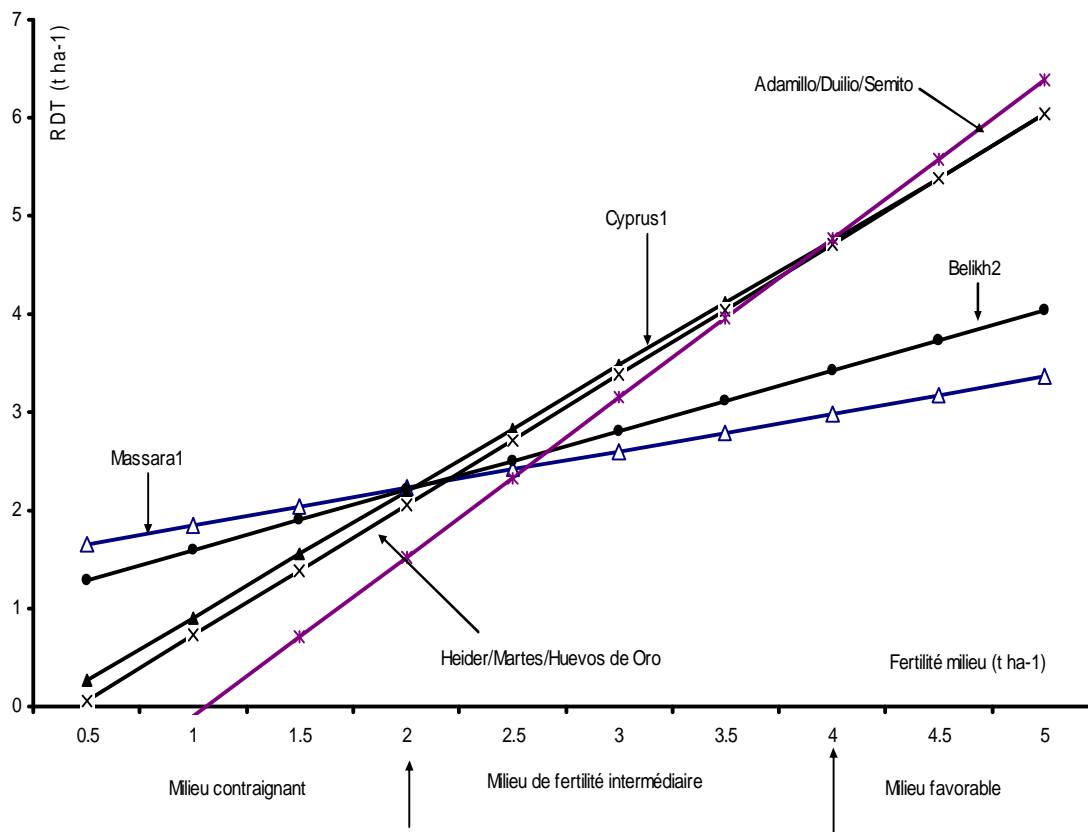


Figure III.15. Comportement prédictif des génotypes divergents pour la réponse à la fertilité du milieu (Massara₁ et Belikh₂ avec $b < 1$; Cyprus₁ et Heider/Martes/Huevos de Oro, avec $b = 1$; et Adamillo/Duilio/Semito, avec $b > 1$).

III.2.3. Similitude des indices

Chaque méthode produit une classification spécifique des génotypes (Tableau III.11). On note cependant des tendances de similitude entre certaines méthodes comparativement à d'autres. Ainsi l'analyse des coefficients de corrélation de rang de Spearman indique que l'indice S est positivement corrélé avec le coefficient de régression b_i , la contribution à l'interaction $G \times E$ et l'indice $S_i^{(2)}$ (Tableau III.12). S est négativement lié avec l'indice P_i . Ces résultats suggèrent que le coefficient de régression est similaire à l'indice S : les faibles valeurs de S correspondent

au $b < 1$, les valeurs moyennes correspondent au $b = 1$ et les valeurs S élevées correspondent au $b > 1$. De même les faibles valeurs de P_i tendent à identifier des génotypes sensibles à la contrainte hydrique telle que mesurée par l'indice S . Les valeurs S ordonnent la stabilité génotypique de manière similaire aux classements fait par la contribution à l'interaction $G \times E$ et par l'indice $S_i^{(2)}$.

Tableau III.11. Classement des génotypes évalués comme stables ou instables par les différents indices de stabilité utilisés.

Indice	Génotype stable	Génotype instable	Remarques
S	Massara1, Semito, MBB	Deraa, ADS, HMHO	tolérance stress
P	Cyprus1, HMHO	MBB, Semito	Agronomique
GxE	Heider, MRB5	Cyprus1, Deraa	stabilité statique
W	Mrb16/Ente//Mario, Belikh2, Heider	Cyprus1, Deraa	stabilité statique
$S_i^{(2)}$	Mrb16/Ente//Mario	ADS, Cyprus1	stabilité statique
$S_i^{(3)}$	MBB, Semito, Beliouni	ADS, Cyprus1	stabilité statique
S_{rang}	Mrb16/Ente//Mario	MBB, Semito, Beliouni	agro-biologique
$Stat_{Fox}$	HMHO	MBB, Semito, Beliouni Deraa	agro-biologique

Tableau III.12. Coefficients de corrélation de rangs (Pearson) entre les paramètres de mesure de la stabilité et le rendement grain dans les milieux stressant et favorable, et en moyenne de l'ensemble des milieux

Géno	S_i	P_i	GxE_i	W_i	S_{rang}	$S_i^{(2)}$	$S_i^{(3)}$	b_i	S^2_{di}	TOP	MID	LOW
S_i	1.00											
P_i	-0.67	1.00										
GxE_i	0.57	-0.32	1.00									
W_i	0.10	-0.21	0.31	1.00								
S_{rang}	-0.43	0.44	-0.25	0.50	1.00							
$S_i^{(2)}$	0.30	-0.47	0.28	0.40	-0.03	1.00						
$S_i^{(3)}$	0.51	-0.80	0.35	0.37	-0.37	0.82	1.00					
b_i	0.89	-0.50	0.33	0.10	-0.25	0.37	0.43	1.00				
S^2_{di}	0.14	-0.26	0.24	0.95	0.46	0.33	0.33	0.19	1.00			
TOP	0.40	-0.52	0.37	-0.29	-0.79	0.13	0.47	0.22	-0.21	1.00		
MID	-0.19	-0.12	-0.37	-0.23	-0.18	-0.17	-0.16	-0.18	-0.04	-0.02	1.00	
LOW	0.29	0.45	-0.27	0.11	0.82	-0.23	-0.55	-0.13	0.10	-0.70	-0.23	1.00
RDT_{Favo}	0.93	-0.75	0.71	0.07	-0.50	0.36	0.58	0.76	0.12	0.53	-0.09	-0.39
RDT_{stress}	0.13	-0.54	0.49	0.00	-0.26	0.15	0.33	-0.17	-0.03	0.48	0.00	-0.26
RDT_{Moy}	0.71	-0.99	0.34	0.20	-0.44	0.49	0.80	0.56	0.26	0.55	0.10	-0.45

S_i = indice de la sensibilité à la contrainte, P_i = indice de la supériorité génotypique, GxE_i = contribution à l'interaction, W_i = écovolence, $S_i^{(2)}$ = indice de stabilité de Nassar et Huehn, $S_i^{(3)}$ = indice de stabilité de Nassar et Huehn, S_{rang} = somme des rangs de Kang, b_i = coefficient de régression, S^2_{di} = résiduelle de la régression, Top, MID, BOT = statistiques de Fox et al. (1990)

L'indice P_i est négativement lié aux valeurs des indices $S_i^{(3)}$ et TOP ainsi qu'avec les rendements des milieux extrêmes et la moyenne des rendements de l'ensemble des milieux testés (Tableau III.12). Les génotypes stables selon l'indice P_i présentent des valeurs de classements élevées pour les indices $S_i^{(3)}$ et TOP. La contribution à l'interaction $G \times E$ n'est pas

liée à aucun des indices étudiés. Par contre l'écovalence est positivement liée à la résiduelle de la régression (S^2_{di}). La somme des classements de Kang est positivement liée avec le classement LOW et négativement avec le classement TOP (Tableau III.12). Les génotypes qui tiennent la tête de classe selon l'indice de Kang (faibles valeurs de S_{rang}), se classent moins parmi les LOW (faibles valeurs de LOW) et plus parmi les TOP (valeurs TOP élevées). L'indice $Si^{(3)}$ est positivement lié à l'indice $Si^{(2)}$ et négativement lié à LOW.

