

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE HADJ LAKHDAR -BATNA -  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

**MEMOIRE**

**POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**OPTION : PHYTOTECHNIE**

Présenté par M. **SARAOUI Tahar**

**Sujet :**

***ETUDE DE LA VARIABILITE MORPHOLOGIQUE DE POPULATIONS F2 DE BLE DUR  
(Triticum durum Desf.) : UTILISATION D'UN INDICE DE SELECTION.***

Soutenu le : 20/01/2011

Devant le jury composé de :

<b>M.OUDJEHIH B.</b>	<b>Prof. Université de BATNA</b>	<b>PRESIDENT</b>
<b>M.BOUZERZOUR H.</b>	<b>Prof. Université de SETIF</b>	<b>RAPPORTEUR</b>
<b>M.BAHLOULI F.</b>	<b>M.C. Université de M'SILA</b>	<b>EXAMINATEUR</b>
<b>M.ZOUAOUI A.</b>	<b>M.C. Université de BATNA</b>	<b>EXAMINATEUR</b>

**Année 2010/2011**

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b>	06
<b>Chapitre 1 : Revue bibliographique</b>	08
1.1. Classification du blé dur ( <i>Triticum durum</i> Desf.)	08
1.2. Importance du blé dur	08
1.2.1- Dans le monde	09
1.2.2- En Algérie	10
1.3- Les contraintes de la production du blé dur	13
1.3.1- Le stress hydrique et mécanismes d'adaptation	13
1.3.1.1.1- Adaptations phénologiques	13
1.3.1.1.2- Adaptations morphologiques	14
1.3.1.1.3- Adaptations physiologiques	14
1.3.2- Le stress thermique	15
1.4- L'amélioration génétique du blé dur	16
1.4.1- La sélection pour la productivité	17
1.4.2- La sélection pour l'adaptabilité	19
1.5- La sélection assistée par les marqueurs moléculaires	21
<b>Chapitre II : Matériel et méthodes</b>	25
2.1. Mise en place de l'expérimentation	25
2.2. Aperçu des conditions climatiques des campagnes 2006/07, 2007/08 et 2008/09	26
2.3. Matériel végétal	27
2.4. Méthodes	27
2.4.1. La génération F1 et les parents	27
2.4.2. La génération F2 et les parents	28
2.4.3. La génération F3 et les parents	28
2.5. Variables mesurées	28
2.6. Analyse des données	29

<b>Chapitre III : Résultats et discussion</b>	35
3.1Analyse de la génération F1	35
3.2Analyse de la génération F2	40
3.2.1-Etude de la variabilité	40
3.2.2- Etude de la réponse à la sélection	45
3.2.2.1- Sélection mono caractère	45
3.2.2.1.1- Réponses directes et corrélatives en F3 à la sélection de la biomasse aérienne	48
3.2.2.1.2- Réponses à la sélection du poids des épis	50
3.2.2.2- La sélection sur indice	52
3.2.2.2.1- Sélection différentielle	52
3.2.2.2.2- Réponse à la sélection sur indice	54
Synthèse	62
Conclusion générale	67
<b>Références bibliographiques</b>	

**ملخص :** تهدف الدراسة الحالية إلى تقييم أهمية الكتلة الإحيائية الهوائية، عدد السنابل و وزن السنابل و إدماجها مع طول القصب على شكل مؤشر لثلاث عشائر من القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) لتحسين القدرة الإنتاجية و التأقلم مع المحيط . و تحقيقا لهذه الغاية تم تهجين واحة، محمد بن بشير و أم الربيع مع أوفنتوو، صنف ايطالي ذات مردود و صفات تكنولوجية عالية لإعطاء عشائر مميزة و مفيدة. أظهرت العشائر الجيل2 و3 تباين مذهري للصفات المقاسة من بينها الكتلة الإحيائية، الطول النبات، عدد السنابل ووزنها. تمت ممارسة الانتخاب ذو التوجه الواحد بين أفراد الجيل2 على أساس الكتلة الإحيائية، وزن و عدد السنابل منفردة و على شكل مؤشر يضم هته الصفات مع طول القصب. تم تقييم الاستجابة لهذا الانتخاب في الجيل الثالث. اخذ التوريث بالمفهوم الواسع و الاستجابة للانتخاب درجات عالية نسبيا. أظهرت نتائج الجيل الأولى أن تفاعلات إضافية و هيمنة تتدخل في المراقبة الوراثية للصفات المستعملة كمؤشرات الانتخاب. سجلت علاقات ايجابية بين الكتلة الإحيائية، عدد السنابل و وزنها و الغلة الحبية و هذا في الجيل الثاني والثالث. بينت السلالات المنتخبة على أساس الكتلة الإحيائية، عدد السنابل و وزن السنابل فوارق لطول القصب، عدد و وزن السنابل، الكتلة الإحيائية الهوائية ' عدد الحبات في السنبله' وزن ألف حبة و الغلة . إمكانية الصفات الثلاثة المستعملة كمؤشرات الانتخاب لتحسين الغلة و التأقلم تناقش مع التغير المظهري، درجة التوريث و الاستجابة للانتخاب المعبرة بالقطعة المنتخبة و العلاقات مع الصفات المظهرو مورفولوجية.

**كلمات دالة :** *Triticum durum* Desf.، مؤشر الانتخاب، الغلة، تجاوب ثنائي، توريث

**Résumé -** L'étude a été menée pour évaluer l'utilité de la biomasse aérienne, le nombre d'épis et le poids des épis et leur combinaison avec la hauteur du chaume en un indice, comme critères de sélection en F<sub>2</sub> de trois populations de blé dur (*Triticum durum* Desf.) pour améliorer le potentiel de rendement et l'adaptation au milieu. A cet effet, Waha, Mohammed Ben Bachir et Mrb<sub>5</sub> ont été croisés avec Ofanto, un cultivar Italien à haut rendement et de bonnes qualités technologiques pour générer des populations ségréantes utiles. Les générations F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> présentent une importante variabilité phénotypique pour les caractères mesurés parmi lesquels la biomasse, la hauteur, le nombre d'épis et le poids des épis. La sélection unidirectionnelle a été pratiquée entre les individus de la génération F<sub>2</sub>, pour la biomasse, le poids et le nombre d'épis, et sur la base d'un indice intégrant ces caractères et la hauteur du chaume. La descendance F<sub>3</sub> de la fraction sélectionnée a été évaluée en plein champ pour l'expression des caractères morphologiques et agronomiques. L'héritabilité au sens large (h<sup>2</sup><sub>bs</sub>) et la réponse à la sélection prennent des valeurs relativement élevées. Les résultats de la génération F<sub>1</sub> montrent que des effets additifs et de dominance sont impliqués dans le contrôle génétique des caractères utilisés comme critères de sélection. Des liaisons positives ont été notées entre la biomasse, le nombre d'épis et le poids des épis et le rendement grain aussi bien en F<sub>2</sub> qu'en F<sub>3</sub> des trois populations. La fraction sélectionnée pour la biomasse, le nombre et le poids des épis montre, en F<sub>3</sub>, des différences pour la hauteur du chaume, le nombre et le poids des épis, la biomasse aérienne, le nombre de grains par épi, le poids de 1000 grains et le rendement. Le potentiel des trois caractères, utilisés comme critères de sélection, à améliorer le rendement et l'adaptation, est discuté en relation avec la variabilité phénotypique, le degré d'héritabilité et la réponse à la sélection, exprimée par la fraction sélectionnée et les liaisons avec les caractères phéno- morphologiques.

**Mots clés :** *Triticum durum*, indice de sélection, potentiel de rendement, corrélation, héritabilité.

**Summary – [Title: Study of the morphological variability of F<sub>2</sub> durum wheat cross populations (*Triticum durum* Desf): utilisation of a selection index].**

This study has been conducted to evaluate the usefulness of above ground biomass, spikes number and spikes weight, and their combination with plant height in an index, as selection criteria in F<sub>2</sub> generation of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cross populations to improve yield potential and adaptation. For this purpose, Waha, Mohammed Ben Bachir and Mrb<sub>5</sub> were crossed with Ofanto, an Italian high yield and good quality durum wheat cultivar to generate useful segregating cross populations. The F<sub>2</sub> and F<sub>3</sub> populations showed a wide segregation for the measured variables among which the above ground biomass, plant height and spikes weight and spikes number. Unidirectional selection was made among individual F<sub>2</sub> plants for above ground biomass, spikes number and spikes weight, and based on an index combining these three traits with plant height. Selected F<sub>3</sub> progenies were evaluated under field conditions for morphological and agronomical traits. Broad-sense heritability ( $h(b^2)$ ) and response to selection were high. Results of the F<sub>1</sub> generation indicated that additive and dominance effects were involved in the genetic control the trait used as selection criteria. Positive correlations were noted between above ground biomass, spikes number, spikes weight and grain yield in the F<sub>2</sub> as well as in the F<sub>3</sub> generations of the three cross populations. The F<sub>3</sub>-selected fraction for high above ground biomass, spikes number and spikes weight exhibited differences for plant height, spikes number and spikes weight, number of kernels per spike, thousand-kernel weight and grain yield. The potential of the three traits as selection criteria to improve both yield potential and adaptation in durum wheat was discussed by considering the genetics of these traits (variability, heritability, response to selection) and also their mutual associations with pheno-morphological traits.

**Keys words-** *Durum wheat*, selection index, yields potential, correlation, heritability.

## Remerciements

C'est avec beaucoup de reconnaissance que j'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur BOUZERZOUR Hamenna, Professeur à l'Université de Sétif, pour avoir suivi et dirigé en toute modestie ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect et ma sincère gratitude ; sans l'aide d'Allah et la sienne, ce travail n'aurait jamais abouti. Grand Merci .

Je tiens également à remercier Monsieur OUDJEHIH Bachir , Professeur à l'Université de Batna, d'avoir accepté d'évaluer ce travail en qualité de président malgré ses préoccupations et la charge de son travail.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur BAHLOULI Fayçal, Maitre de Conférences 'A' à l'Université Mohammed Boudiaf de M'Sila et Monsieur ZOUAOUI Abdelhamid, Maitre de Conférences 'A' à l'Université de Batna d'avoir accepté de faire parti du jury et d'évaluer ce modeste travail.

Je n'oublierais pas de remercier Monsieur BENMAHAMMED Amar, Professeur à l'Université Ferhat Abbas de Sétif pour son aide et son soutien ainsi que tous ceux qui m'ont aidé dans l'accomplissement de ce travail.

### Liste des abréviations

**ICARDA**= International Center for Agricultural Research in Dry Areas.

**CIMMYT**= International Maize and Wheat Improvement.

**FAO** = Organisation mondiale de l'Agriculture et de l'Alimentation (Food and Alimentation Organisation)

**OF** = Ofanto

**MBB** =Mohamed Ben Bachir

**W** = Waha

**Mrb5** = Oum Rabie

**BIO** = Biomasse aérienne

**HT** = Hauteur du chaume

**PE** = Poids des épis

**NGM<sup>2</sup>** = nombre de grains m<sup>-2</sup>

**RDT** = rendement en g m<sup>-2</sup>,

**PMG** = poids de 1000 grains en g

**NE** = nombre d'épis m<sup>-2</sup>,

**NGE** = nombre de grains par épi.

**h<sub>1</sub>**= hétérosis mesuré en F1

**X<sub>F1</sub>** = moyenne de l'hybride,

**X<sub>PM</sub>** = moyen du parent moyen =  $(X_{P1} + X_{P2})/2$ ,

**P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>** = les parents croisés.

**CV<sub>P</sub>**= coefficient de la variabilité phénotypique

**CV<sub>g</sub>**=coefficient de la variabilité génotypique.

**σ<sup>2</sup><sub>p</sub>** = variance phénotypique totale

$\sigma^2_G$  = Composante génétique de la variance

$\sigma^2_e$  = la variance résiduelle

$h^2_{BS}$  = Le degré d'héritabilité au sens large.

**RS** = Réponse à la sélection

**i** = Intensité de sélection standardisée en unité d'écart type ( $i= 1.76$ , au seuil de 10%)

**R<sub>obs</sub>** = La réponse, observée en F<sub>3</sub>

$\mu'$  = moyenne observée en F<sub>3</sub> de la fraction sélectionnée en F<sub>2</sub>,  $\mu_{F3}$  = moyenne de la population F<sub>3</sub>

Elston Weight-free Index = **EWFI**

Desired Gain Index = **DGI**

Baker's Standardized Index = **BSI**

Simple- Weighted Index = **SWI**

### Liste des figures

- Figure 1.** Evolution de la demande en céréales des pays du bassin méditerranéen.
- Figure 2.** Sélection précoce: comparaison de la sélection classique et la SAM.
- Figure 3.** Modèle de l'analyse en chemin appliqué au poids des épis de la F<sub>2</sub> .
- Figure 4.** Pluie et température moyenne mensuelles des campagnes concernées par l'étude.
- Figure 5.** Liaison entre la biomasse aérienne et le poids des épis par plant.
- Figure 6.** Liaison entre le poids des épis par plant et la hauteur du chaume aérienne et le poids des épis par plant.
- Figure 7.** Moyennes de la biomasse des hybrides et leurs parents.
- Figure 8.** Moyennes de la hauteur du chaume des hybrides et leurs parents.
- Figure 9.** Moyennes du poids des épis des hybrides et des parents.
- Figure 10.** Variation comparée de la biomasse de la génération F<sub>2</sub> des 3 croisements
- Figure 11.** Variation comparée de la hauteur de la génération F<sub>2</sub> des 3 croisements.
- Figure 12.** Relation entre le poids des épis (PE) et la biomasse aérienne (BIO) mesurées chez les F<sub>2</sub> des 3 croisements.
- Figure 13.** Moyennes des rendements de la génération F<sub>3</sub>, du parent variable et de la fraction (10%) sélectionnée sur la base de la biomasse aérienne ( $\mu'_{BIO}$ ) et sur la base du poids des épis ( $\mu'_{PE}$ ) pour les trois croisements.
- Figure 14.** Biplot des composantes 1 et 2 des variables et des individus de la génération F<sub>3</sub> du croisement Ofanto/MBB.
- Figure 15.** Biplot des composantes 1 et 2 des variables et des individus de la génération F<sub>3</sub> du croisement Ofanto/Waha.
- Figure 16.** Biplot des composantes 1 et 2 des variables et des individus de la génération F<sub>3</sub> du croisement Ofanto/Waha.
- Figure 17.** Moyennes des rendements grain des sélections sur indice et des 10% des lignées ayant les meilleurs rendements grain observés en F<sub>3</sub> des trois croisements.