Les fortes variances de classements ($Si^{(2)}$) fournissent la même information que la somme des écarts de classements relativisés par rapport à la moyenne des classements calculée sur l'ensemble des milieux ($Si^{(3)}$). Les génotypes faiblement classés parmi les LOW se caractérisent par des valeurs élevées de l'indice $Si^{(3)}$. Les indices S_i , $G \times E$, $Si^{(3)}$, b_i et TOP sont positivement corrélés avec le classement des rendements du milieu favorable et avec les moyennes des rendements sur l'ensemble des milieux. Par contre P_i est négativement lié à ces rendements (Tableau III.12). Pour mieux appréhender les relations existantes entre les différents indices, une analyse en composantes principales a été réalisée à partir de la matrice des classements des génotypes sur la base des valeurs prises par les indices de stabilité (Figure III.16).

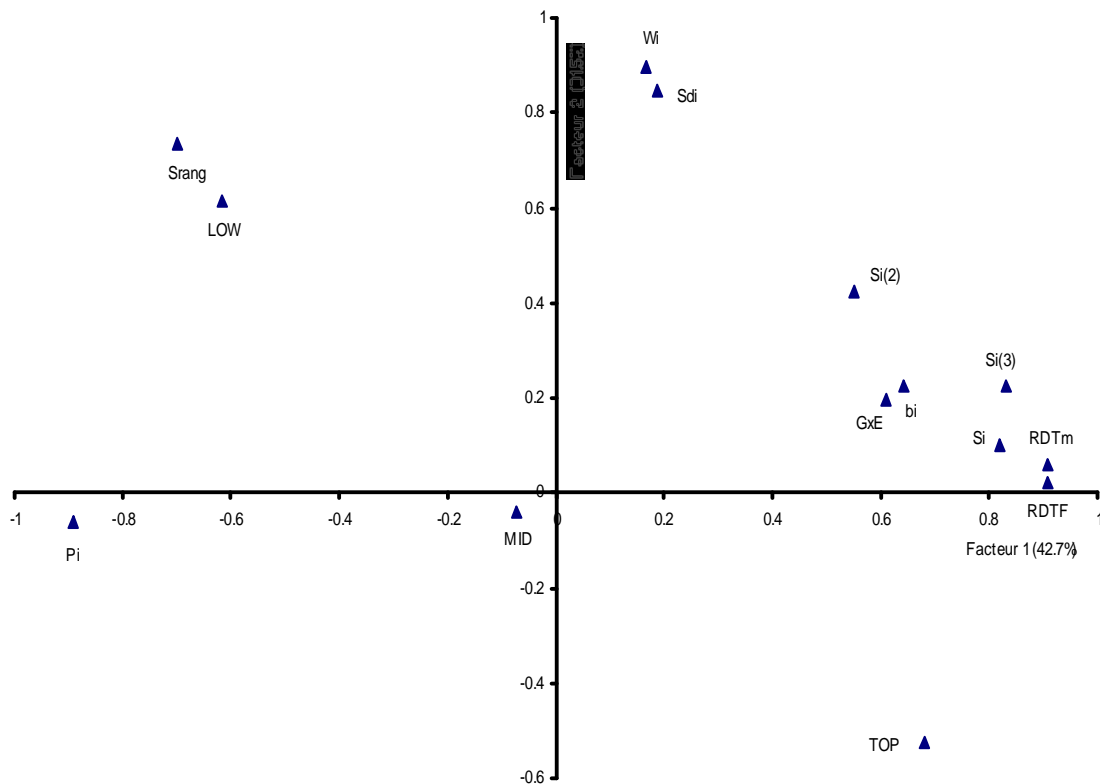


Figure III.16. Similitude des différents indices de mesure de la stabilité des performances génotypiques de blé dur

Les deux premiers facteurs ou composantes principales expliquent 74.2% (42.7 et 31.5 % respectivement pour les PC₁ et PC₂) de la variation contenue dans la matrice des données soumises à l'analyse. Le biplot groupe les indices selon le type de stabilité. La stabilité dynamique est représentée par l'axe 1, alors que la stabilité statique est représentée par l'axe 2 (Figure III.16). Le long de l'axe 1, s'opposent le classement fait sur la base de l'indice P_i aux classements basées sur les indices S, b, Si⁽²⁾, Si⁽³⁾, GxE. Ces derniers indices de stabilité se groupent avec le rendement du milieu favorable et la moyenne des rendements sur l'ensemble des milieux ou effet moyen génotype.

Ce résultat indique que la stabilité des performances basée sur les faibles valeurs de classement de P est similaire à celles définies sur la base des valeurs élevées de classement des indices S, b, Si⁽²⁾, Si⁽³⁾, et GxE (Figure III.16). L'écovalence et la résiduelle de la régression sont des indices de stabilité statique. Suite à leur similitude de classement des génotypes, l'utilisation de l'un remplace l'autre. La somme des classements de Kang (1988) et les indices de Fox *et al.*, (1990) tiennent des deux axes et donc représentent un juste milieu entre stabilité statique et stabilité dynamique. Les faibles valeurs de la somme des classements sont similaires aux valeurs de classement élevées dans la fraction TOP (Figure III.16).

III.2.4. Facteurs explicatifs de l'interaction

La culture de blé est sensible aux stress, tout le long de son cycle, avec une variation de cette sensibilité selon les stades végétatifs (Araus *et al.*, 2002). La composante du rendement qui est en cours de formation active, au moment de l'avènement du stress, est la plus affectée; sa variation est la cause de l'interaction (Entz et Fowler, 1988). En l'absence de compensation entre composantes, la culture est inapte à récupérer et se rétablir (Duggan *et al.*, 2000). La réaction de la culture aux changements des conditions de croissance du milieu (stress) se manifeste à travers la variation du nombre d'épis montants par unité de surface, du nombre de grains par épi, dont le produit donne le nombre de grains par m² et du poids moyen du grain (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1999). L'absence de stress, du semis jusqu'au stade épiaison, assure l'expression du potentiel de nombre de grains produits par unité de surface. L'absence de stress au cours du remplissage assure l'expression du poids du grain potentiel.

Sur les hauts plateaux, le nombre de talles herbacées émises dépasse de loin celui des épis montants, suggérant que le stress débute le plus souvent dès le stade montaison. En effet le démarrage de la croissance active à la sortie de l'hiver contribue à la consommation rapidement de l'eau stockée dans le sol. L'intensité du stress, subi par la culture, est alors dépendante des événements pluvieux du printemps- début été (Chenaffi *et al.*, 2006). Le stress précoce affecte la capacité de tallage -épis de la plante, suite à la forte mortalité des talles herbacées (Abbassenne *et al.*, 1998 ; Domitruk *et al.*, 2000). Le poids du grain est affecté par les stress de

fin de cycle : déficit hydrique et hautes températures, qui sont plus fréquents sur les hauts plateaux (Abbassenne *et al.*, 1998 ; Bahlouli *et al.*, 2005 ; Chenaffi *et al.*, 2006).

Face à une forte réduction du nombre d'épis, la plante compense par une amélioration du poids du grain, lorsque les conditions de remplissage sont plus ou moins favorables. Cependant cette augmentation du poids du grain n'est jamais assez forte pour compenser les pertes du rendement dues à la baisse du nombre d'épis (Bahlouli *et al.*, 2006). La résultante est que le rendement grain est fortement lié au nombre de grains produits par unité de surface et à un moindre degré au poids moyen du grain (Abbassenne *et al.*, 1998 ; Bahlouli *et al.*, 2005 ; Chenaffi *et al.*, 2006). La réaction différentielle ou plasticité différentielle des génotypes vis-à-vis de ces stress est à l'origine de la présence de l'interaction génotype x milieu. Elle explique aussi la différence de contribution des génotypes à l'interaction : plus forte contribution des génotypes sensibles et contribution réduite chez les génotypes plastiques.

L'étude des effets directs et indirects de trois variables souvent liées au rendement, indique que, quelque soit l'année, le nombre de grains m^{-2} reste la composante la plus déterminante du rendement grain (Tableau III.13). L'effet direct du poids de 1000 grains est certes significatif mais il est moins important comparativement à celui du nombre de grains par m^{-2} ; devenant, certaines campagnes, très faible. Alors que l'effet direct de la hauteur n'atteint le seuil de signification qu'une année sur six (Tableau III.13). L'effet indirect du nombre de grains m^{-2} via le poids de 1000 grains et celui du poids de 1000 grains via le nombre de grains m^{-2} sont négatifs, suggérant une compensation entre ces deux composantes.

La compensation est variable selon les génotypes. A titre d'exemple, le poids de 1000 grains compense d'un gramme (augmente d'un gramme) la diminution du NGM^2 de 531, 279, 490, 325 et 213 grains m^{-2} , respectivement chez Cyprus₁, Waha, Boussalam, MBB et Mrb₅ (Figure III. 17). Ainsi par exemple, le rendement observé de ces variétés correspondant au NGM^2 max est de 5.6, 3.1, 5.0, 2.9, 4.3 t ha^{-1} . Le poids de 1000 grains correspondant est de 24.1, 24.6, 26.9, 24.0 et 24.0. Au cours de l'année la plus défavorable à l'expression du NGM^2 (NGM^2 min), le rendement observée était de 2.1, 1.8, 2.3, 1.6 et 1.6 t ha^{-1} , respectivement pour les mêmes génotypes avec un poids de 1000 grains correspondant de 52.8, 54.1, 43.9, 45.4, et 35.8 g.

Dans le cas où les génotypes en question ne font pas intervenir la compensation entre les deux composantes, le rendement grain attendu, pour le NGM^2 min et le poids de 1000 grains correspondant au NGM^2 max, est de 1.0, 0.9, 1.4, 0.9 et 1.1 t ha^{-1} . En faisant varier le poids de 1000 grains pour compenser la baisse du NGM^2 , les génotypes en question minimisent la baisse du rendement. Cette minimisation du rendement grain est équivalente à 20.6, 3.4, 18.2, 26.6 et 12.6 % du rendement max de chaque variété.

Tableau III.13. Effets directs (en gras) et indirects (italique) des variables déterminantes du rendement grain par campagne

	NGM ²	PMG	HT	r
2000/2001				
NGM ²	0.809**	-0.388	---	0.421 ^{ns}
PMG	-0.320	0.983**	---	0.663**
2001/02				
NGM ²	1.075**	-0.090	-0.010	0.975**
PMG	-0.432	0.224*	-0.009	-0.217 ^{ns}
HT	0.206	-0.040	-0.051*	0.115 ^{ns}
2002/03				
NGM ²	1.055**	-0.082	---	0.973**
PMG	-0.376	0.229*	---	-0.147 ^{ns}
2003/04				
NGM ²	1.230**	-0.505	---	0.725**
PMG	-0.739	0.841**	---	0.102 ^{ns}
2004/05				
NGM ²	1.173**	-0.302	---	0.871**
PMG	-0.624	0.567**	---	-0.057 ^{ns}
2005/06				
NGM ²	1.037**	-0.209	---	0.828**
PMG	-0.377	0.573**	---	0.196 ^{ns}

NGM²= nombre de grains par m², PMG = poids de 1000 grains, HT = hauteur de la plante, r = coefficient de corrélation entre les variables et le rendement ; ns,*, ** = corrélation non significative et significative au seuil de 5 et 1% , respectivement ; *, ** = effet direct significatif au seuil de 5 et 1%.

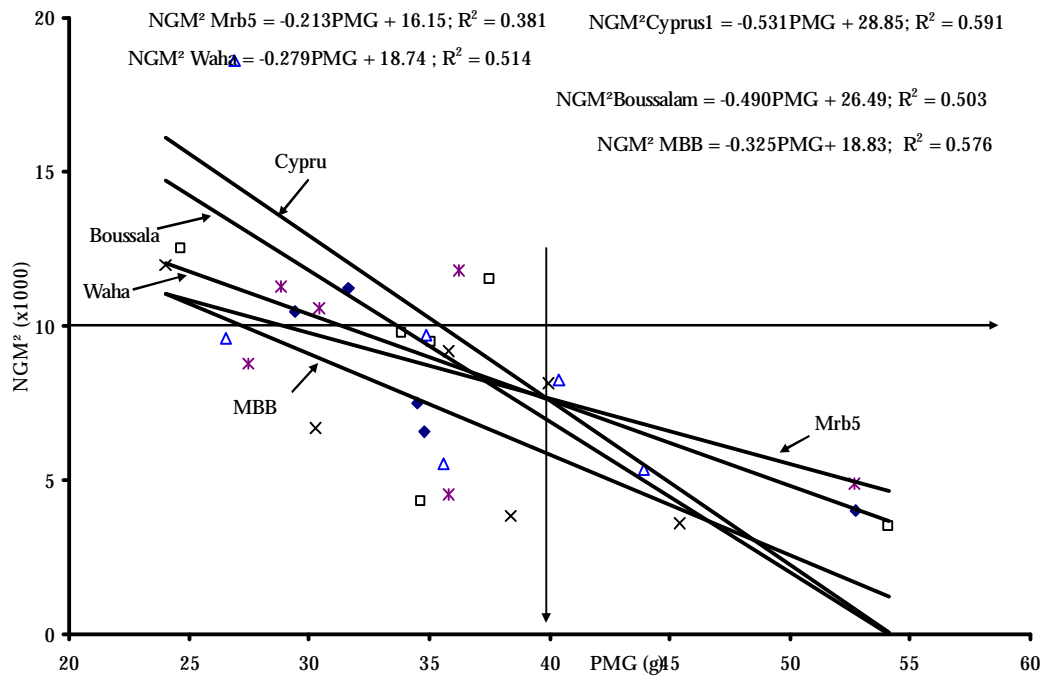


Figure III.17. Effet de compensation entre le NGM² (x1000 grains m⁻²) et le PMG (g) chez différentes variétés.

Dans les milieux favorables à l'expression du NGM^2 (NGM^2 max), si les géotypes arrivent à exprimer leur PMG maxi, on obtient le rendement potentiel (Figure III.18). Ce potentiel exprimé est variable selon les géotypes. Il est très élevé pour Cyprus1, et pratiquement égale au rendement correspondant au NGM^2 max pour Mrb5. Ceci indique la variabilité des réponses des géotypes de blé dur à la variation des conditions de croissance. Cette variabilité des réponses est une des causes de l'interaction.

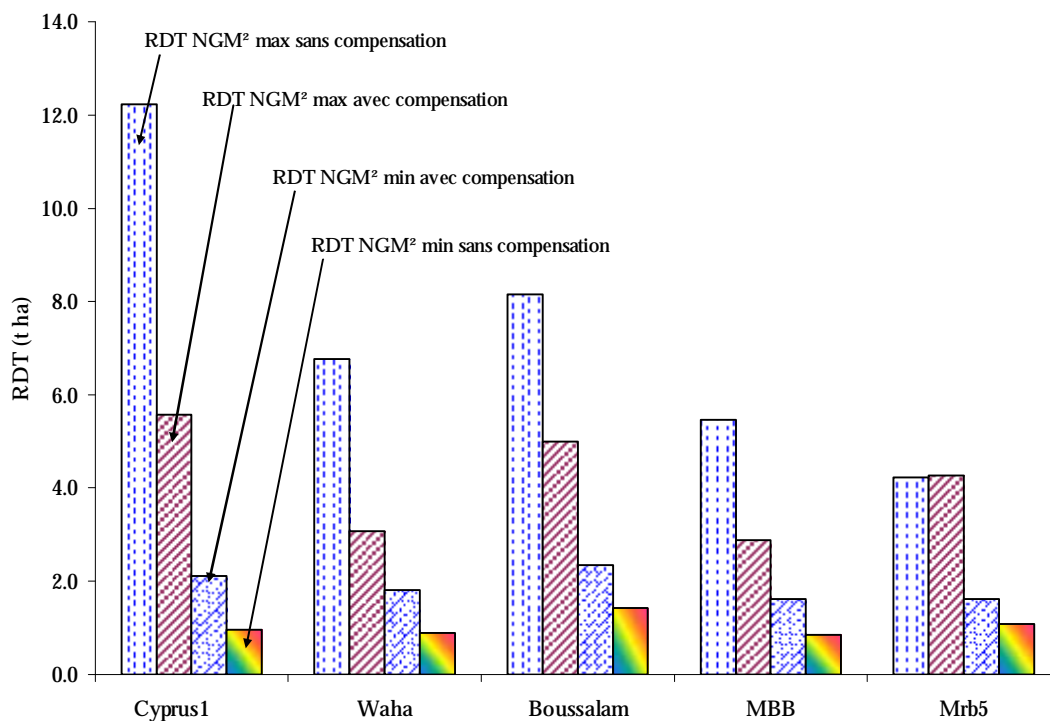


Figure III.18. Variation du rendement grain en fonction de la variation du NGM^2 avec ou sans compensation du PMG pour différents géotypes de blé dur testés.