### Liste des tableaux

**Tableau 1.** Production (10<sup>6</sup> t) mondiale de blé dur.

**Tableau 2.** Consommation moyenne (kg/hab/an) algérienne de céréales, entre 1961-2005.

**Tableau 3.** Evolution de la production céréalière (10<sup>3</sup> t) des pays méditerranéens.

**Tableau 4.** Analyse de la variance des variables mesurées chez les parents et les hybrides.

**Tableau 5.** Valeurs moyennes des caractères mesurés chez les parents et les hybrides.

**Tableau 6.** Hétérosis (h<sub>1</sub>) exprimé par les différents hybrides F<sub>1</sub> relativement au parent moyen (PM).

**Tableau 7.** Moyennes, variances ( $\sigma^2$ ), coefficients de variation phénotypique (CV<sub>P</sub>, %) et génotypique (CV<sub>G</sub>, %) et héritabilité au sens large (h<sup>2</sup><sub>bs</sub>) des caractères de la F<sub>2</sub>.

**Tableau 8.** Coefficients de corrélation entre les variables mesurées chez les F<sub>2</sub> des 3 croisements et effet direct (Pi) de la hauteur du chaume, de la biomasse et du nombre d'épis sur le poids des épis.

**Tableau 9.** Réponse attendue (R) de la sélection sur la base de la biomasse aérienne et du poids des épis, moyenne de la génération F<sub>2</sub> ( $\mu_{F_2}$ ), moyenne de la fraction sélectionnée ( $\mu_s$ ), différentielle de sélection (S) et moyenne attendue de la descendance de la fraction sélectionnée ( $\mu'$ ).

**Tableau 10.** Numéros et valeurs des 10% des lignées F<sub>2</sub> (les meilleures) sélectionnées sur la base de la biomasse aérienne (BIO) et du poids des épis (PE) chez les 3 croisements.

**Tableau 11.** Moyennes de la génération F<sub>3</sub> et des lignées parents pour les variables mesurées, réponses directes et corrélatives (r<sub>obs</sub>) à la sélection de la biomasse aérienne et du poids des épis des trois croisements.

**Tableau 12.** Numéros des plantes F<sub>2</sub> sélectionnées par indice pour les 3 croisements.

**Tableau 13.** Moyennes de la génération F<sub>2</sub>, de la fraction sélectionnée et différentielle de sélection en valeur réelle et relative des caractères inclus dans l'indice de sélection (EWFI) des 3 croisements.

**Tableau 14.** Moyennes de la génération F<sub>3</sub>, de la fraction sélectionnée et réponse à la sélection sur indice (EWFI) en valeur réelle et relative observées chez les 3 croisements.

**Tableau 15.** Coefficients de corrélations phénotypiques entre les variables mesurées en F<sub>3</sub> des trois croisements.

## Introduction

La culture des céréales est la spéculation prédominante de l'agriculture algérienne. Elle s'étend sur près de six millions d'hectares dans un système biennal dominant jachère -céréale. La production nationale est faible et ne permet de satisfaire qu'environ 35 % des besoins d'une population de plus en plus croissante (Bedrani, 2004 ; Hervieu *et al.*, 2006). Le pays figure actuellement parmi les premiers importateurs mondiaux de blé dur en s'accaparant de près de 50 % du marché mondial (CIC, 2007). Le rendement moyen de dix quintaux à l'hectare, figure parmi les plus faibles dans le monde, il est en même temps très fluctuant et tributaire de la variation climatique. En effet, la majeure partie des emblavures se trouve sur les hauts plateaux caractérisées par l'altitude, des hivers relativement froids, un régime pluviométrique insuffisant et irrégulier, des gelées printanières fréquentes, et l'apparition du sirocco en fin de cycle (Baldy, 1974 ; Mekhlouf *et al.*, 2006).

A ces contraintes climatiques, s'ajoutent les contraintes d'ordre technique qui relèvent de l'utilisation de variétés peu productives et des conduites souvent peu ambitieuses (Nouar *et al.*, 2009). Ainsi, le faible niveau de technicité des agriculteurs associé au risque d'obtention de faibles rendements expliquent la mauvaise préparation du sol, la protection insuffisante des cultures contre les prédateurs, les maladies et les mauvaises herbes et le faible niveau d'utilisation des intrants (Felliachi, 2000).

Le manque d'eau est toutefois le facteur le plus limitant auquel fait et doit faire face la céréaliculture algérienne. Tout progrès sensible des agro- systèmes, basés sur la culture des céréales, dans l'étage bioclimatique semi-aride, semble être conditionné par une meilleure gestion des eaux pluviales (Chennaffi *et al.*, 2006). L'amélioration des performances des cultures, conduites sous stress hydrique, peut être réalisée par des changements agronomiques et/ou par la création de variétés

résistantes à ces contraintes (Richards *et al.*, 2002 ; Araus *et al.* 2003). L'irrigation d'appoint est une alternative qui revêt une importance considérable. Vue l'irrégularité des précipitations; les apports d'eau de complément, lors des périodes de déficit hydrique, aident à stabiliser la production. La pratique de l'irrigation déficitaire, au cours des phases critiques de développement améliore nettement les rendements attendus des céréales des zones semi-arides (Chennaffi *et al.*, 2006).

Une issue plus prometteuse repose sur l'amélioration génétique des plantes pour une meilleure adaptation aux contraintes environnementales. Jusqu'à présent, la sélection du blé dur s'est faite en puisant fortement dans les introductions des centres internationaux de la recherche agronomique. Les variétés sélectionnées se comportent bien dans les plaines intérieures et sur le littoral, mais le rendement grain reste très variable sur les hauts plateaux (Safi, 2009). Le progrès génétique réalisé jusqu'à maintenant est assez conséquent, jusqu'à 16.6% du rendement de MBB, mais il n'est pas valorisé suite au faible taux d'adoption des nouvelles variétés (Nouar *et al.*, 2009).

Les variétés nouvelles sont le plus souvent sélectionnées sur la base de leur niveau de rendement sans tenir compte des caractères adaptatifs qui sont des régulateurs de la production en milieux variables. Dans les milieux semi-arides, la présence d'interactions génotype x milieu très fortes rend le rendement moins intéressant comme seul critère de sélection (Bouzerzour et Djekoun, 1996, Bahlouli *et al.*, 2005, Benmahammed *et al.* 2010). Les sélectionneurs se tournent vers d'autres caractères moins fluctuants qui peuvent être utilisés en parallèle avec le rendement en grains dans une approche multi caractères, pour combiner potentiel de rendement et adaptation au milieu (Annchiarico et Iannucci, 2008). La présente contribution se fixe pour objectif de déterminer la réponse en F<sub>3</sub> à la sélection précoce monocaractère et sur indice, en F<sub>2</sub>, de trois croisements de blé dur réalisés entre les variétés Ofanto, Mohammed Ben Bachir, Waha, et Mrb<sub>5</sub>.

## Chapitre I – Revue bibliographique

### 1.1- Classification du blé dur (*Triticum durum* Desf)

Le blé appartient à la famille des graminées (Gramineae = Poaceae), qui comprend plus de 10000 espèces différentes (Mac Key, 2005). Plusieurs espèces de ploïdie différentes sont regroupées dans le genre *Triticum* qui est un exemple classique d'allo polyploïdie, dont les génomes homéologues dérivent de l'hybridation inter espèces appartenant à la même famille (Levy et Feldman, 2002).

Le Blé dur (*T. turgidum* ssp. *Durum* Desf.) est une espèce allo tétraploïde (2n = 28, AABB) qui a pour origine l'hybridation suivie par un doublement chromosomique entre *Triticum Urartu* (génome AA) et une espèce voisine de *Aegilops speltoides* (génome BB) (Huang *et al.*, 2002).

La domestication du blé diploïde s'est produite dans le nord du croissant fertile au Proche Orient. Le blé tétraploïde a été domestiqué dans le bassin du Jourdain, plus au sud. Le blé tétraploïde s'est diversifié dans les centres secondaires représentés par les plateaux éthiopiens, le bassin méditerranéen et la Transcaucasie (Levy et Feldman, 2002).

### 1.2- Importance du blé dur

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 préparer 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 (Bahlouli *et al.*, 2005).

### 2.1.1- Dans le monde

Le blé dur occupe 8 à 10% du total des terres réservées aux blés dans le monde. La FAO (2007) estime que la superficie moyenne consacrée annuellement à la culture du blé dur est de 18 millions d'hectares, pour une production annuelle moyenne de 27.5 millions de tonnes. La culture du blé dur est concentrée au Moyen-Orient, en Afrique du Nord, en Russie, aux Dakotas, au Canada, en Inde et en Europe méditerranéenne.

Avec une production de 8.08 millions de tonnes par an, moyenne de la période 1994-2007, l'Union européenne est le plus grand producteur de blé dur (Tableau 1). Le Canada arrive au deuxième rang avec 4,6 millions de tonnes par an, suivi de la Turquie et des États-Unis, avec 1.99 et 2.67 millions de tonnes respectivement. Ces quatre pays fournissent à eux seuls les deux tiers de la production mondiale (Tableau 1).

Tableau 1. Production (10<sup>6</sup> t) mondiale de blé dur (FAO, 2007)

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Algerie	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
Maroc	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
Tunisie	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
Syrie	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
Turkie	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
UE	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
Inde	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
Mexique	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
Argentine	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
Australie	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
Russie	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
Kazakhstan	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	25.7	31.1	23.8	26.7	24.2	26.8	28.6	33.0	26.2	26.0	33.2

## 2-1.2- En Algérie

La superficie totale de l'Algérie est de 238 millions d'hectares dont 191 millions sont occupés par le Sahara. La superficie agricole représente 3% de ce 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% des terres labourées (MADR, 2007).

Le blé dur est une culture traditionnelle dont l'origine remonte selon Laumont et Erroux (1961) à la venue des arabes. Cette spéculation se partageait avec l'orge, l'essentiel des emblavements; alors que le blé tendre s'est développé après l'indépendance. La superficie occupée par le blé dur est de 1 457 913 hectares, en moyenne pour la période 1996/97- 2003/2004. L'importance des superficies occupées par les blés, comparativement à celle de l'orge, est influencée par le prix à la production garanti par l'état. Ces prix sont de 4500, 3500 et 2500 DA le quintal respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge.

Actuellement, le pays se classe au 1<sup>er</sup> rang mondial pour la consommation des céréales avec une moyenne dépassant largement les 180 kg/hab/an (Tableau 2), 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 (FAO, 2007). 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 à 6,4 MT (FAO, 2005). Ceci place l'Algérie en première position avant l'Egypte et la Tunisie, pays qui connaissent une forte pression de la demande alimentaire, notamment en céréales (Figure 1 ; Hervieu *et al.*, 2006).

Tableau 2. Consommation moyenne (kg/hab/an) algérienne de céréales, entre 1961-2005 (FAO, 2007).

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

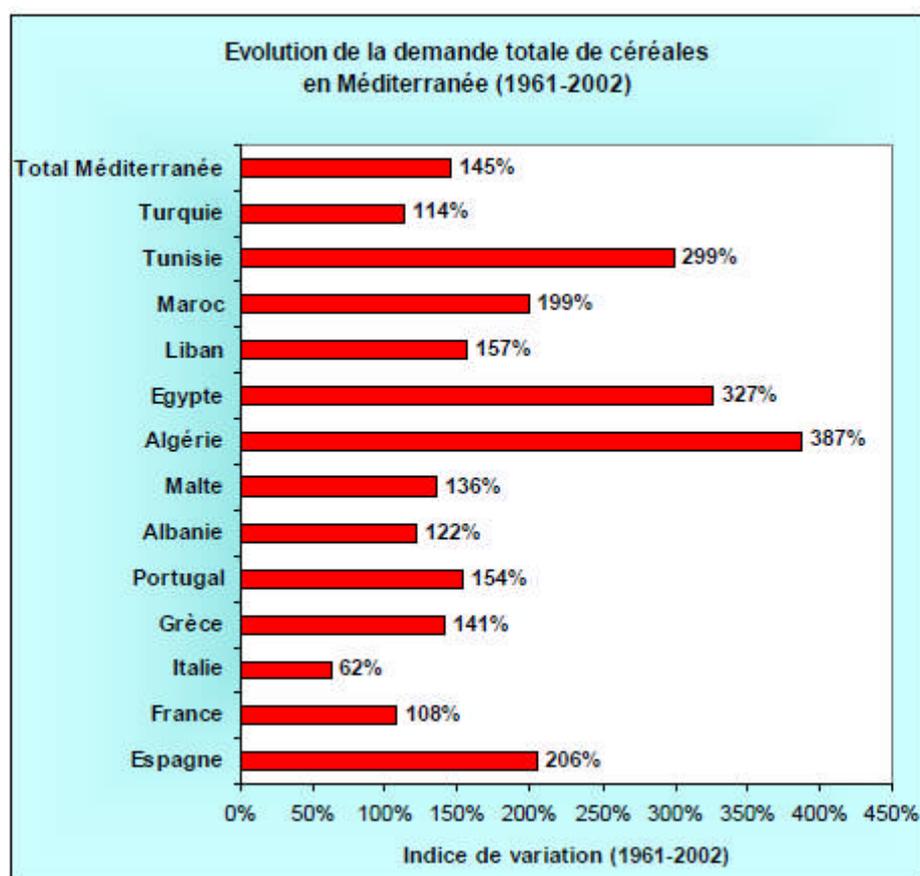


Figure 1. Evolution de la demande en céréales des pays du bassin méditerranéen (Hervieu *et al.*, 2006)

La culture du blé dur demeure encore difficile à maîtriser tant que celle-ci reste confrontée et soumise à plusieurs contraintes (aléas climatiques et faible maîtrise de l'itinéraire technique). Cette situation engendre une production faible et variable qui ne couvre que 30 à 35 % des besoins. Pour 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 (MADR, 2007). 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, la production 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 (Bedrani, 2004).