L'interaction est une importante source de variation des performances. Les sélectionneurs éprouvent des difficultés pour sélectionner des géotypes réguliers. De ce fait, les physiologistes préconisent l'utilisation de plusieurs indices de mesure de la stabilité des performances. Ces indices forment deux groupes ceux mesurant la stabilité statique et ceux qui représentent la stabilité agronomique. La stabilité statique n'est pas toujours acceptée en sélection, où l'objectif est d'augmenter le potentiel des performances. La stabilité agronomique ou dynamique est plus désirable dans ce cas (Becker et Léon, 1988). Un géotype stable dans ce sens est celui qui contribue le moins à l'interaction.

CONCLUSIONS

L'analyse des données de l'étude du comportement variétal indique des différences de comportement. Pour un même caractère les génotypes évalués présentent des valeurs très différentes, notamment pour les caractères qui sont liés à la performance, tels que le nombre et le poids des épis, la biomasse aérienne, la hauteur du chaume qui est le siège de stockage des assimilés transférables vers les grains. L'expression de ces variables dans un lieu donné est susceptible de changer dans un autre lieu. Il est suggéré d'uniformiser le matériel végétal sélectionné pour la durée de la phase végétation et la hauteur du chaume, et si possible pour le nombre d'épis pour éviter des différences trop fortes qui induisent l'interaction génotype x milieu. Les résultats indiquent aussi que sous stress de fin de cycle, la biomasse accumulée au stade épiaison n'est pas un indicateur fidèle de celle qui s'accumule à maturité. La régression des talles tardives est liée au degré de sensibilité des variétés vis-à-vis des stress abiotiques prévalent au cours de la phase de remplissage du grain, dont notamment l'élévation brusque de la température de l'air et le manque d'eau.

Sous les conditions de croissance spécifique à cette campagne, on note aussi des différences de date à partir de laquelle débute le transfert des assimilés vers les grains (15 à 27 jours après l'épiaison), et des différences de quantités d'assimilés transférées effectivement (12.7 à 43.8% du RDTM). Le suivi du remplissage du grain montre que seules les variétés Korifla et Gaviota's' ont atteint leur maturité physiologique sous les conditions climatiques de cette campagne. Les autres variétés ont mûri prématurément, suite à l'effet des stress hydrique et thermique, qui a réduit la durée de la phase de remplissage à moins de 15% de la durée du cycle. Ces résultats suggèrent que la précocité d'épiaison, la capacité de translocation des assimilés, le nombre et le poids des épis m^{-2} sont des caractéristiques désirables à cumuler chez un génotype donné pour avoir un haut rendement en grain.

L'analyse des données de la stabilité temporelle indique que chaque méthode suggère une classification spécifique des génotypes. On note cependant un degré de ressemblance entre certaines méthodes. La stabilité des performances basée sur les faibles valeurs de classement de P est similaire à celles définies sur la base des valeurs élevées de classement des indices S, b, $Si^{(2)}$, $Si^{(3)}$, et GxE. L'écovalence et la résiduelle de la régression sont des indices de stabilité statique, l'utilisation de l'un remplace l'autre. La somme des classements de Kang (1988) et les indices de Fox *et al.*, (1990) représentent une moyenne entre stabilité statique et stabilité dynamique ou agronomique. Les indices P et TOP identifient deux génotypes performants et stables : Cyprus₁ et Heider/Martes//Huevos de Oro. Dans le cas où la stabilité prime au détriment de la performance, l'écovalence est plus utile comme indice de stabilité. W identifie Belikh₂ et Mrb16/Ente//Mario comme génotypes stables.

Références bibliographiques

- Abbassenne F., Bouzerzour H., Hachemi L. (1998). Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride. Ann. Agron. INA, 18: 24-36.
- ADE. (1999). Evaluation de la politique communautaire du blé dur. Rapport final. Volume I: Rapport Principal décembre 1999: E-mail: ade@ade.be Web: <http://www.ade.be>
- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (2006). Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau (Sécheresse et agriculture). Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72 p.
- Amokrane A., Bouzerzour H., Benmahammed A., Djekoun A. (2002). Caractérisation des variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. Sciences et Technologie, Université Mentouri Constantine. Numéro special D, 33-38.
- Angus J.F., Van Herwaarden V.F. (2001). Increasing water use and water-use efficiency in dryland wheat. *Agron. J*, 93: 290-298.
- Annicchiarico P. (2002). Genotype by environment interactions: Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. FAO Plant Production and Protection Paper, N° 174, FAO, Rome, 159 p.
- Annicchiarico P., Bellah F., Chiari T. (2005). Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop Sci*, 45: 1741-1749.
- Araus J.L., Slafer G.A., Reynolds M.P., Royo C. (2002). Plant breeding and water relations in C3 cereals: what should we breed for? *Annals of Botany*, 89: 925-940.
- Araus J.L., Villegas., Aparicio D.N., Garcí a del Moral L.F., El Hani S., Rharrabti Y., Ferrio J.P., and Royo C. (2003). Environmental Factors Determining Carbon Isotope Discrimination and Yield in Durum Wheat under Mediterranean Conditions. *Crop Sci*, 43: 170-180.
- Asseng S., Turner N.C., Botwright T., Condon A.G. (2003). Evaluating the impact of a trait for increased specific leaf area on wheat yields using a crop simulation model. *Agron. J*, 95: 10-19.
- Bahlouli F., Bouzerzour H., Benmahammed A., Hassous K.L. (2005). Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi arid conditions. *Pakistan Journal of Agronomy*, 4: 360-365.
- Bahlouli F., Bouzerzour H., Benmahammed A., Hassous A. (2006). Etude des liaisons entre le rendement, la durée de vie de la feuille étendard, la vitesse de remplissage et la remobilisation des assimilats de la tige du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. *Annales INA*, 27: 15- 36.
- Bahlouli F., Bouzerzour H., Benmahammed A. (2008). Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 12(1): 31-39.
- Baldy C. (1992). Effets du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en méditerranée occidentale. A l'occasion des colloques n° 64 : Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne : Diversité génétique et amélioration des variétés. (Montpellier, France, 15-17 décembre 1992). Eds. Ben Salem M et Monneveux P. Ed. INRA, Paris 1993. pp 83-99.

- Bataillon T., Chantret N., Cenci A., Gautier M.F., Joudrier Ph., Haudry A., Muller M.H., Poncet C., Prospero J.M., Ronfort J., Roumet P., Santoni S., Thuillet A.C., David J. (2006). Impacts d'événements démographiques et sélectifs sur la diversité des plantes cultivées: apports de l'analyse du polymorphisme allié à la théorie de la coalescence. *Les Actes du BRG*, 6: 243-257.
- Bajji M., Kinet J.M., Stanley L. (2002). The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance in durum wheat. *Plant. Growth. Regul.*, 36: 61-70.
- Becker H.C., Leon J. (1988). Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding*, 101: 1-23.
- Bedrani S. (2004). L'alimentation de rue en Algérie : quelques réflexions sur la base d'une enquête visuelle rapide. *Alger. Options Méditerranéennes*, 36 : 25-46.
- Belhassen E., This D., Monneveux Ph., (1995). L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. Synthèse. *Cahier agriculture*, 4: 251-261.
- Belkherchouche H., Fellah S., Bouzerzour H., Benmahammed A., Chellal N. (2008). Vigueur de la croissance, translocation et rendement en grains du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi arides. *Revue Université de Biskra*, 7: 25-30.
- Ben Abdallah N., Ben Salem M. (1992). Paramètres morphophysiologiques de sélection pour la résistance à la sécheresse des céréales. A l'occasion des colloques n°64 : Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne : Diversité génétique et amélioration des variétés, (Montpellier, France, 15-17 décembre 1992). Eds. Ben Salem M et Monneveux P. Ed. INRA, Paris 1993. pp173-190.
- Benbelkacem A., Kellou K. (2001). Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) cultivées en Algérie. *Options méditerranéennes*, 6: 105-10.
- Benchohra B., Khelloufi B. (2000). Impact du risque climatique sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride : approche éco-physiologique. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 11(1): 45-51.
- Ben salem M., Acévêdo E., Srivastava J.P. (1991). La sélection des céréales dans les zones arides. Synthèse. *Sécheresse*, 2: 17-20.
- Blum A. (1988). *Plants breeding for stress environments*. Boca Raton, 4, CRC, Press. Floride, USA. 223p.
- Blum A. (1993). Selection for sustained production in water-deficit environments, in : *International Crop Science I*, CSSA, Madison (WI, USA), P343-346.
- Blum A., Pnuel Y. (1996). Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in a mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.*, 41: 799-810.
- Boubaker M. (1995). Potential of variety blends in wheat under variable environmental conditions. *Agricultural Mediterranean*, 125: 362-7.
- Bouzerzour H., Monneveux P. (1992). Analyses des facteurs de stabilité du rendement de l'orge dans les conditions des hauts plateaux algériens. A l'occasion des colloques n°64 : Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne : Diversité génétique et amélioration des variétés, (Montpellier, France, 15-17 décembre 1992). Eds. Ben Salem M et Monneveux P. Ed. INRA, Paris 1993. pp 205-15.
- Bouzerzour H., Benmahammed A. (1994). Environmental factors limiting barley grain yield in the high plateaus of eastern Algeria. *Rachis*, 12: 11-14.