Les rendements réalisés sont très bas, comparativement à la moyenne mondiale qui est de 29 q/ha, comparativement au rendement moyen des pays voisins qui est de 20 q/ha (FAO, 2007). Le rendement de blé dur stagne à une moyenne de 10 q/ha, avec de fortes variations interannuelles. Hervieu *et al.*, (2006) rapportent cependant des progrès sensibles de la production algérienne de céréale, qui a presque doublée au cours de la période 1961-2004 (Tableau 3).

Tableau 3. Evolution de la production céréalière (10<sup>3</sup> t) des pays méditerranéens (Hervieu *et al.*, 2006)

	1961-1965	1981-1985	2001-2004	Taux moyen annuel de production
ESPAGNE	8,674.7	16,097.4	21,443.9	
FRANCE	25,331.2	50,967.2	63,614.5	2.33
ITALIE	14,046	18,566.4	20,503.1	0.95
GRECE	2,521.8	5,112.3	4,649.7	1.54
PORTUGAL	1,609.1	1275	1,326.4	-0.48
ALBANIE	317.3	995.2	513.9	1.21
MALTE	5.1	10.1	11.8	2.10
ALGERIE	1,770.9	1,805.7	3,189.8	1.48
EGYPTE	6,076.2	8,495.3	19,465.3	2.95
LIBAN	91.5	29.5	145.3	1.16
MAROC	3,159.1	3,939.8	6,594.1	1.86
TUNISIE	926.6	1,329.9	1,465.1	1.15
TURQUIE	14,831.1	25,876.7	31,289.5	1.88
<b>Total</b>	<b>79,360.6</b>	<b>134,500.5</b>	<b>174,212.4</b>	

### **1.3. Les contraintes de la production du blé dur**

#### **1.3.1. Le stress hydrique et les mécanismes d'adaptation :**

Le manque d'eau ou déficit hydrique représente le stress abiotique le plus sévère auquel la culture du blé dur fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi- arides (Chenaffi *et al.*, 2006). En effet, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement de la culture du blé dur. Le manque d'eau se traduit par une réduction de la croissance de la plante et de sa production par rapport au potentiel du génotype. Un manque d'eau précoce affecte principalement la croissance des racines, le développement des feuilles et des organes reproducteurs (Debaeke *et al.*, 1996). Ceci se répercute sur le rendement économique de la culture, qui peut baisser de plus de 80% (Chenaffi *et al.*, 2006).

Pour contrer le manque d'eau, les plantes développent plusieurs stratégies adaptatives qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu. La résistance de la plante à la contrainte hydrique peut être définie, physiologiquement, par la capacité de survivre et de croître et, du point de vue agronomique, par la capacité de réaliser un rendement élevé. Selon Passioura (2004), la résistance globale d'une plante vis-à-vis du déficit hydrique est la résultante de nombreuses modifications phénologiques, anatomiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques. Ces dernières interagissent pour permettre le maintien de la croissance, du développement et de la production (Passioura, 2004).

##### **1.3.1.1. Adaptations phénologiques**

Pour éviter les périodes critiques du manque d'eau, certaines variétés accomplissent leur cycle de développement avant l'installation de la contrainte hydrique. La précocité constitue, de ce fait, un important mécanisme d'esquive du déficit hydrique de fin de cycle. La précocité assure une meilleure efficacité de

l'utilisation de l'eau. En effet, en produisant la biomasse la plus élevée, les génotypes à croissance rapide et à maturité précoce utilisent mieux l'eau disponible et ils sont moins exposés aux stress abiotiques que les génotypes tardifs. De ce fait le rendement grain est positivement corrélé à la précocité d'épiaison. La précocité de l'épiaison est efficacement utilisée comme critère de sélection pour améliorer les productions des zones sèches (Reynolds *et al.*, 2005 ; Mekhlouf *et al.*, 2006).

### **1.3.1.2. Adaptations morphologiques**

L'adaptation peut prendre forme, suite à des modifications d'ordre morphologiques pour améliorer l'absorption de l'eau, et/ou diminuer la transpiration et la compétition entre organes pour les assimilats produits. Ainsi certaines variétés réduisent de la surface foliaire et le nombre de talles, pour ajuster leur consommation en eau. Elles sont dites plantes économes. D'autres possèdent la capacité d'enrouler le limbe foliaire pour minimiser la transpiration et réduire l'effet du stress lumineux. D'autres variétés investissent dans le développement d'un système racinaire profond, pour avoir accès à des horizons plus humides, et ainsi elles s'assurent une meilleure alimentation hydrique. Ces plantes sont dites dépendantes en eau (Slafer *et al.*, 2005).

### **1.3.1.3. Adaptations physiologiques**

La diminution du potentiel hydrique du sol en conditions de sécheresse provoque une perte importante de la turgescence au niveau de la plante. L'augmentation de la production, dans ces conditions, dépend des mécanismes de tolérance qui assurent l'hydratation cellulaire et diminuent la perte en eau en maintenant un statut hydrique favorable au développement foliaire (Slafer *et al.*, 2005). Le maintien d'un potentiel hydrique élevé est lié à l'aptitude à extraire l'eau du sol et à la capacité à limiter les pertes d'eau par transpiration (Tardieu *et al.*, 2004).

La diminution de la transpiration engendre la réduction de la photosynthèse, et donc du rendement. Cependant, il apparaît que les génotypes qui ont la capacité photosynthétique intrinsèque la moins affectée par le déficit hydrique présentent une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (Condon *et al.*, 2005).

Les osmolytes qui s'accumulent sous conditions de déficit hydrique, sont des sucres et la proline (Kameli et losel, 1995). Ces osmolytes jouent un rôle important dans l'ajustement osmotique et l'adaptation de la plante au manque d'eau (Zhang *et al.*, 1999). La présence de la variabilité génétique pour l'accumulation des sucres et de la proline, sous contrainte hydrique, suggère la possibilité de sélectionner, sur la base de ces caractères, des génotypes plus tolérants du stress hydrique (Zhang *et al.*, 1999).

### **1.3.2. Le stress thermique**

La température est un facteur important pour la durée des phases de pré et post-anthèse. Le taux de développement des génotypes au cours des phases de pré et post-anthèse sont différents en raison de la variation de la température selon les années et les environnements (Araus *et al.*, 2003). Dans les environnements méditerranéens, les hautes températures de fin de cycle sont considérées comme un facteur important de limitation de rendement. Des températures, au-dessus de 30°C, affectent le poids final de grain (Haddad, 2009). Les hautes températures affectent, non seulement le poids final de grain, mais aussi le nombre de grains par épi et par unité de surface (Bahlouli *et al.*, 2005).

Pendant la période de tallage herbacé, des températures assez élevées, de l'ordre de 15-20°C, peuvent exercer un rôle favorable en permettant à la plante de produire un nombre de talles suffisants. En revanche pendant la phase de montaison, l'occurrence plus fréquente de températures élevées a une incidence défavorable sur la croissance des tiges. La tolérance au froid, c'est-à-dire la capacité à supporter des

températures bien inférieures à 4°C, au stade épiaison est importante à considérer (Mekhlouf *et al.*, 2006).

#### **1.4. L'amélioration génétique du blé dur**

Le but principal de tout programme de sélection est la production de variétés possédant un rendement élevé et stable. L'environnement dans lequel se fait la sélection joue un rôle important. Tous les milieux n'ont pas la même aptitude à révéler les différences génotypiques. L'existence d'une interaction génotype - environnement complique les efforts de la sélection (Benmahammed *et al.*, 2006).

Le processus de sélection est différent, selon qu'on cherche l'adaptation spécifique ou l'adaptation générale (Annichiarico *et al.*, 2006). En effet, Bouzerzour *et al.*, (1998) mentionnent qu'en milieux variables, l'efficacité de la sélection sur la seule base du rendement grain est très variable, suite à l'effet de l'environnement qui fait varier le niveau de ce caractère et ses relations avec les autres variables, d'une année à l'autre.

Les sélectionneurs de blé dur mettent l'accent sur l'amélioration simultanée du comportement agronomique, de la résistance aux maladies et des caractères qualitatifs. Les caractères agronomiques sont représentés par le rendement et ses composantes, la hauteur de la plante, la biomasse aérienne produite aux stades végétatifs épiaison et maturité. La résistance aux maladies porte sur les rouilles (*Puccinia tritici*), la septoriose (*septoria tritici*) et la tache bronzée (*Tan spot*). Les caractères qualitatifs concernent surtout la qualité technologique du grain.

Le processus de création d'une nouvelle variété commence par la production d'hybrides F<sub>1</sub> par croisement de deux parents ou plus. Les sélectionneurs doivent veiller à ce que tous les parents servant au croisement possèdent collectivement la majorité des caractères recherchés pour la nouvelle variété (Mekhlouf et Bouzerzour,

2000). Dans le cas des populations autogames, la génération F<sub>2</sub> dérivée de l'autofécondation de sujets F<sub>1</sub> présente une grande variabilité génétique.

La sélection des plants possédant les caractères recherchés commence en F<sub>2</sub>. Elle se poursuit jusqu'en F<sub>7</sub>-F<sub>8</sub>, lorsque la descendance devient uniforme. Cette sélection précoce se fait sur la base des caractères dont l'expression dépendra relativement peu des conditions du milieu, telles que la hauteur, la précocité, la sensibilité aux maladies. La sélection pour des caractères complexes, comme le rendement et la qualité du grain, s'effectue plus tardivement sur un matériel plus génétiquement homogène, en utilisant des dispositifs plus rigoureux pour maîtriser la variation environnementale (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2003).

#### **1.4.1. La sélection pour la productivité**

Le rendement grain est un caractère génétiquement complexe et son amélioration passe par la sélection conjointe de la productivité et des caractères adaptatifs aux milieux. L'amélioration génétique du rendement se fait de manière progressive et continue, suite à la modification des composantes (Mekhlouf et Bouzerzour, 2000). La connaissance des liaisons qui existent entre les composantes et le rendement permet d'identifier les composantes à utiliser comme critères de sélection. Ces informations permettent d'orienter le processus de sélection de manière à promouvoir les caractères capables d'engendrer une amélioration du rendement (Mekhlouf et Bouzerzour, 2000).

Le nombre de grains produit par unité de surface, résultante du produit du nombre des épis et du nombre de grains par épi, est le caractère le plus fortement lié au rendement. De ce fait, la sélection concomitante pour les épis et le nombre de grains par épi améliore forcément la productivité. Bahlouli *et al.*, (2005) ainsi que Haddad (2009) notent cependant un effet de compensation négatif entre ses deux composantes sous conditions semi-arides.

L'amélioration d'une de ces composantes, réduit l'autre, avec des effets incontrôlés sur le rendement grain. Cet effet de compensation est d'autant plus important que ces deux composantes s'élaborent au cours de périodes différentes, subissant les stress à des intensités différentes. Le poids moyen du grain, exprimé sous forme de poids de 1000 grains ne semble pas influencer sur le rendement. Cette composante reste peu maîtrisée suite aux effets combinés de la compensation avec le nombre de grains par épi et ceux des stress de fins de cycle.

Le rendement grain est la résultante de la matière sèche produite durant les phases pré- et post- anthèse. L'indice de récolte représente la proportion de la biomasse aérienne produite à maturité qui est le grain. Il mesure la capacité de la répartition de la biomasse produite entre la partie économique, qui est le grain et le reste de la plante représenté par la paille.

La sélection sur la base de l'indice de récolte se traduit par des changements de l'architecture de la plante qui rendent cette dernière très sensible à la variation environnementale en milieu erratique(variable) suite à la réduction de la hauteur de paille au profit du nombre de grains par m<sup>2</sup> (Annichiarico *et al.*, 2005). La biomasse présente un intérêt majeur en sélection au même titre que le rendement vu qu'elle apparaît comme un facteur limitant du rendement vu qu'elle est liée positivement au rendement (Mekhlouf et Bouzerzour, 2000).

Le poids de l'épi au stade épiaison est un bon indicateur du rendement potentiel à espérer lorsque le remplissage du grain se fait dans des conditions de croissance, assez favorable. Belkherchouche *et al.*, (2009) observent que la cinétique d'accumulation de la matière sèche de l'épi, du grain et de la tige, après l'épiaison, en conditions semi-aride, suggère que le génotype productif se caractérise par une vitesse de remplissage des épis/m<sup>2</sup> assez élevée.

### 1.4.2. La sélection pour l'adaptabilité

Pour le sélectionneur une bonne variété doit être stable dans le temps et adaptée dans l'espace. La stabilité dans le temps la rend attractive pour l'agriculteur dont l'objectif est de d'obtenir un haut rendement régulièrement. Par contre le semencier cherche une variété qui soit adaptée à une large zone de production pour intéresser le plus grand nombre d'agriculteurs (Witcombe *et al.*, 2004). Cependant adaptabilité, stabilité et haut rendement grain ne sont pas toujours positivement corrélées (Sinebo *et al.*, 2005).

Les variétés stables et adaptées sont les moins productives. Elles répondent moins à la fertilité du milieu (Menad *et al.*, 2008). Dans ce contexte l'adaptabilité est liée à la tolérance des stress (Annichiarico *et al.*, 2005). De ce fait, la sélection pour l'adaptabilité reste basée sur les caractères indicateurs de la tolérance des stress.

L'adaptation variétale est liée à la phénologie et à une croissance hivernale permettant de valoriser les eaux de pluie. Une croissance active en début du cycle nécessite une moindre sensibilité aux basses températures (Canterro-Martinez *et al.*, 1995). Elle améliore l'utilisation de l'eau et permet une production de biomasse aérienne plus importante. Par ailleurs, une moindre sensibilité à la photopériode permet à la variété d'épier plus tôt, et donc d'être moins exposée aux stress abiotiques de fin de cycle (Ceccarelli *et al.*, 1998 ).

À l'opposé, les variétés ayant des besoins en vernalisation ou en longueur de jour élevés ont une croissance végétative importante qui ne s'exprime que tardivement lorsque leurs besoins en froid et photopériodique sont satisfaits. Ces variétés sont, en général, assez tardives, ce qui leur permet d'esquiver les périodes de gel tardif; en revanche, elles subissent les effets de la sécheresse et des hautes températures de fin de cycle (Mekhlouf *et al.*, 2006).

Parmi les alternatives permettant d'améliorer les rendements en grains, des régions arides et semi- arides où les ressources en eau sont rares, figurent le développement et la sélection de variétés plus économes en eau (Richards *et al.*, 2002; Passioura, 2004). Des augmentations significatives des rendements sont possibles, dans les milieux contraignants, si la sélection est faite pour l'adaptation spécifique, mettant ainsi en valeur les différents terroirs (Annichiarico *et al.*, 2006).

La sélection pour la tolérance induit, certes, une baisse des rendements sous contrainte, mais cette baisse est cependant moins importante chez les génotypes tolérants comparativement à celle notée chez les génotypes sensibles (Fellah *et al.*, 2002 ; Bahlouli *et al.*, 2005). L'utilisation optimale de l'humidité du sol, par la culture, est liée à l'indice foliaire qui s'établit au cours du cycle et à sa modulation en fonction de l'intensité des stress prévalant (Simane *et al.*, 1993 ; Tardieu, 2003).

Pour un stock donné d'eau du sol, le cultivar adapté et économe en eau est celui qui ne fait pas de consommation de luxe au cours de la prè- anthèse (Passioura, 2004). Il module son indice foliaire pour réguler la transpiration en fonction du degré de son approvisionnement en eau (Richards *et al.*, 2002 ; Slafer *et al.*, 2005). Chez les plantes économes en eau, l'évitement de la déshydratation est lié à la réduction des pertes d'eau par les voies cuticulaires et stomatiques.

La recherche d'indicateurs de la capacité de la plante à faire une bonne utilisation de l'eau, sous stress hydrique, est un préalable à la réalisation de progrès en matière d'amélioration du rendement sous contrainte hydrique (Araus *et al.*, 2002). Les critères physiologiques restent très difficiles pour une utilisation sur un grand nombre de lignées comme il est de coutume en sélection. De ce fait les sélectionneurs restent très attachés aux caractères dont la mesuré est facile et possible sur des centaines de sujets.

### 1.5. La sélection assistée par les marqueurs moléculaires

La sélection est faite sur la base de caractères identifiables (Figure 2). Lorsqu'un gène mutant contrôlant un caractère d'intérêt est identifié, il est immédiatement localisé sur la carte génétique, après une série de croisements qui permettent d'établir le taux de recombinaison du gène d'intérêt avec les gènes qui lui sont liés. Ce gène mutant devient à son tour un marqueur pour les gènes qui lui sont liés. L'utilisation des gènes marqueurs pour sélectionner des caractères d'intérêts désirables est dite sélection indirecte (Kotzamanidis *et al.*, 2008).

En sélection classique, chaque lignée est examinée sur son phénotype qui est la résultante de l'expression des gènes façonnée par l'effet du milieu. Il est important pour le sélectionneur de connaître l'aspect purement génétique du caractère étudié, indépendamment de son expression dans un milieu donné. Dans ce contexte de nombreux marqueurs biochimiques ou moléculaires ont été développés.

La sélection assistée par les marqueurs (SAM) est encore à ses débuts chez les céréales, mais des recherches sont conduites pour la développer et l'adapter. Son application est courante dans des programmes d'amélioration des plantes pour la détection de lignées résistantes aux maladies, pour 'pyramider' les gènes et pour l'identification des QTL d'intérêt à déterminisme génétique simple (Virk *et al.*, 2007).

L'application de la SAM est conditionnée par les marqueurs. Les marqueurs morphologiques sont représentés par les caractères morphologiques habituellement utilisés par la sélection classique, comme la hauteur, la précocité, les composantes et le rendement entre autres. Ces marqueurs se caractérisent cependant par certains inconvénients vu leur sensibilité à l'effet du milieu, ce qui les rend peu efficient en sélection. En plus qu'ils sont coûteux dans leur mise en œuvre et ils nécessitent des populations très larges, à conduire sur plusieurs années voire plusieurs environnements (Virk *et al.*, 2007).

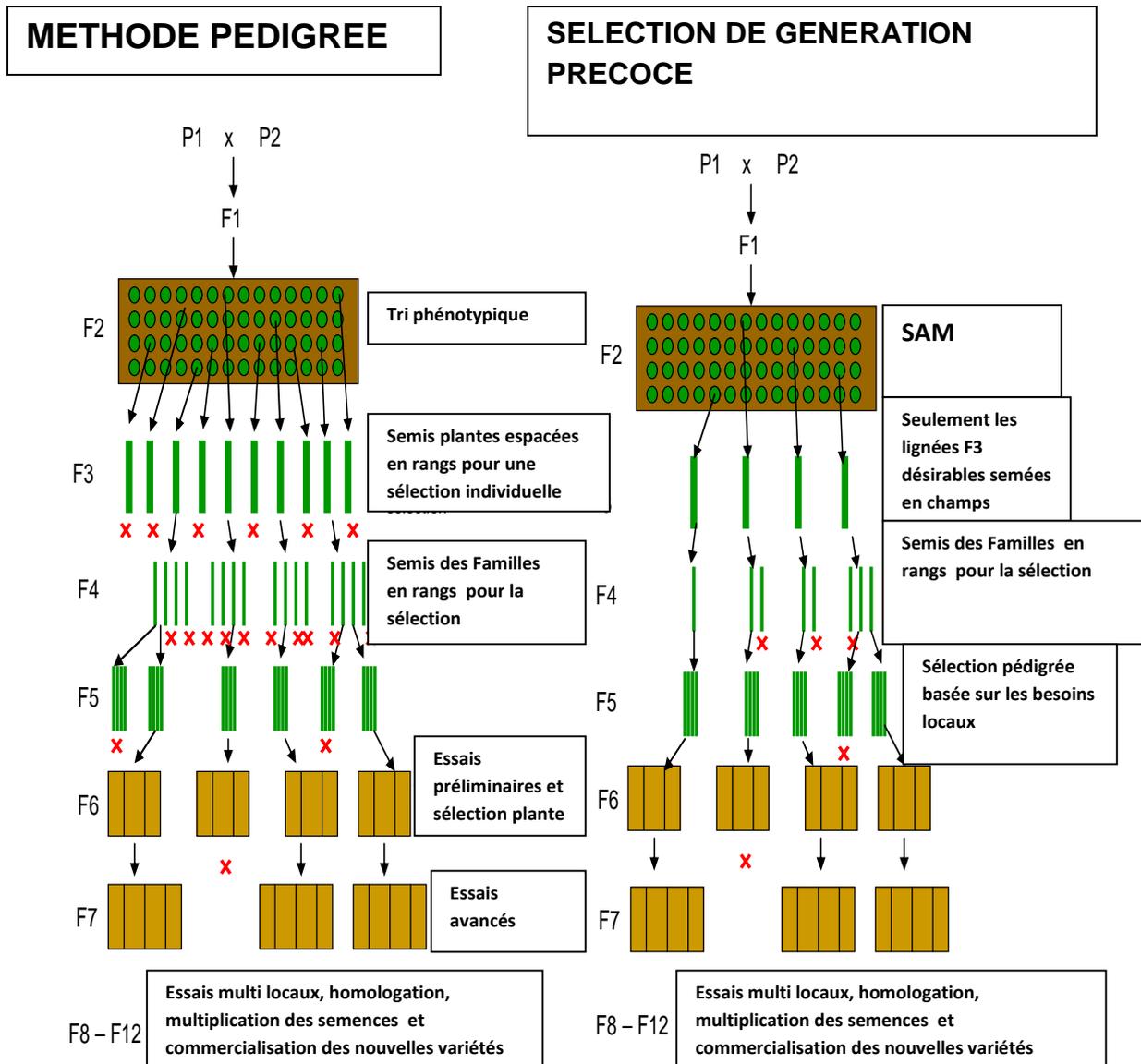


Figure 2. Sélection précoce: comparaison de la sélection classique et la SAM (Kotzamanidis *et al.*, 2008).

Les isozymes sont utilisés comme marqueurs biochimiques, en amélioration des plantes. Ces enzymes sont généralement exprimés dans les cellules végétales. Ils sont extraits et visualisés sur gel de l'électrophorèse pour déterminer le polymorphisme enzymatique. Ces marqueurs sont plus efficaces que les marqueurs morphologiques, cependant ils ne présentent pas un polymorphisme élevé, surtout chez les génotypes homozygotes (Lamkeya *et al.*, 1993). Les marqueurs moléculaires sont basés sur le polymorphisme naturel qui a pour origine l'ADN lui-même et les mécanismes qui lui sont associés dont les phénomènes de délétions, substitutions, additions et patterns (Lamkeya *et al.*, 1993).

Ils existent plusieurs méthodes pour identifier et amplifier le polymorphisme moléculaire de sorte qu'il puisse être utilisé en sélection. L'avantage des marqueurs moléculaires tient au fait qu'ils sont facilement identifiables, présentant un polymorphisme élevé et sont répartis à travers tout le génome. Ces marqueurs sont peu sensibles aux effets de l'environnement, et sont donc aisément reproductibles. Ils sont détectables sur tous les organes de l'individu étudié (feuilles racines, tiges grains), et à tous les stades végétatifs, ce qui permet d'anticiper précocement les meilleures combinaisons géniques.

Ils sont utiles pour la caractérisation du germoplasme, la sélection assistée par des marqueurs et pour les analyses génomiques et phylogénétiques (Mian *et al.*, 1996). Les marqueurs moléculaires sont utilisés pour élaborer des cartes génétiques où chaque chromosome est représenté sous forme d'un ensemble de marqueurs moléculaires dont l'ordre et l'espacement sont déterminés en comparant les individus de la descendance d'un croisement.

Les caractères mono- géniques sont transmis de façon simple à la descendance d'un croisement. Il suffit que le gène responsable soit transmis à une partie de la descendance pour que celle-ci ait le caractère désiré. Même si la séquence du gène

responsable du phénotype intéressant n'est pas connue, ce gène peut être localisé sur une carte génétique et entouré de marqueurs moléculaires. A l'opposé, les caractères correspondent à la combinaison de l'action de plusieurs gènes sont dits «quantitatifs». Les régions chromosomiques impliquées dans l'expression de ces caractères quantitatifs (QTL: *Quantitative Trait Loci*) peuvent être localisées sur une carte génétique à l'aide de méthodes statistiques, et repérées par des marqueurs moléculaires.

Ce travail est réalisé en étudiant la correspondance dans la descendance d'un croisement entre les caractères phénotypiques observés et la présence des marqueurs moléculaires associés (Langridge *et al.*, 2006). Lorsque les QTL sont identifiés, le sélectionneur peut repérer les plantes intéressantes dans la descendance d'un croisement en se basant sur la présence des marqueurs moléculaires proches des gènes contrôlant les caractères recherchés. Grâce aux marqueurs génétiques, il devient possible d'une part d'établir l'empreinte génétique d'un individu, et de suivre les gènes impliqués dans l'expression de caractères d'intérêt agronomique ou technologique (Langridge *et al.*, 2006).

## CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Mise en place de l'expérimentation

L'expérimentation a été conduite sur le site expérimental de la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif. Elle comporte la réalisation des croisements faits au cours de la campagne 2005/2006, le suivi des parents et des hybrides F<sub>1</sub> au cours de la campagne 2006/07, celui de la génération F<sub>2</sub>, en 2007/08 et la génération F<sub>3</sub>, en 2008/09. Parmi les croisements réalisés, ceux qui ont été retenus sont Ofanto/ MBB, Ofanto/ Waha et Ofanto/ MRB<sub>5</sub>.

Les techniques culturales adoptées sont celles préconisées par la station ITGC de Sétif. Elles sont comme suit : le précédent cultural est une légumineuse alimentaire (pois chiche). La parcelle portant l'essai est labourée, au mois de septembre, avec une charrue à soc réversible. Le labour profond est repris par deux fois avec un cover crop 8/16 disques, les deux passages sont espacés dans le temps.

Au mois de novembre, l'engrais phosphaté (super 46%) est épandu à raison de 100 kg ha<sup>-1</sup>. Cette opération est suivie par un cultivateur et une barre désherbeuse pour niveler le sol. Le semis est réalisé après traçage des différents blocs de l'essai. L'expérimentation a été fertilisée avec 100 kg ha<sup>-1</sup> d'urée à 35% au stade tallage. Le contrôle des adventices est effectué avec du GrandStar [*Méthyle tribénuron*] à 12 g dans 250 l d'eau ha<sup>-1</sup>.

## 2.2. Aperçu des conditions climatiques des campagnes 2006/07, 2007/08 et 2008/09

Les trois dernières campagnes se caractérisent par un volume pluviométrique, enregistré entre septembre et juin, variable du point de vue volume et répartition (figure 4)

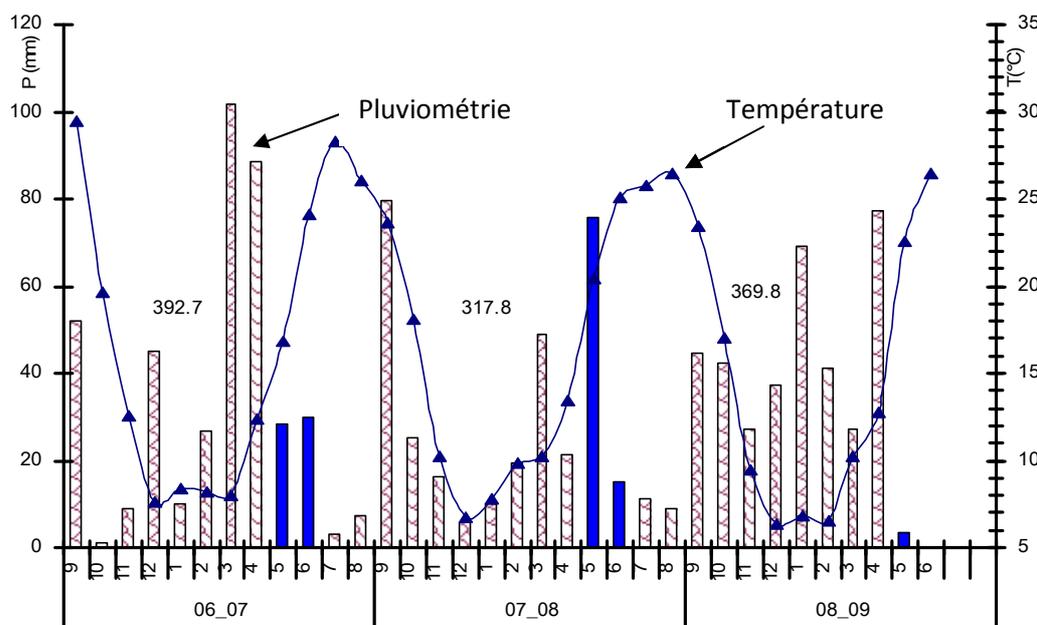


Figure 4. Pluie et température moyennes mensuelles des campagnes concernées par l'étude

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 4)

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 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 dessus de 10°C à près de 25°C (Figure 4). Ce phénomène pousse la végétation à terminer un cycle qui vient juste de démarrer et de ce fait à raccourcir la durée de la phase de remplissage du grain qui représente moins de 20% la durée du cycle (Haddad, 2010).