- Bouzerzour H., Dekhili M. (1995). Heritabilities, gains from selection and genetic correlations for grain yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crops Research*, 41: 173-178.
- Bouzerzour H., Djekoun A. (1996). Variabilité des rendements de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi aride d'altitude. I. Interaction génotype x lieu. *Revue des Sciences et Technologie Université de Constantine*, 7: 16-18.
- Boyd W.J.R., Li C.D., Grime C.R., Cakir M., Potipibool S., Kaveeta L., Men S., Jalal Kamali M.R., Barr A.R., Moody D.B., Lance R.C.M., Logue S.J., Raman H., Read B.J. (2003). Conventional and molecular genetic analysis of factors contributing to variation in the timing of heading among spring barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes grown over a mild winter growing season. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54: 1277-1301.
- Bozzini A. (1988). Origin, distribution, and production of durum wheat in the world. In: Fabriani G. et Lintas C. (éd). *Durum: Chemistry and Technology*. AACC (American Association of Cereal Chemists), Inc. St. Paul, Minnesota, États-Unis. pp 1-16.
- Brancourt-Hulmel M., Biarnès-Dumoulin V., Denis JB. (1997). Point de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes. *Elsevier/Inra. Agronomie*, 17: 219-246.
- Brancourt-Hulmel M., Lecomte C., Meynard J.M. (1999). A diagnosis of yield-limiting factors on probe genotypes for characterizing environments in winter wheat trials. *Crop Sci*, 39: 1798-1808.
- Brancourt-Hulmel M. (2000). Sélection variétale et milieu Sélection pour l'adaptation au milieu et prise en compte des interactions génotype/milieu. *Dossier : Agriculture, recherche et territoire*, 7(6): 504-11.
- Brancourt-Hulmel M., Lecomte C. (2003). Effect of environmental variates on genotype x environment interaction of winter wheat : a comparison of biadditive factorial regression to AMMI. *Crop Sci*, 45: 608-17.
- Brancourt-Hulmel B., Doussinault G., Lecomte C., Berard P., LE Buanec B., Trottet M. (2003). Genetic improvement in agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci*, 43: 37-45.
- Bruckner P.L., Frohberdg R.C. (1987). Stress tolerance and adaptation in spring wheat. *Crop Science.*, 27: 31-36.
- Cadi A. (2005). Caractérisation des zones céréalières potentielles à travers le nord d'Algérie. *Céréaliculture N°44-1er Semester* : 36-39.
- Cattivelli., Crosatti C., Grosi M., Portesi A., Rizza F., Stanca AM. (1995). Relationship among the modifications of gene expression induced by ABA, drought and gold stress in barley. In : *Reproductive Biology and Plant Breeding. XIIIth EUCARPIA Congress 6-11 juillet 1992, Angers, France.*
- Ceccarelli S., Grando S., Impiglia A. (1998). Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, 103: 307-318.
- Chaker A., Brinis L. (2005). Etude de l'impact de deux chocs thermiques (froid à 10°C et chaleur à 40°C) sur l'intégrité membranaires du blé dur. *Céréaliculture N°44- 1^{er} trimestre*: 30-35.

- Chantret N., Salse J., Sabot F., Rahman S., Bellec A., Laubin B., Dubois I., Dossat C., Sourdille P., Joudrier Ph., Gautier M.F., Cattolico L., Beckert M., Aubourg S., Weissenbach J., Caboche M., Bernard M., Leroy Ph and Chalhou B. (2005). Molecular Basis of Evolutionary Events That Shaped the Hardness Locus in Diploid and Polyploid Wheat Species (*Triticum* and *Aegilops*). communiqué de presse. Paris, le 4 avril 2005 / INRA - CNRS - Université Evry - Genoscope-CNS - Génoplatte - Genopole.
- Chennafi H., Aidaoui A., Bouzerzour H., and Saci A. (2006). Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian J. Plant Sci*, 5: 854-860.
- CIC. (2002). International Grains Council. 2002. World Grains Statistics, pp 13-17.
- Clarke J.M., Depauw R.M., Townley-Smith T.F. (1992). Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. *Crop Sci*, 32: 723-728.
- Clarke J.M., Norvell W.A., Clarke F.R., Buckley T.W. (2002). Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. *Can. J. Plant Sci. Revue Canadienne de phytotechnie*, 82: 27-33.
- Combe L., Picard D. (1994). Elaboration du rendement des principales cultures annuelles. INRA éditions, Paris. 191 p.
- Cooper M., FOX P.N. (1996). Environmental characterization based on probe and reference genotypes. In : Cooper M., HAMMER GL., eds. Plant adaptation and crop improvement. CAB International : 529-47.
- Coventry S., Sayed H., Grando S., Ceccarelli S., Baum M., Eglinton J. (2006). Understanding the adaptation of barley to the low rainfall environments of southern Australia. Breeding for success: Diversity in action. C.F. Mercer (ed). Proceedings of the 13th Australasian Plant Breeding Conference, Christchurch, New Zealand, pp 1170-1176.
- Crossa J., Gauch H.G., Zobel R.W. (2002). Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Sci*, 30: 493-500.
- Debaeke P., Cabelguenne M., Casals M.L., Puech J. (1996). Élaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : EpiPhase-BI. Elsevier / INRA. *Agronomie : agriculture and environment*, 16: 25-46.
- Debaeke P., Nolot J.M., Raffaillac D. (2006). A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agricultural Systems*, 90: 180-201.
- Demarly Y., Chalbi N. (1991). L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Paris: John Libbey Eurotext/Aupelf-Uref, pp 165-86.
- Doré C., Varoquaux F. (2006). Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées. Ed INRA. 812 p.
- Domitruk D.R., Duggan, B.L. and Fowler D.B. (2000). Soil water use, biomass accumulation and grain yield of no-till winter wheat on the Canadian prairies. *Can. J. Plant Sci*, 80: 729-738.
- Dubcovsky J., Dvorak J. (2007). Genome Plasticity a Key Factor in the Success of Polyploid Wheat Under Domestication. *Science* 316 [Issue 5833], pp 1862.