### **2.3. Matériel végétal :**

Les lignées parentales montrent une adaptation toute relative à la région de Sétif vu qu'elles ont été sélectionnées sur le même site expérimental.

Mrb<sub>5</sub> est une lignée issue du croisement entre Joric<sub>069</sub> et Haurani (Joric<sub>069</sub>/Hau). Ofanto est une variété italienne provenant du croisement entre les variétés Appulo et Valnova (Devita *et al.*, 2007).

Waha est une sélection de l'ITGC de Sétif, elle est issue du croisement entre Pelicano, Ruffino, Gaviota et Rolette (Plc/Ruff//Gta's'/Rol).

Mohammed Ben Bachir est une sélection généalogique d'une population locale de blé dur de la région de Ain Roua, (Nord de Sétif), portant le même nom.

### **2.4. Méthodes :**

**2.4.1. La génération F<sub>1</sub> et les parents** (Les notations ont été faites par Messieurs Bouzerzour et Benmahammed) 20 grains F<sub>0</sub> des différents croisements ont été semées, au milieu des lignées parentales, sur un rang de 5 m de long.

15 plantes F<sub>1</sub>, par croisement, ont été récoltées à maturité, pour produire la semence F<sub>2</sub>.

#### **2.4.2. La génération F<sub>2</sub> et les parents**

La génération F<sub>2</sub> a été mise en place sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif, le 9 du mois de novembre 2007. Cette génération a été semée sur des rangs de 5 m de long par 20 cm d'écartement entre rangs successifs. Dix rangs ont été semés par croisement, avec un espace entre grains (plantes) de 10 cm. Les lignées parentales : Ofanto, Waha, Mrb<sub>5</sub> et Mohammed Ben Bachir ont été semées sur 6 rangs de mêmes dimensions au début et à la fin de chaque croisement et répétées trois fois (parcelle de 6 m<sup>2</sup>) à une densité de 250 grains/m<sup>2</sup>.

#### **2.4.3. La génération F<sub>3</sub> et les parents**

La génération F<sub>3</sub> a été mise en place sur le site expérimental de la station ITGC de Sétif, le 18 du mois de novembre 2008. Cette génération a été semée sur des rangs de 5 m de long par 20 cm d'écartement entre rangs successifs, à raison de 2 rangs par lignée. 120 lignées par croisement ont été mises en place. Les lignées parentales Ofanto, Waha, Mrb<sub>5</sub> et Mohammed Ben Bachir, ont été semées sur des rangs de même dimensions, et répétées tous les 40 numéros. La densité de semis adoptée était de 200 grains m<sup>-2</sup>.

#### **2.5. Variables mesurées**

Les variables mesurées sur les plantes F<sub>1</sub> et les parents sont la hauteur, la biomasse aérienne totale et le poids des épis. Le plant est pris comme l'unité expérimentale sur laquelle les mesures sont effectuées (la répétition). Sur la génération F<sub>2</sub>, les mesures ont été effectuées au stade maturité sur les lignées parentales et les F<sub>2</sub>. Des plants ont été récoltés et sur lesquels les déterminations de la biomasse aérienne, le nombre d'épis, le poids des épis et la hauteur de la plante ont été faites.

Sur la génération F<sub>3</sub> et les parents les mêmes paramètres ont été mesurés. La durée de la phase végétative est comptée, en jours calendaires du 1<sup>er</sup> janvier à la date de réalisation de l'épiaison. La hauteur du chaume, en cm, est prise à maturité, du niveau du sol au sommet de la strate moyenne des épis, barbes non incluses. La biomasse aérienne du bottillon de végétation récolté sur un rang de 1 m de long est mesurée, à maturité. Du même bottillon, le nombre et le poids des épis sont déterminés.

Les épis comptés sont passés à la batteuse à gerbe pour obtenir le grain qui est utilisé pour la détermination du rendement. Le poids de 1000 est déterminé par comptage et pesage de 200 grains par lignée. Les nombres de grains par unité de surface et par épi sont déterminés par calcul, utilisant les formules suivantes :

$$\text{NGM}^2 = 1000(\text{RDT}/\text{PMG}) \quad \text{et} \quad \text{NGE} = \text{NGM}^2/\text{NE} \quad \text{avec :}$$

NGM<sup>2</sup> = nombre de grains m<sup>-2</sup>

RDT = rendement en g m<sup>-2</sup>,

PMG = poids de 1000 grains en g

NE = nombre d'épis m<sup>-2</sup>,

NGE = nombre de grains par épi.

## 2.6. Analyse des données

Pour les F<sub>1</sub> et les parents, l'analyse est faite selon un dispositif en bloc avec 15 répétitions et 7 générations (4 parents + 3 F<sub>1</sub>). Les écarts des valeurs de l'hybride par rapport à celles du parent moyen, qui représentent l'hétérosis (h<sub>1</sub>), sont calculés comme suit :

$$h_1 = 100(X_{F_1} - X_{PM})/X_{PM}$$

X<sub>F<sub>1</sub></sub> = moyenne de l'hybride, X<sub>PM</sub> = moyen du parent moyen = (X<sub>P<sub>1</sub></sub> + X<sub>P<sub>2</sub></sub>)/2, avec P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> sont les parents croisés.

Pour les F<sub>2</sub>, les variables mesurées sur des plantes individuelles, sont traitées par l'analyse des statistiques descriptives : moyennes, valeurs minimale, maximale, amplitude et variance. Les relations entre variables mesurées, chez les parents et les lignées F<sub>2</sub>, sont étudiées par l'analyse de régression, des corrélations phénotypiques et l'analyse en chemin. Dans cette dernière analyse, le poids des épis est pris comme variable dépendante, et les variables hauteur du chaume, biomasse mesurée à maturité et le nombre d'épis par plante comme variables causales (Figure 3).

L'analyse en chemin est faite pour estimer les effets directs et indirects des variables influentes sur le poids des épis selon la méthode rapportée par Garcia Del Moral *et al.*, (2005). Les effets directs (P<sub>i</sub>) sont estimés par les coefficients de régression partiels (béta) donnés par la régression progressive. Les effets indirects (P<sub>j</sub>) sont déduits par le produit du coefficient de corrélation (r) entre les deux caractères d'intérêts (i et j) et l'effet direct (P<sub>i</sub>) du caractère lié (Figure 3).

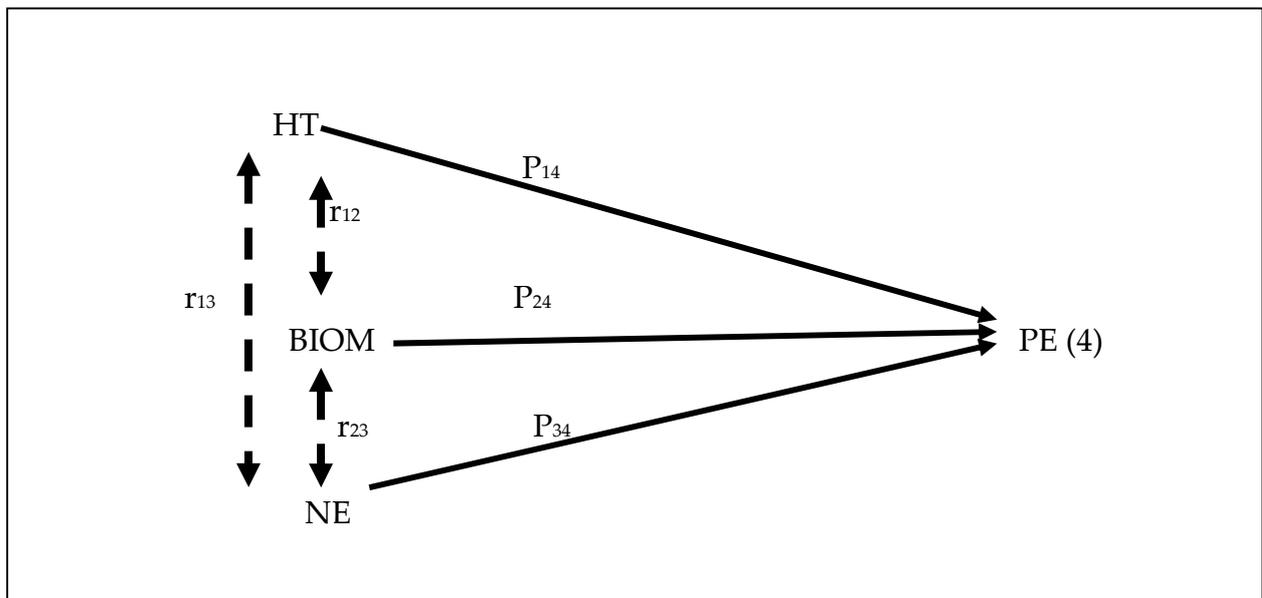


Figure 3. Modèle de l'analyse en chemin appliqué au poids des épis de la F<sub>2</sub>

Les composantes de la variation sont déduites pour estimer le degré d'héritabilité des caractères mesurés ainsi que les coefficients de la variabilité phénotypique (CV<sub>P</sub>) et génotypique (CV<sub>G</sub>). Ces coefficients sont calculés par caractère par le rapport des variances phénotypique et génotypique sur la moyenne du caractère :

$$CV_P (\%) = 100 \sigma^2_P / \text{moyenne}$$

$$CV_G (\%) = 100 \sigma^2_G / \text{moyenne}$$

où  $\sigma^2_P$  et  $\sigma^2_G$  sont la variance phénotypique totale et sa composante génétique. Les composantes de la variance sont estimées sur la base du calcul des variances de la F<sub>2</sub>, prise comme étant égale à la variance phénotypique totale ( $\sigma^2_P$ ), la variance des parents est prise comme étant égale à la variance résiduelle ( $\sigma^2_e$ ), et la composante génétique de cette variance qui est déduite par différence (Falconer, 1982):

$$\sigma^2_G = \sigma^2_P - \sigma^2_e$$

Le degré d'héritabilité au sens large ( $h^2_{BS}$ ) est estimé par le rapport de la variance génétique sur la variance phénotype totale :

$$h^2_{BS} = \sigma^2_G / \sigma^2_P$$

La réponse attendue à la sélection (RS) directe, appliquée à la F<sub>2</sub>, sur la base du caractère d'intérêt, attendue en F<sub>3</sub>, est estimée par :

$$RS = i h^2 \sqrt{\sigma^2_P}$$

où  $i$  est la différentielle de la sélection standardisée en unité d'écart type, au seuil de 10% ( $i = 1.76$ ),  $\sigma^2_P$  est la variance phénotypique de la population F<sub>2</sub> concernée (Allard, 1964 ; Falconer, 1982).

La sélection est envisagée sur la base des caractères liés qui sont la biomasse aérienne, le poids des épis, le nombre d'épis et éventuellement sur la base de la hauteur des plantes. La réponse est déduite uniquement pour de la biomasse et le poids des épis. La réponse, observée en F<sub>3</sub>, (R<sub>obs</sub>) de la fraction sélectionnée est déduite par :

$$R_{obs} = \mu' - \mu_{F3}$$

ou  $\mu'$  = moyenne observée en F<sub>3</sub> de la fraction sélectionnée en F<sub>2</sub>,  $\mu_{F3}$  = moyenne de la population F<sub>3</sub>, (Allard, 1964 ; Falconer, 1982). L'effet de la sélection directe sur les caractères non concernés par la sélection, dite sélection corrélative, est discuté.

L'efficacité d'un programme de sélection dépend de la capacité du sélectionneur à isoler les individus ou familles d'individus supérieurs pour plusieurs caractéristiques. Parmi les méthodes de détermination des individus supérieurs figure la sélection sur indice. L'indice de sélection est une fonction qui intègre plusieurs caractéristiques d'intérêt en sélection. Il existe des modèles d'indice d'utilisation simple, ne nécessitant pas le calcul des poids économiques (Strefeler et Wehner, 1986).

Parmi ces modèles, on a celui d'Elston (1963) qui est indépendant des poids économiques (Elston Weight-free Index = EMFI). Mulamba et Mock (1978) proposent l'indice de classement (Rank Summation Index = RSI) qui est basé sur la somme des rangs des caractères inclus dans l'index. Pesek et Baker (1969) proposent l'indice basé sur le gain génétique désiré (Desired Gain Index = DGI), pour lequel il est nécessaire de déterminer le gain à réaliser sur chaque caractère inclus dans l'index.

Baker (1974) propose l'indice standardisé (Baker's Standardized Index = BSI). Le BSI est une fonction linéaire basée sur la somme des moyennes standardisées des caractères entrant l'indice. Chaque moyenne est divisée par l'écart type du caractère en question. Wehner (1982) développe un indice dans lequel chaque caractère est corrigé de sorte que sa valeur augmente à mesure que le caractère s'améliore.

Les valeurs des caractères sont transformées pour qu'elles soient exprimées dans une même échelle (réduction). Ensuite la valeur de chaque caractère est multipliée par une fraction de l'unité, indiquant son importance dans le processus de sélection envisagé. La somme des valeurs résultantes est utilisée pour calculer le mérite (genetic worth) des individus soumis à la sélection. Les indices comparés dans la présente étude sont ci-dessous expliqués.

L'indice d'Elston (1963) (EWFI) est calculé comme la somme du produit des différences entre les valeurs mesurées déduites des valeurs minimales pour les caractères entrant dans l'index :

$$\text{EWFI} = (x_1 - d_1)(x_2 - d_2) \dots (x_i - d_i),$$

où  $x_i$  est la valeur mesurée par lignée pour le caractère considéré et  $d_i$  est la valeur minimale pour ce caractère.