- Duggan B.L., Domitruk D.R., Fowler D.B. (2000). Yield component variation in winter wheat grown under drought stress. *Can. J. Plant Sci*, 80: 739-745.
- Dvorak J. (1998). Genome analysis in the Triticum-Aegilops alliance. In: Proc. of the 9th Int. Wheat Genetics Symp. (Ed: A.E. Slinkard). Univ. of Saskatchewan. Vol 1, 8-11.
- Eberhart S., Russell WA. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci*, 6: 36-40.
- Edmeades G.O., Bolanos J., Lafitte H.R., Rajaram S., Pfeiffer W.H., Fischer R.A. (1989). Traditional approaches to breeding for drought resistance in cereals. In: Baker F.W.G. (Ed.), *Drought Resistance in Cereals*. ICSU Press, C.A.B. International, pp 27-52.
- Ehdai B., Alloush G.A., Madore M.A., Waines J.G. (2006). Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat: I. Post anthesis changes in internode dry matter. *Crop Sci*, 46: 735-746.
- El Hafid R., Smith D.H., Karrou M., Samir K. (1998). Morphological attributes associated with early-season drought tolerance in spring durum wheat in a Mediterranean environment. *Euphytica*, 101: 273-282.
- EL Jaafri S., Lepoivre Ph., Semal J. (1995). Implication de l'acide abscissique dans la résistance du blé à la sécheresse. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, 15: 141-148.
- El Jaafari S., Qariani L., El Hadrami I., Fagroud M., Paul R. (2000). Intégration des outils biotechnologiques et agrophysiologiques., *Le blé, une plante modèle. A l'occasion de la VII^e journées scientifiques du réseau AUF « biotechnologies végétales : amélioration des plantes et sécurité alimentaire »* Montpellier, 3-5 juillet 2000. Article apparu dans « Des modèles biologiques à l'amélioration des plantes ». Editeur scientifique. Serge h. IRD Editions. Collection colloque et séminaires. Paris 2001.
- Entz M.H., Fowler D.B. (1988). Stress periods affecting productivity of no-till winter wheat in Western Canada. *Agron. J*, 80: 987-992.
- Faostat. (2005. 2007). Site des données statistiques de la FAO : www.faostat.fao.org
- Feillet P. (2000). *Le grain de blé, composition et utilisation*, INR éditions, 308p.
- Feldman M. (2001). Origin of Cultivated Wheat. In Bonjean A.P et Angus W.J (éd.). *The World Wheat Book: a history of wheat breeding*. Intercept Limited, Andover, Angleterre, pp 3-58.
- Fellah A., Benmahammed A., Djekoun A., Bouzerzour H. (2002). Sélection pour améliorer la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). *Actes de l'IAV, Hassan II (Maroc)*, 22: 161-170.
- Finlay K.W., Wilkinson G.H. (1963). The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust.J.Agric. Res*, 14: 742-54.
- Fisher R.A., Maurer R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust.J.Agric. Res*, 29: 697-912.
- Forster B., Ellis R. (2004). Genotype and phenotype associations with drought tolerance in barley tested in North Africa. *Annals of Applied Biology*, 144: 157-168.
- Foucteau V. (2001). Méta-analyse statistique : intégration de trois réseaux d'expérimentation pour améliorer l'efficacité de la sélection des variétés de tournesol. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INAPG, 175 p.

- Fox P.N., Skovmand B., Thompson B.K., Braun H., Cormier R. (1990). Yield and adaptation of hexaploid spring triticale. *Euphytica*, 47: 57-64.
- Fussel L.k., Bidinger F.R., Bieler P. (1991). Crop physiology and breeding for drought tolerance: research and development. *Field Crop Res*, 27: 183-199.
- Gallais A. (1990). Théorie de la sélection en amélioration des plantes. Collection sciences agronomiques. Ed Masson. 588 p.
- Gallais A. (1999). Les plantes transgéniques en agriculture. Intérêts et risques pour l'environnement. *L'Eurobiologiste*, 240: 23-28.
- Gallais A., Bannerot H. (1992). Amélioration des espèces végétales cultivées : objectifs et critères de sélection. INRA éditions. 759 p.
- Garcia del Moral L.F., Rharrabti Y., Villegas D., Royo C. (2003). Evaluation of grain yield and its components in durum wheat under Mediterranean conditions: an ontogenic approach. *Agron. J*, 95: 266-274.
- Gate P., Grimaud L. (1989). L'épi de blé à la floraison : un outil remarquable pour l'analyse et la prévision du nombre de grains. *Persp. Agric*, 132: 18-30.
- Gate P.H. (1995). Ecophysiologie du blé. Technique et documentation. Lavoisier, Paris, 429 p.
- Gate Ph., Giban M., Blondlot A., Braun Ph., Couleaud G., Jouy L., Laurent F., Lutton A., Vignier L. (2003). Stades du blé. Editions ITCF. 68 p.
- Gibson L.R., Paulsen G.M. (1999). Yield components of wheat grown under high temperature stress during reproductive growth. *Crop Sci*, 39: 1841-1846.
- Gitte P., Seberg O., Yde M., Berthelsen K. (2006). Phylogenetic relationships of *Triticum* and *Aegilops* and evidence for the origin of the A, B, and D genomes of common wheat (*Triticum aestivum*). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 39: 70-82.
- Grandcourt M.C., Prats J. (1970). Les céréales. 2^e édition Revue et Augmentée. Editeurs J.-B. Baillière et Fils. pp 22.
- Grandcourt M.C., Prats J. (1971). Les céréales. Ed. J.B Bailliers et Fils, 360 p.
- Hadj Youcef Taïbi H., Khaldoun A., Mekliche A. (2003). Etude comparative de la tolérance à la sécheresse de 08 variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) et de 04 variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.) Analyse de la stabilité du rendement avec étude multilocale. *Céréaliculture* N° 38: 26-30
- Hakimi M. (1993). L'évolution de la culture d'orge: Le Calendrier Climatique Traditionnel et les Données Agro-météorologiques Modernes. In: *The Agro meteorology of Rainfed Barley-based Farming Systems. Proc. Symp. WMO ICARDA*. Tunis March 1989, pp 157-166.
- Havaux M., Hernez M., Lannoye R. (1988). Correlation between heat tolerance tests. *J. Plant Phys*, 133: 550-560.
- Hebert P. (1976). Pour obtenir de haut rendement, connaître la physiologie du blé. *Fermes modernes. Le blé : céréale d'avenir*, H.S, pp 83-86.
- Hébrard J.P. (1996). Blé dur : objectif qualité, NUTRITION: des pâtes épatantes. Document édité à l'occasion du colloque : perspectives blé dur, Toulouse, Labège, 26 Novembre 1996 organisé par: ITCF-ONIC-INRA- ITCF, pp 6-7.

- Henry Y., De Buyser J. (2000). L'origine des blés. Pour la Science, Hors-série n°26, pp 60-62.
- Jones J.R., Qualset C.A. (1984). Breeding crops for environmental stress tolerance in applications of genetic engineering to crop improvement. Eds. Collins GB. And Petalino J.G. Martinus Nijhoff, Junks Publishers, pp 305-340.
- Kang M.S. (1988). A rank-sum method for selecting high-yielding, stable corn genotypes. Cereal Res. Comm, 16: 113-115.
- Kellou Rym. (2008). Analyse du marché algérien du blé dur et les opportunités d'exportation pour les céréaliers français dans le cadre du pôle de compétitivité Quali-Méditerranée. Le cas des coopératives Sud Céréales, Groupe coopératif Occitan et Audecoop. Ce Master est le numéro 93 de la série Master of Science de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier. Master of Science du CIHEAM - IAMM , n° 93. 160p.
- Kirigwi F.M., Van Ginkel M., Trethowan R., Sears R.G., Rajaram S., Paulsen G.M. (2004). Evaluation of selection strategies for wheat adaptation across water regimes. Euphytica., 135: 361-371.
- Laumont P., Erroux J. (1961). Inventaire des blés durs rencontrés et cultivés en Algérie, Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, 5 : 96.
- Lecomte C. (2005). L'évaluation expérimentale des innovations variétales Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse présentée devant L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON pour obtenir le titre de Docteur de l'INAPG. Préparée à l'Unité de Recherches sur la Génétique et l'Ecophysiologie des Légumineuses à Graines (URLEG) de l'INRA de Dijon. 173 p.
- Levitt J. (1980). Responses of plants to environmental stress. Vol II Water, radiation, salt and other stresses. 2nd ed. New York ; London ; Sydney ; San Francisco : Academic Press, 25-229.
- Lev-Yadun S., Gopher A., Abbo S. (2000). The cradle of agriculture. Science, 288: 1602-1603.
- Lilley J.M., Fukai S. (1994). Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars. III. Phenological development, crop growth and grain yield. Field Crops Res, 37: 225-234.
- Lin C.S., Binns M.R., Lefkovitch L.P. (1986). Stability analysis: where do we stand? Crop Science, 26: 894-900.
- Lin C.S., Binns M.R. (1988^a). A method of analyzing cultivar x location x year experiments: A new stability parameter. Theor. Appl. Genet, 76: 425-430.
- Lin C.S., Binns M.R. (1988^b). A superiority measure of cultivar performance for cultivar 3 location data. Can. J. Plant Sci, 68: 193-198.
- MADR. 2005. Rapports campagnes Labours Semailles/Moissons Battages, 2003/2004,2004/2005 du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Direction de la Régulation, du Développement et de la Production Agricole.
- MADR. 2006. Statistiques série B du Ministère de l'agriculture et du développement rural.
- Masle-Meynard J. (1980). L'élaboration du nombre d'épi chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse. Doc. Ing. INA Paris Grignon, 274 p.