L'indice de Baker (1974) (BSI) est calculé comme la somme des valeurs mesurées standardisées par leur écart type pour les caractères entrant dans l'index :

$$\text{BSI} = \sum \frac{X_i}{\sigma \cdot p_i}$$

où  $x_i$  est la valeur mesurée par lignée pour le caractère considéré et  $\sigma p_i$  est l'écart type phénotypique du caractère.

L'inde de Mulamba et Mock (1978) est calculé par la somme des rangs des valeurs des caractères inclus dans l'index :

$$\text{RSI} = \sum \text{rank } X_i$$

où rank est l'ordre de classement des valeurs  $x_i$  des caractères considérés.

L'indice de Wehner (1982), dit Simple- Weighted Index (SWI) est calculé comme suit:

$$SWI = \sum a_i (X_i/\sigma_p)$$

où  $a_i$  = fraction de 1 indiquant l'importance du caractère  $i$  dans l'équation de l'index et  $X_i$  = la valeur du caractère  $i$ , prise par la lignée, standardisée en unité d'écart type. Dans le cas de la présente étude, les valeurs  $a_i$  sont les suivantes  $a_1= 0.4$ ,  $a_2= 0.1$ ,  $a_3 =0.2$  et  $a_4= 0.3$  respectivement pour la biomasse ( $X_1$ ), la hauteur ( $X_2$ ), le nombre d'épis ( $X_3$ ) et le poids des épis ( $X_4$ ). Les analyses statistiques ont été faites avec les logiciels freeware CropStat 7.2.3 (2009), Past (Hammer et al., 2001) et Excel (2003).

## Chapitre III - Résultats et discussion

### 3.1. Analyse de la génération F<sub>1</sub>

Les croisements sont réalisés, avec l'objectif de pouvoir recouvrir dans la descendance les caractéristiques désirables que portent les lignées parentales croisées. L'analyse de la variance des trois variables mesurées sur les lignées parentales et les hybrides F<sub>1</sub> indique un effet génération significatif pour les trois caractères. La comparaison globale des 3 hybrides F<sub>1</sub> à la moyenne des 4 génotypes parentaux, donné par le contraste F<sub>1</sub> vs parents, indique une différence pour la hauteur du chaume uniquement (Tableau 4).

Tableau 4. Analyse de la variance des variables mesurées chez les parents et les hybrides

Source	ddl	BIO	HT	PE
Génération	6	127.3**	3239.9**	138.1*
F1 vs Parents	1	41.5 <sup>ns</sup>	538.9*	20.2 <sup>ns</sup>
Erreur	98	37.1	54.6	13.2

BIO = biomasse aérienne, HT = hauteur du chaume, PE = poids des épis.

Les parents, suite à la présence de la variété MBB, à paille très haute, présentent une hauteur de chaume significativement plus élevée que celle des hybrides, les moyennes étant de 95.8 cm pour les parents vs 87.8 cm pour les hybrides. Peu de différences apparaissent entre les hybrides et les parents pour la biomasse et le poids des épis, dont les moyennes sont de 29.4 et 31.9 et 16.7 et 17.3 respectivement pour les parents et les F<sub>1</sub>. Pour la biomasse aérienne, les plus faibles valeurs moyennes sont notées chez Ofanto/MBB et Ofanto/Waha. La hauteur, la plus élevée, est notée chez MBB et MRB<sub>5</sub>. Le meilleur poids des épis est exprimé par Ofanto, Waha et l'hybride Ofanto/MRb<sub>5</sub> (Tableau 5).

Tableau 5. Valeurs moyennes des caractères mesurés chez les parents et les hybrides

Genotype	BIO (g)	HT (cm)	PE (g)
Mrb <sub>5</sub>	31.5	100.3	17.2
MBB	30.4	125.4	12.1
Waha	30.7	87.6	18.6
Ofanto	34.7	79.6	21.6
Ofanto/Mrb <sub>5</sub>	33.9	96.4	19.4
Ofanto/MBB	26.8	95.7	13.2
Ofanto/Waha	27.5	80.6	17.4
Ppds <sub>5%</sub>	4.45	5.39	2.65

BIO = biomasse aérienne, HT = hauteur du chaume, PE = poids des épis.

Une liaison significative existe entre la biomasse aérienne et le poids des épis par plant. Cette liaison confirme que le poids des épis est une composante déterminante de la biomasse aussi bien chez les parents que chez les hybrides (Figure 5). Par contre, le poids des épis par plant montre une liaison négative avec la hauteur du chaume. Ceci suggère que pour avoir un poids des épis élevé, il faut consentir une importante réduction de la hauteur du chaume (Figure 6).

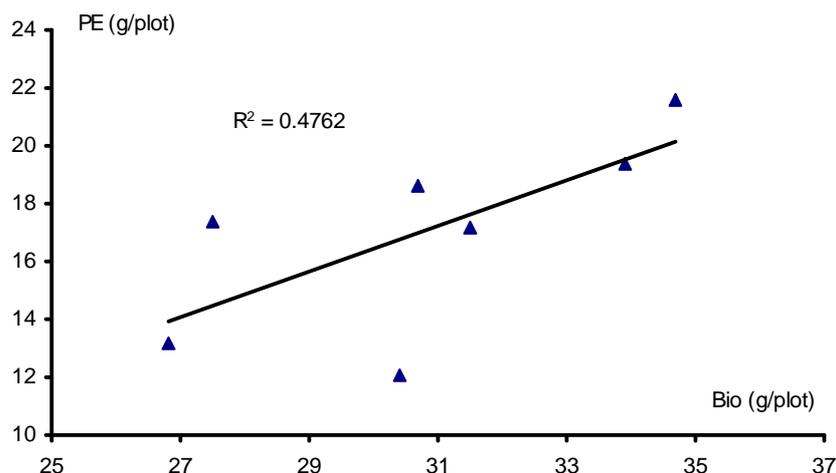


Figure 5. Liaison entre la biomasse aérienne et le poids de épis par plant

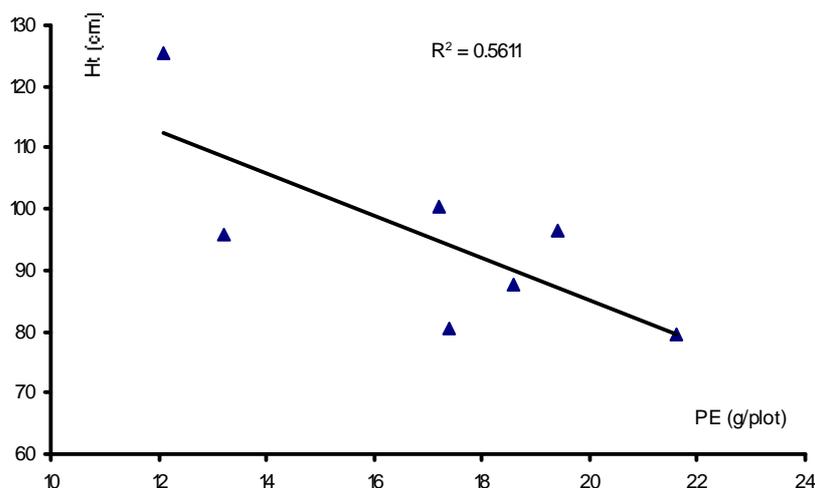


Figure 6. Liaison entre le poids des épis par plant et la hauteur du chaume

Les écarts de valeurs relativement au parent moyen (PM) des différents croisements sont donnés au tableau 6. L'absence de dominance exprimée par la biomasse du croisement Ofanto/ Mrb<sub>5</sub> est une indication d'un effet additif des gènes. Par contre, il y a présence de dominance incomplète chez Ofanto/MBB et Ofanto/Waha. La dominance agit dans le sens de la réduction de la valeur moyenne de la biomasse aérienne (Tableau 6, Figure 7).

Tableau 6. Hétérosis (h<sub>1</sub>) exprimé par les différents hybrides F<sub>1</sub> relativement au parent moyen (PM).

Croisement	variable	PM	F1	écart	h <sub>1</sub> (%)
Ofanto/Mrb <sub>5</sub>	BIO	33.1	33.9	0.80	2.4 <sup>ns</sup>
	HT	89.95	96.4	6.45	7.17*
	PE	19.4	19.4	0.00	0.00 <sup>ns</sup>
Ofanto/MBB	BIO	32.55	26.8	-5.75	17.97*
	HT	102.5	95.7	-6.80	6.63*
	PE	16.85	13.2	-3.65	21.66*
Ofanto/Waha	BIO	32.7	27.5	-5.20	15.90*
	HT	83.6	80.6	-3.00	3.59 <sup>ns</sup>
	PE	20.1	17.4	-2.70	13.43*

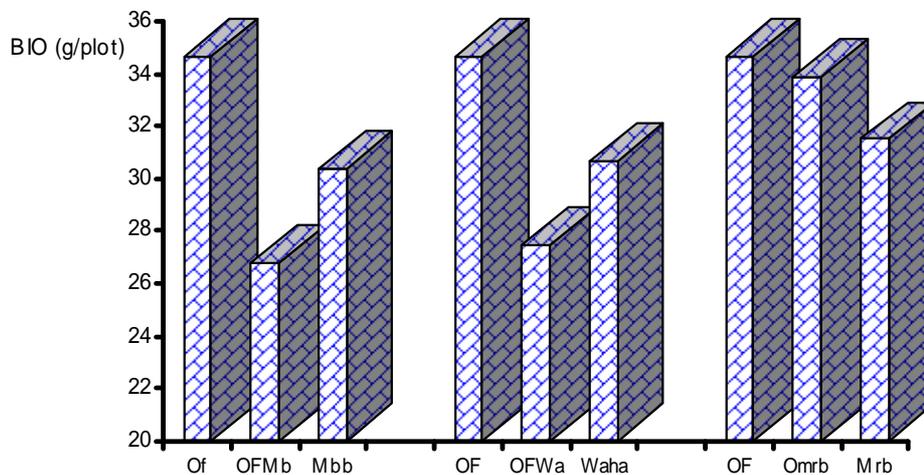


Figure 7. Moyennes de la biomasse des hybrides et leurs parents

Pour la hauteur, on note un effet additif des gènes chez Ofanto/Waha et un effet de dominance incomplète chez Ofanto/MBB et Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (Tableau6, Figure8).

On note aussi peu de différences entre Ofanto et Waha, par contre les différences sont plus marquées entre MBB, Ofanto et Mrb<sub>5</sub> (Tableau 6, Figure 8).

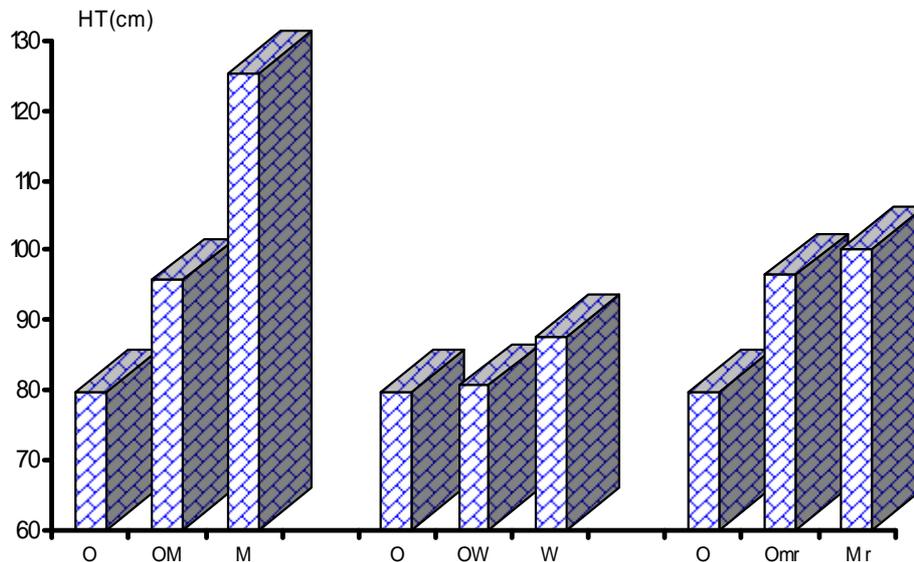


Figure 8. Moyennes de la hauteur du chaume des hybrides et leurs parents

(O= Ofanto, M = Mohammed Ben Bachir, W= Waha, Mr= Mrb<sub>5</sub>, OM = Ofanto MBB, OW= Ofanto/Waha et Omr= Ofanto/Mrb<sub>5</sub>)

Les gènes dominants agissent dans le sens de la réduction de la hauteur du chaume du croisement Ofanto/MBB et dans le sens inverse chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (Tableau 6, Figure 8). Pour le poids des épis par plant, le croisement Ofanto/Mrb<sub>5</sub> exprime un effet additif des gènes contrôlant ce caractère (Tableau 6, Figure 9). Par contre, on note un effet de dominance complète chez les croisement Ofanto/MBB et Ofanto/Waha (Tableau 6, Figure 9). Les gènes dominants agissent dans le sens de la réduction de la valeur moyenne du poids des épis par plant (Figure 9).

Le poids des épis comme celui de la biomasse arienne sont des indicateurs précieux de la capacité de production de l'hybride et de sa descendance. Sur cette base, les résultats des trois croisements réalisés montrent que le meilleur hybride pour ces caractéristiques est Ofanto/Mrb<sub>5</sub>.

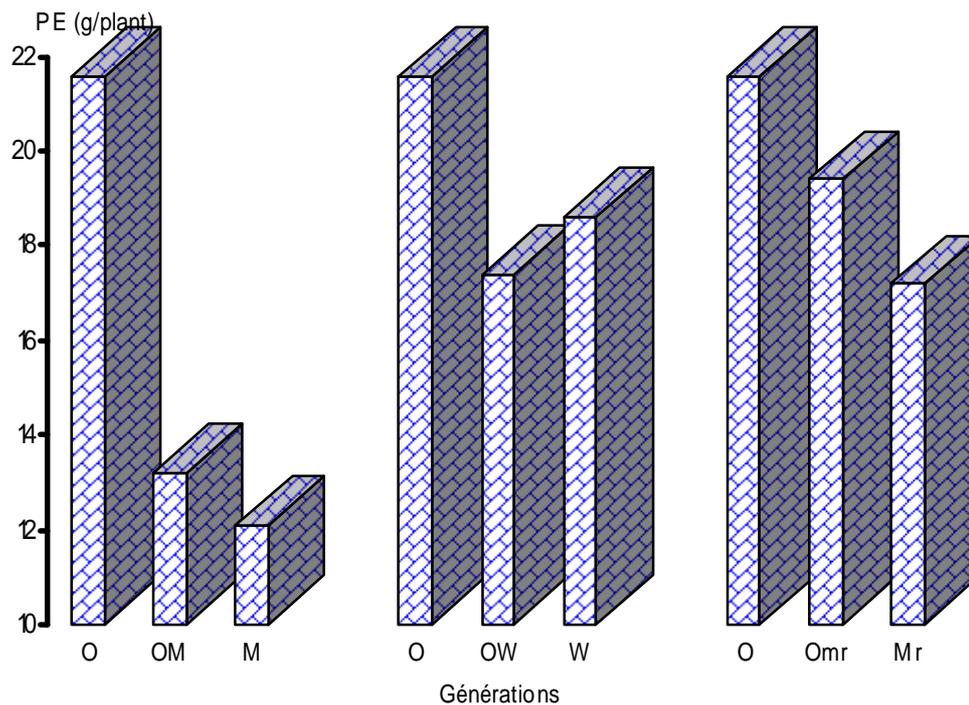


Figure 9. Moyennes du poids des épis des hybrides et des parents (O= Ofanto, M = Mohammed Ben Bachir, W= Waha, Mr= Mrb<sub>5</sub>, OM = Ofanto/ MBB, OW= Ofanto/Waha et Omr= Ofanto/Mrb<sub>5</sub>)

### 3.2. Analyse de la génération F<sub>2</sub>

#### 3.2.1. Etude de la variabilité

Parmi les croisements étudiés, Ofanto/Waha se distingue par la plus faible biomasse aérienne par plante, alors qu'Ofanto/Mrb<sub>5</sub> se caractérise par la plus grande variabilité et pour l'ensemble des variables mesurées (Tableau 7, Figure 10). La hauteur, la plus élevée, est exprimée par le croisement Ofanto/MBB suite à l'importante hauteur de MBB. Au vu des valeurs maximales exprimées, pour sélectionner sur la base de la biomasse, le croisement Ofanto/Mrb<sub>5</sub> est le plus indiqué.

Tableau 7. Moyennes, variances ( $\sigma^2$ ), coefficients de variation phénotypique ( $CV_P$ , %) et génotypique ( $CV_G$ , %) et hérabilité au sens large ( $h^2_{bs}$ ) des caractères de la F<sub>2</sub>

Xsement	Trait	Moy	Mini	Maxi	Ampl	$\sigma^2_{F2}$	$CV_P$	$CV_G$	$h^2_{bs}$
OF/MBB	BIO	21.6	7.6	52.5	44.9	79.0	41.1	35.2	73.3
OF/Waha	BIO	16.6	4.3	45.7	41.4	64.7	48.2	40.3	69.8
OF/Mrb <sub>5</sub>	BIO	19.6	5.7	80.7	75.0	188.7	69.8	66.7	91.2
OF/MBB	HT	79.5	45.0	107.0	62.4	234.8	19.2	17.8	85.6
OF/Waha	HT	60.3	45.0	70.0	25.0	31.1	9.2	7.2	60.7
OF/Mrb <sub>5</sub>	HT	65.8	37.0	105.0	68.0	186.0	20.7	19.4	88.1
OF/MBB	NE	3.4	1.0	9.0	8.0	1.7	38.4	31.1	65.7
OF/Waha	NE	3.0	1.0	8.0	7.0	1.6	42.0	34.1	65.9
OF/Mrb <sub>5</sub>	NE	3.2	1.0	15.0	14.0	4.2	63.3	58.7	86.1
OF/MBB	PE	10.3	2.5	24.6	22.1	19.5	42.7	36.3	72.1
OF/Waha	PE	9.2	1.9	30.9	29.0	25.8	55.1	45.1	67.0
OF/Mrb <sub>5</sub>	PE	9.3	1.7	44.2	42.4	52.0	77.2	72.1	87.1

Ofanto/MBB est tout indiqué pour la sélection sur la base de la hauteur du chaume (Tableau 7, Figure 11). Les différences entre croisements pour les épis sont faibles ; alors que pour le poids des épis, c'est Ofanto/Mrb<sub>5</sub> qui présente les meilleures valeurs moyennes. Les coefficients de variation sont moyens à faibles et l'hérabilité au sens large est moyenne, sauf pour Ofanto/Mrb<sub>5</sub> qui présente des  $h^2_{bs}$  élevées comparativement aux autres croisements et pour les 4 variables mesurées (Tableau 7).

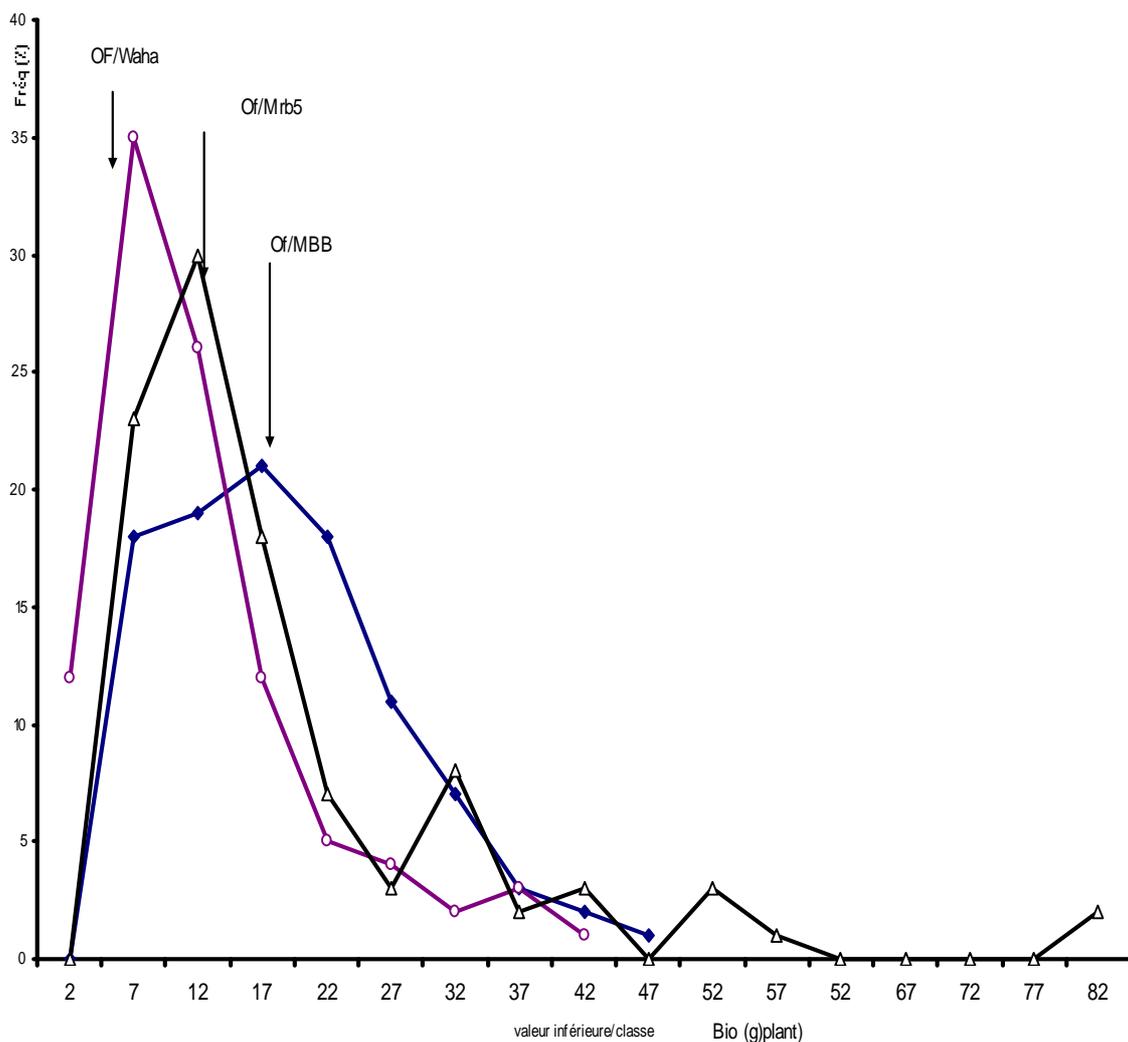


Figure 10. Variation comparée de la biomasse par plante de la génération F<sub>2</sub> des 3 croisements

L'étude des corrélations indique que la biomasse est positivement corrélée aux épis et au poids des épis des 3 croisements (Tableau 8). Le nombre d'épis est positivement lié au poids des épis. La relation de la hauteur avec les trois autres variables est peu perceptible comme indiquée par la faible corrélation. La régression du poids des épis sur la biomasse aérienne des différents croisements est indiquée en figure 12.

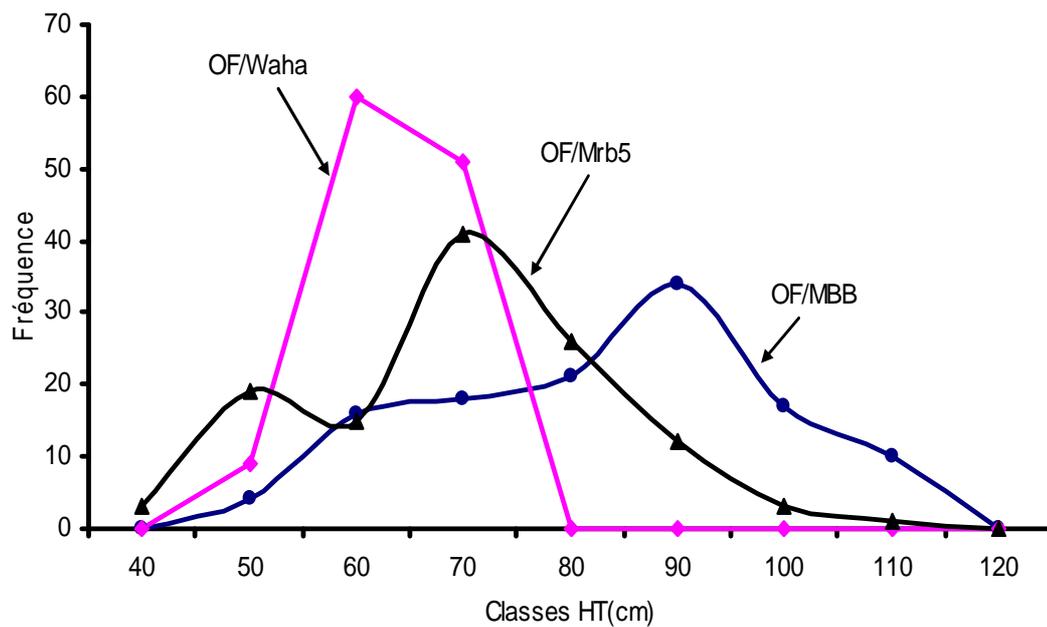


Figure 11. Variation comparée de la hauteur des plantes de la génération F<sub>2</sub> des 3 croisements.

Tableau 8. Coefficients de corrélation entre les variables mesurées chez les F<sub>2</sub> des 3 croisements et effet direct (Pi) de la hauteur du chaume, de la biomasse et du nombre d'épis sur le poids des épis.

Xsement	Trait	HT	NE	PE	Pi
Ofanto/MBB	BIO	0.282*	0.814**	0.917**	<b>0.432**</b>
	HT		0.107 <sup>ns</sup>	0.184 <sup>ns</sup>	<b>-0.160<sup>ns</sup></b>
	NE			0.778**	<b>0.643**</b>
Ofanto/Mrb5	BIO	0.549**	0.914**	0.973**	<b>0.694**</b>
	HT		0.418**	0.508**	<b>-0.116<sup>ns</sup></b>
	NE			0.926**	<b>0.543**</b>
Ofanto/Waha	BIO	0.431**	0.891**	0.973**	<b>1.271**</b>
	HT		0.373**	0.464**	<b>-0.148<sup>ns</sup></b>
	NE			0.898**	<b>0.545**</b>

n= 120 plantes, r<sub>5%</sub>= 0.174 et r<sub>1%</sub>= 0.228

Cette régression confirme l'étroite liaison entre la biomasse et le poids des épis chez les trois populations F<sub>2</sub>, suggérant que la sélection biomasse aérienne améliore le poids des épis. Une telle sélection est plus efficace à l'intérieure de Ofanto/Waha

suivi de Ofanto/Mrb5 comparativement à Ofanto/MBB. En effet les coefficients de régression prennent les valeurs de 0.6156, 0.5111 et 0.4650, respectivement pour les trois populations dans l'ordre cité ci-dessus.