- Mazouz L. (2006). Etude de la contribution des paramètres phéno-morphologiques dans l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans l'étage bioclimatique semi-aride. Mémoire de Majistère, Dépt. Agron. Fac. Sci, Université Hadj Lakhdar, Batna, 70 p.
- Mckey J. (1968). Species relations in *Triticum*. Proc.2nd International Wheat Genetic symposium. Hereditas2, 237-276.
- Mefti M., Bouzerzour H., Abdelguerfi A., Nouar H. (2008). Dry matter production and agronomical characteristics of perennial grass genotypes grown under drought conditions in the semi- arid climate of the Algerian high plateaus. Pakistan Journal of agronomy, 7: 138- 147.
- Mekhlouf A., Bouzerzour H. (2000). Déterminisme génétique et associations entres le rendement et quelques caractères a variation continue chez le blé dur (*Triticum durum*, Desf). Recherche agronomique (INRAA), 7: 37-49.
- Mekhlouf A., Dehbi F., Bouzerzour H., Hannchi A., Benmahammed A., Ajabi A. (2006^a). 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 Sciences, 5(4): 700-708.
- Mekhlouf A., Bouzerzour H., Benmahammed A., Hadj Sahraoui A., Harkati N. (2006^b). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. Article scientifique - Sécheresse, 17(4): 507-13
- Mekliche A., Boukecha D., Hanifi-Mekliche L. (2003). Etude de la tolérance a la sécheresse de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.).I. Effet de l'irrigation de complément sur les caractères phénologique, morphologiques et physiologiques, 24 (1,2): 97-110.
- Menad A. (2009). Contribution à l'étude de l'interaction Génotype x milieu de l'orge. Mémoire magister, INA El Harrach, 70 p.
- Merah O., Monneveux Ph., Nachit M., Deléens E. (1999). La composition isotopique du carbone, critère intégrateur du fonctionnement photosynthétique : application à l'amélioration génétique du blé dur en conditions méditerranéennes. Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures, 8(1): 37-47
- Meynard J.M. (1987). L'analyse de l'élaboration du rendement des céréales sur les essais de fertilisation. Pers. Agroc, 115: 76-83.
- Meynard J.M., David G. (1992). Diagnostic sur l'élaboration du rendement des cultures. Cahiers Agriculture, 1: 9-19.
- Monneveux Ph. (1991). Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver ? L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey. Eurotext. Paris, pp 165-186.
- Moragues M., Garcia del Moral L.F., Moralejo M., Royo C. (2006). Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin I: yield components. Field Crops Res, 95: 194-205.
- Morizet J. (1984). Essai d'amélioration de la résistance à la sécheresse du tournesol (*Helianthus annuus*) par croisements interspécifiques avec une espèce sauvage (*Helianthus argophyllus*). Agronomie, vol 4, n°6.
- Nachit M.M., Ketata H. (1986). Breeding strategy for improving durum wheat in mediterranean rainfed areas. Proceeding of 4 th International Wheat Conference, 2-9 may, Rabat, Morroco.

- Nachit MM., Monneveux P., Araus J.L., Sorrels ME. (2000). Relationship of dryland productivity and drought tolerance with some molecular markers for possible MAS in durum (*Triticum turgidum* L.var. durum). *Options méditerranéennes*, 40: 83-93.
- Nassar R., Huehn M. (1987). Studies on estimation of phenotypic stability: tests of significance for non-parametric measures of phenotypic stability. *Biometrics*, 43: 45-53.
- Nizam Uddin M., Marshall D.R. (1989). Effects of dwarfing genes on yield and yield components under irrigated and rainfed conditions in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 42: 127-134.
- Passioura J. (2004). Increasing crop productivity when water is scarce: from breeding to field management. In proceedings of the 4th International Crop Science Congress "New directions for a diverse planet" Brisbane, Australia. 12 pages, www.regional.org-au/au/cs
- Pena R.J., Pfeiffer W.H. (2005). Chapter 22. Breeding methodologies and strategies for durum wheat quality improvement. In: Conxita R., Nachit M., di Fonzo N., Araus J.L., Pfeiffer W.H & Slafer G.A. (eds.). *Durum wheat breeding: current approaches and future strategies*, Vol. 2. Food product press. pp 663-686.
- Prasil I.T., Vitamvas P., Saalbach G., Capkova V., Opatrna J., Ahmed J. (2007). WCS120 protein family and proteins soluble upon boiling in cold-acclimated winter wheat. *Journal of Plant Physiology*, 164: 1197-1207.
- Prost L., Lecomte Ch., Meynard JM., Cerf M. (2007). Conception d'un outil d'analyse du comportement de systèmes biologiques : Le cas de l'évaluation des variétés de blé tendre. *Revue électronique: Activités*, 4 (2): 30-53.
- Quarrie S.A., Steed A., Semikhodsodski A., Lebreton C., Calestani C., Clarkson D.T., Tuberosa R., Sanguineti M.C., Melchiorre R., Prioul J.L. (1995). Identification of quantitative trait loci regulating water-and nitrogen-use efficiency in wheat. In proceedings of stressnet meeting, Salsomaggiore. Sept 1995. European Commission, Luxembourg, pp 174-180.
- Quarrie SA., Stojanovic J., Pekic S. (1999). Improving drought resistance in small-grained cereals : a case study, progress and prospects. *Plant Growth Regulation*, 29: 1-21.
- Rebetzke G.J., Richards R.A., Fettel N.A., Long M., Condon A.G., Forrester R.I., Botwright T.L. (2007). Genotypic increases in coleoptile length improves stand establishment, vigour and grain yield of deep-sown wheat. *Field Crops Research*, 100: 10-2.
- Rejeb M.N., Ben Salem M. (1993). Les divers mécanismes d'adaptation à la sécheresse chez les végétaux supérieurs, cas du blé et du caroubier. *Bull. Soc. Sci. Nat. Tunisie*, 22: 49-52.
- Richards R.A., Rebtzke G.J., Van Herwaardlen A.F., Dugganb B.L., Condon A. (1997). Improving yield in rainfed environments through physiological plant breeding. *Dryland Agriculture*, 36: 254-66.
- Richards R.A., Rebetzke G.J., Condon A.G., Van Herwaarden A.F. (2002). Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci*, 42: 111-21.
- Robert D., Gate P., Couvreur F. (1993). *Les stades du blé*. Editions ITCF. 28 p.
- Romagosa I., Fox P.N. (1993). Genotype x environment interaction and adaptation. In: *Plant Breeding: Principles and Prospects*. (Hayward MD, Bosemark NO, Romagosa I, eds), Chapman & Hall, Londres, pp 373-390.
- Rose, L.W., Das M.K., Taliaferro C.M. (2008). A comparison of dry matter yield stability assessment methods for small numbers of genotypes of bermudagrass. *Euphytica*, 164: 19-25.

- Rosielle A.A., Hamblin J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *CropSci*, 21: 943-6.
- Sabaghnia N., Dehghani H., Sabaghpour S.H. (2006). Nonparametric methods for interpreting genotype x environment interaction of lentil genotypes. *Crop Sci*, 46: 1100-1106.
- Sassi K., Boubaker M. (2006). Comportement agronomique de lignées allochtones de blé dur dans un milieu semi-aride de Tunisie. *Cahiers Agricultures*, 15(4): 355-361.
- Shukla G.K. (1972). Some statistical aspects of partitioning genotype x environmental components of variability. *Heredity*, 29: 237-245.
- Simane B., Peacock J.M., Struik P.C. (1993). Differences in developmental plasticity and growth rate among droughtresistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var *durum*). *Plant soil*, 157: 155-166.
- Simmons S.R., Oelke E.A., Anderson P.M. (1995). Growth and development guide for spring wheat. University of Minnesota Agricultural Extension Service. Folder AG-FO-2547.
- Sinebo, W., Gretzmacher R., Edelbauer A. (2004). Genotypic variation for nitrogen use efficiency in Ethiopian barley. *Field Crops Res*, 85: 43-60.
- Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M'B., Zid E. (2005). Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 16(3): 225-9.
- Sofield T., Evans J., Cook M.G., Wardlaw I.F. (1977). Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust. J. Plant Physiol*, 4: 785-797.
- Sorrells M.E., Diab A., Nachit M. (2000). Comparative genetics of drought tolerance. *Options méditerranéennes série A (Séminaires méditerranéens)*, 40: 19 1-201.
- Talbot. (1997). Resource allocation for selection systems. In : KEMPTON RA, FOX PN, eds. *Statistical methods for plant variety evaluation*. London : Chapman & Hall, pp 162-74.
- Tardieu F., Cruiziat P., Durand J.L., Tribouï E., Zivy M. (2006). Perception de la sécheresse par la plante. Conséquences sur la productivité et sur la qualité des produits récoltés. *Unité Expertise scientifique collective, INRA. Sécheresse et agriculture, Chapitre 1.1: 49- 67*
- Turner N.C. (1979). Drought resistance and adaptation to water deficits in crops plants. In : *Stress Physiology in Crop Plants*, Mussell, H. et Staples, R.C. (éds). Wiley Intersciences, New York, pp 303-372.
- Turner N.C. (2004). Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology*, 144: 139-147.
- Troccoli A., Borrelli G.M., De-Vita P., Fares C., Di-Fonzoet N. (2000). Mini review: durum wheat quality: a multidisciplinary concept. *Journal of Cereal Science*, 32: 99-113.
- Vargas M., Crossa J., Van Eeuwijk F.A., Ramirez M.E., Sayre K. (1999). Using partial least squares regression, factorial regression and AMMI models for interpreting genotype x environment interaction. *Crop Sci*, 39: 955-967.
- Wade L.J., Douglas A.C.L. (1990). Effect of plant density on grain yield and yield stability of sorghum hybrids differing in maturity (*Sorghum bicolor*). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 30: 257-264.

- Wadley G., Martin A., (1993). The origins of agriculture - a biological perspective and new hypothesis. *Australian Biologist*, 6: 96-105.
- Wall A.M., Ripley R., Gale M.D. (1971). The position of a locus on chromosome 5B of *Triticum aestivum* affecting homoeologous meiotic pairing. *Genet Res*, 18: 329-339.
- Wardlaw, J.F., Moncur L. (1995). The response of wheat to high temperature following anthesis I: the rate and duration of grain filling. *Aust J. Plant. Physiol*, 22: 391-397.
- Wardlaw J.F. (2002). Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment. *Ann. Bot*, 90: 469-476.
- Wayne Smith C. (1995). *Crop Production*. John Wiley and Sons, pp 60-62.
- Wricke G. (1962). Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen, *Z. Pflanzenzüchtg*, 47: 92-96 (abstract en anglais).
- Yan W., Hunt L.A, Sheng Q., Szlavnic Z. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci*, 40: 597-605.
- Yan W., Hunt L.A. (2001): Interpretation of genotype x environment interaction for winter wheat yield in Ontario. *Crop Sci*, 41: 19-25.
- Yang, J., Zhang J., Wang Z., Zhu Q., Liu L., (2001). Water deficit induced senescence and its relationship to the remobilization of pre-stored carbon in wheat during grain filling. *Agron. J*, 93: 196-206.
- Yang D.L., Jing R.L., Chang X.P., Li W. (2007). Identification of Quantitative Trait loci and Environmental Interactions for Accumulation and Remobilization of Water-Soluble Carbohydrates in Wheat (*Triticum aestivum* L.) *Stems Genetics*, 176: 571-584.
- Ykhlef N. (2002) Photosynthèse, activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) Thèse de Doctorat d'Eta. Université Mentouri Constantine, 146 pp.
- Zhang J., Nguyen H.T., Blum A. (1999). Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *J. Exp. Bot*, 50: 291-302.
- Zobel R.W., Wright M.J., Gauch H.G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80: 388-393.

Résumé - [Titre : Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen]. La présente contribution comporte deux études complémentaires. L'une porte sur l'étude du comportement des variétés de blé dur au cours de la campagne 2008/09, sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif. La seconde analyse la stabilité des performances des variétés de blé dur dont les résultats sont issus d'une expérimentation multi- années, réalisée entre 2000/01 et 2005/2006, sur le même site expérimental. Les résultats indiquent que les variétés sélectionnées et soumises à l'évaluation divergent pour plusieurs caractéristiques qui sont une source causale de l'interaction génotype milieu. Parmi ces caractères figurent la hauteur du chaume, la durée de la phase végétative et la capacité de translocation, qu'il faut fixer à un seuil prédéterminé chez le matériel sélectionné pour minimiser les effets de l'interaction. Les résultats de la seconde étude confirment la présence de l'interaction et montrent que les diverses méthodes d'évaluation de la stabilité forment deux groupes l'un décrivant la stabilité statique (W, S^2di) et l'autre la stabilité dynamique ou agronomique ($P, b, S, TOP, Si^2, Si(3)$). Parmi les génotypes évalués, Cyprus₁ et Heider/Martes/Huevos de Oro se caractérisent par la stabilité agronomique, associant performance et stabilité des rendements ; alors que Belikh₂ et Mrb₁₆/Ente//Mario présentent une stabilité statique, qui ne tient pas compte du potentiel de rendement.

Mots-clés : Blé dur, caractérisation, rendement, GxE, stabilité, stress abiotique.

Abstract - [Title: Stability analysis of durum wheat yields (*Triticum durum* Desf.) under Mediterranean climate]. This contribution is constituted of two complementary studies. The first study compared durum wheat varieties in terms of yield components formation, yielding ability and response to growth conditions, during the 2008/09 cropping season, on the experimental site of the ITGC Setif station. The second study aimed to analyze the yield stability of durum wheat varieties evaluated in a multi year trial during the 2000/01 to 2005/2006 period on the same experimental site. The results indicated that the tested varieties varied widely for several characteristics, mainly plant height, vegetative growth period and the translocation ability, which are causative of the GxE interaction. It is suggested to fix the trait to a predetermined level in the plant material subjected to selection for grain yield, to be able to minimize the effects of the interaction. The results of the second study confirmed the presence of the GxE interaction and showed that the various stability methods could be classified into two groups, one describing the static stability (W, S^2di) and the other, the agronomic or dynamic stability (P, b, S, TOP, Si^2, Si^3). Among the evaluated genotypes Cyprus₁ and Heider/Martes/Huevos de Oro had an agronomic stability, where yield potential and yield stability are linked; while Belikh₂ and Mrb₁₆/Ente//Mario showed a static stability, which was unrelated to yield potential.

Key words: Durum wheat, characterization, grain yield, GxE, stability, abiotic stress.

ملخص - [العنوان: مساهمة في دراسة استقرار مردود القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) تحت مناخ البحر الأبيض المتوسط]. المساهمة الحالية تضم دراستين متكاملتين. تتطوي الأولى على دراسة سلوك أصناف من القمح الصلب خلال موسم 2009/2008, على الموقع التجريبي لمحطة الأبحاث للمحاصيل الكبرى ITGC بسطيف. أما الدراسة الثانية تحلل استقرار أداء أصناف من القمح الصلب, نتائجها ناجمة عن تجربة متعددة السنوات, و التي أجريت بين عامي 2001/2000 و 2006/2005, على نفس الموقع التجريبي. تشير النتائج إلى أن الأصناف المختارة و المقدمة للتقييم تتباين في العديد من الخصائص مما يشكل مصدر مسبب للتفاعل الوراثي- البيئي. من بين هذه الخصائص نجد طول النبات, مدة المرحلة الخضرية و قدرة النبات على نقل المواد المدخرة لمليء الحبة, و التي يجب تعيين عتبة محددة لكل من هذه الخصائص سلفا للتقليل من الآثار الناجمة عن التفاعل عند الأصناف المختارة. نتائج الدراسة الثانية تؤكد على وجود تفاعل و تبين أن الأساليب المختلفة لتقييم الاستقرار تشكل مجموعتين, واحدة تصف الاستقرار الثابت (W, S^2di) و الأخرى الاستقرار الديناميكي أو الزراعي ($P, b, S, TOP, Si^2, Si(3)$). من بين الأصناف المختبرة, Cyprus₁ و Heider/Martes/Huevos de Oro يختصان باستقرار زراعي, ما يجمع بين أداء و استقرار المردود ; في حين أن Belikh₂ و Mrb₁₆/Ente//Mario تتميزان باستقرار ثابت و الذي يتجاهل المردود المحتمل.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب, تشخيص, المردود, التفاعل الوراثي مع البيئة, الاستقرار, الإجهاد الاحيوي.