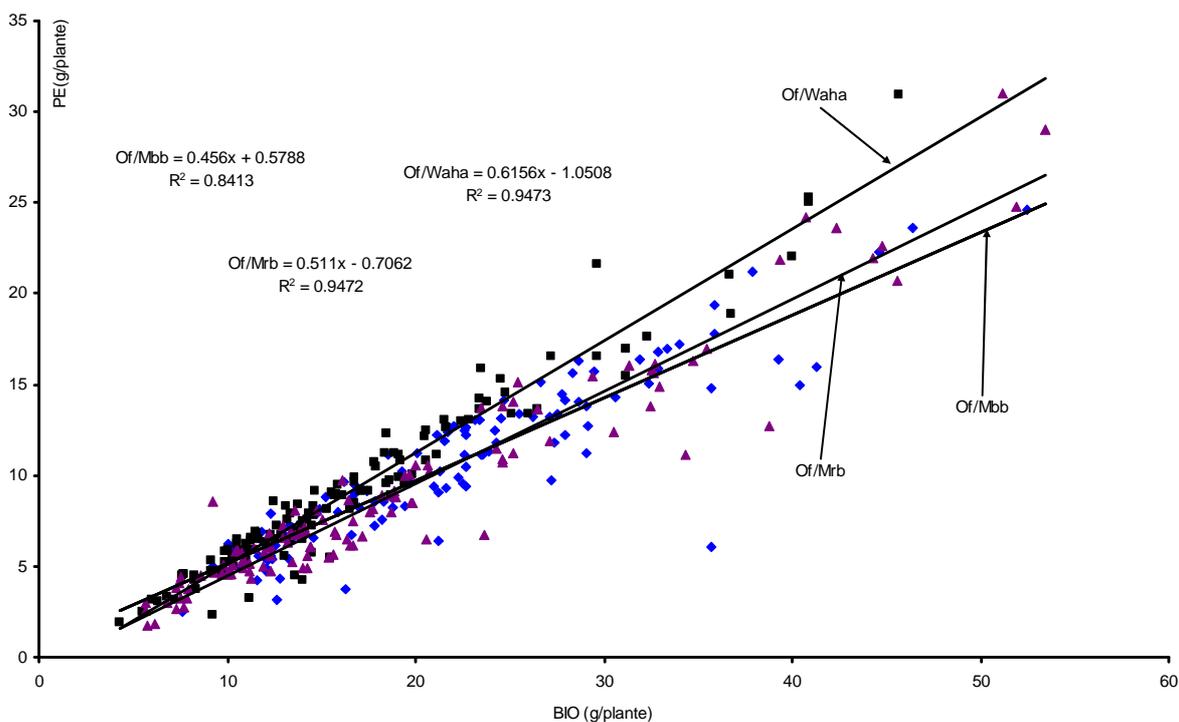


Figure 12. Relation entre le poids des épis (PE) et la biomasse aérienne (BIO) mesurées chez les F<sub>2</sub> des 3 croisements

L'analyse en chemin montre que la biomasse aérienne et le nombre d'épis présentent l'effet direct le plus important sur l'expression du poids des épis. L'effet direct de la hauteur est peu perceptible chez les 3 croisements (Tableau 8). Ces résultats corroborent ceux de De Vita *et al.*, (2007) qui mentionnent que le gain génétique obtenu sur blé dur, en Italie, était associé à l'augmentation du nombre de grains produit par m<sup>2</sup>, de la biomasse aérienne et de nombre d'épis et à la réduction de la hauteur du chaume.

### 3.2.2. Etude de la réponse à la sélection

#### 3.2.2.1. Sélection mono-caractère

L'étude des caractères mesurés chez la génération F<sub>2</sub> des trois populations indique une variation phénotypique élevée. Les variances génétiques et l'héritabilité sont moyennes à élevées pour la biomasse, le nombre d'épis et le poids des épis. Ces résultats suggèrent que la sélection sur la base de ces caractères serait efficace.

Golabadi *et al.*, (2005) mentionnent cependant que la sélection sur la base de la biomasse doit être faite sous conditions favorables, alors que sous conditions défavorables, la sélection doit être conduite sur la base du poids de l'épi et du poids de 1000 grains.

Cooper *et al.*, (1997) rapportent, par contre, que la sélection précoce, directe ou indirecte, est peu efficace sous stress. Ces auteurs font remarquer que, dans l'attente d'une meilleure compréhension des mécanismes physiologiques contrôlant de la tolérance aux stress, la sélection doit être conduite sous conditions favorables. Brancourt-Hulmel *et al.*, (2005) proposent de pratiquer la sélection navette sous conditions favorables et défavorables à la fois.

La réponse prédite, mesurée en F<sub>3</sub>, à la sélection directe, pratiquée en F<sub>2</sub>, peut être envisagée sur la base des caractères liés qui sont la biomasse aérienne, le poids des épis, le nombre d'épis et éventuellement sur la base de la hauteur des plantes. Dans la présente étude, la réponse est déduite uniquement pour la biomasse et le poids des épis.

Pour une intensité de sélection 10%, la valeur de table de l'intensité de sélection  $i$  est de 1.76 (Falconer, 1982). Les valeurs de la différentielle de sélection varient de 18.35 à 32.42 g/plante pour la biomasse, alors que celles du poids des épis varient de 8.74 à 31.33 g/plante (Tableau 9).

Tableau 9. Réponse attendue (R) de la sélection sur la base de la biomasse aérienne et du poids des épis, moyenne de la génération F<sub>2</sub> ( $\mu_{F_2}$ ), moyenne de la fraction sélectionnée ( $\mu_s$ ), différentielle de sélection (S) et moyenne attendue de la descendance de la fraction sélectionnée ( $\mu'$ ).

Croisement	critère	R	$\mu_{F_2}$	$\mu_s$	S	$\mu'$
Ofanto/MBB	BIO	0.53	21.61	39.96	18.35	22.14
Ofanto/Waha	BIO	0.59	16.69	35.17	18.48	17.28
Ofanto/Mrb <sub>5</sub>	BIO	1.12	19.66	52.08	32.42	20.78
Ofanto/MBB	PE	0.54	10.34	19.08	8.74	10.88
Ofanto/Waha	PE	0.65	9.22	20.69	11.47	9.87
Ofanto/Mrb <sub>5</sub>	PE	1.18	9.34	40.67	31.33	10.52

Les valeurs de la réponse attendue sont indiquées au tableau 9. La descendance aux meilleures performances pour la biomasse aérienne attendue est celle issue du croisement Ofanto/MBB. (Tableau 9).

Suite au fait que le poids des épis présente une liaison très étroite avec la biomasse aérienne, 67 à 92% des individus sélectionnés sur la base de la biomasse, se retrouvent sélectionnés aussi sur la base du poids des épis (Tableau 10).

Tableau 10. Numéros et valeurs des 10% des lignées F<sub>2</sub> (les meilleures) sélectionnées sur la base de la biomasse aérienne (BIO) et du poids des épis (PE) chez les 3 croisements

Ofanto/MBB		Ofanto/Waha		Ofanto/Mrb <sub>5</sub>	
N°	BIO	N°	BIO	N°	BIO
4	34.0	4	27.2	48	35.5
64	35.7	120	29.6	67	38.8
69	35.7	98	29.7	66	39.3
14	35.9	25	31.2	33	44.3
63	35.9	31	31.2	10	44.8
5	37.9	106	32.3	97	45.6
71	39.3	53	36.7	27	51.2
32	40.4	77	36.8	69	51.9
38	41.3	110	40.0	36	53.5
33	44.6	29	40.9	90	58.8
80	46.4	119	40.9	60	80.7
29	52.5	112	45.7	117	80.7
$\mu_S$	40.0		35.2		52.1
$\mu_{F2}$	21.6		16.7		19.7
<b>S</b>	<b>18.4</b>		<b>18.5</b>		<b>32.4</b>

Ofanto/MBB		Ofanto/Waha		Ofanto/Mrb <sub>5</sub>	
N°	PE	N°	PE	N°	PE
41	16.3	109	15.9	6	16.3
55	16.4	4	16.6	48	17.0
71	16.4	98	16.6	97	20.7
91	16.8	31	17.0	66	21.9
48	17.0	106	17.6	33	21.9
4	17.2	77	18.9	10	22.6
14	17.8	53	21.0	90	23.6
63	19.4	120	21.6	69	24.8
5	21.2	110	22.0	36	29.0
33	22.3	29	25.0	27	31.0
80	23.6	119	25.3	60	44.2
29	24.6	112	30.9	117	44.2
$\mu_S$	19.1		20.7		40.7
$\mu_{F2}$	10.4		9.2		9.3
<b>S</b>	<b>8.7</b>		<b>11.5</b>		<b>31.3</b>

### 3.2.2.1.1. Réponses directes et corrélatives en F<sub>3</sub> à la sélection de la biomasse aérienne.

Mesurée en F<sub>3</sub>, la réponse à la sélection sur la base de la biomasse aérienne ou bien celle sur la base du poids des épis est positive et significative, chez les trois croisements. La réponse directe observée pour la biomasse est de 341.8, 268.4 et 516.0 g m<sup>-2</sup> respectivement chez Ofanto/MBB, Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub> dont la moyenne de la génération F<sub>3</sub> est de 1956.2, 1881.6 et 2119.5 g m<sup>-2</sup> (Tableau 11).

Ces résultats indiquent que la meilleure réponse et la meilleure moyenne sont observées chez le croisement Ofanto/Mrb<sub>5</sub>. En fonction de la moyenne de la population F<sub>3</sub>, la réponse directe à la sélection représente 17.5, 14.3 et 24.3% chez les trois populations. La population Ofanto/Mrb<sub>5</sub> semble la plus intéressante pour des suivis futurs.

La réponse directe à la sélection de la biomasse aérienne est suivie, de réponses corrélatives positives et significatives, pour le poids et le nombre des épis m<sup>2</sup>, le rendement grain, la hauteur du chaume et le nombre de grains m<sup>2</sup>. L'amélioration obtenue indirectement sur le poids des épis, en réponse à la sélection de la biomasse aérienne, est de 109.2, 73.7 et 169.5 g m<sup>-2</sup> chez les trois populations.

Comparé à la plus petite différence significative au seuil de 5% qui égale à 51.4 g m<sup>-2</sup>, ces gains sont en partie d'origine génétique. Ils représentent 11.5, 6.8 et 15.1% de la moyenne de la génération F<sub>3</sub> des trois populations citées dans l'ordre ci-dessus (Tableau 11). Pour le rendement grain, qui est le caractère d'intérêt le plus important dans le processus de sélection, le gain est de 96.0 (16%), 57.4 (8.5%) et 125.5 g m<sup>-2</sup> (17.3%) chez Ofanto/MBB, Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (Tableau 11).

Tableau 11. Moyennes de la génération F<sub>3</sub> et des lignées parents pour les variables mesurées, réponses directes et corrélatives (r<sub>obs</sub>) à la sélection de la biomasse aérienne et du poids des épis des trois croisements.

Paramètre	BIO	PE	RDT	HT	NE	PREC	PMG	NGE	NGM <sup>2</sup>
Ofanto/MBB									
μ <sub>F3</sub>	1956.2	950.8	600.4	99.7	454.0	131.0	40.8	33.2	15.0
X <sub>Ofanto</sub>	1759.1	986.3	652.3	76.8	469.8	129.0	37.9	37.0	17.3
X <sub>MBB</sub>	2637.5	840.9	611.6	118.0	587.1	132.8	39.2	26.7	15.7
μ' (BIO)	2298.0	1060.0	696.4	108.5	526.3	131.2	40.9	32.6	17.1
r <sub>obs</sub>	341.8	109.2	96.0	8.8	72.3	0.2	0.1	-0.6	2.1
r(%)	17.5	11.5	16.0	8.9	15.9	0.2	0.2	-1.9	13.9
μ' (PE)	2399.2	1148.2	758.3	104.5	542.7	130.9	40.9	34.7	18.6
r <sub>obs</sub>	443.0	197.4	158.0	4.8	88.7	-0.1	0.1	1.5	3.7
r(%)	22.6	20.8	26.3	4.9	19.5	-0.1	0.2	4.5	24.4
Ofanto/Waha									
μ <sub>F3</sub>	1881.6	1086.3	672.9	77.6	501.4	130.4	36.2	38.5	18.8
X <sub>Waha</sub>	2222.0	913.8	681.5	80.6	710.1	128.9	31.6	30.6	21.7
μ' (BIO)	2150.0	1160.0	730.3	80.5	520.0	130.5	37.5	37.8	19.5
r <sub>obs</sub>	268.4	73.7	57.4	2.9	18.6	0.1	1.3	-0.7	0.7
r(%)	14.3	6.8	8.5	3.7	3.7	0.1	3.7	-1.8	3.5
μ' (PE)	2161.8	1162.7	737.7	80.6	517.7	130.5	37.3	38.5	19.8
r <sub>obs</sub>	280.2	76.5	64.8	3.0	16.4	0.1	1.2	0.0	1.0
r(%)	14.9	7.0	9.6	3.8	3.3	0.1	3.2	0.1	5.1
Ofanto/Mrb <sub>5</sub>									
μ <sub>F3</sub>	2119.5	1119.6	726.5	93.4	535.0	129.5	39.4	35.5	18.5
X <sub>Mrb<sub>5</sub></sub>	1941.1	846.0	598.0	95.9	724.1	128.1	36.5	22.7	16.4
μ' (BIO)	2635.5	1289.1	852.0	111.0	577.7	129.4	44.8	33.2	19.2
r <sub>obs</sub>	516.0	169.5	125.5	17.6	42.7	-0.1	5.4	-2.3	0.6
r(%)	24.3	15.1	17.3	18.9	8.0	-0.1	13.8	-6.3	3.4
μ' (PE)	2539.1	1261.8	832.0	106.7	550.5	129.4	44.5	35.4	18.8
r <sub>obs</sub>	419.6	142.2	105.5	13.3	15.5	-0.1	5.2	0.0	0.3
r(%)	19.8	12.7	14.5	14.2	2.9	-0.1	13.2	-0.1	1.4
Ppds <sub>5%</sub>	116.7	51.4	35.5	2.6	32.8	1.3	1.0	2.3	1.1

Le nombre d'épis augmente significativement uniquement chez Ofanto/MBB (72.3 épis m<sup>-2</sup>, soit 15.9%) et chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (42.7 épis m<sup>-2</sup> soit 8.0%). La population Ofanto/Waha ne montre pas d'augmentation significative pour le nombre d'épis m<sup>-2</sup> (Tableau 11).

La hauteur change significativement de 2.9 cm chez Ofanto/Waha à 17.6 cm chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub>.

La durée de la phase végétative et le nombre de grains par épi se montrent indépendants de la sélection sur la base de la biomasse aérienne. En effet aucun changement n'est observé pour ces deux variables dont les moyennes restent de même ordre de grandeur que les moyennes de la population F<sub>3</sub>.

Le changement du poids de 1000 grains est nul chez Ofanto/MBB et Ofanto/Waha. Il est significatif chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub>. Chez ce dernier croisement, le gain du poids de 1000 grains est de 5.4 g pour 1000 grains, soit 13.8% de la moyenne de la génération F<sub>3</sub> (Tableau 11).

Le nombre de grains m<sup>-2</sup> augmente significativement chez Ofanto/MBB, où on note un gain de 2100 graines, contre une plus petite différence significative de 1100 graines. La réponse corrélative, pour cette composante du rendement, notée chez les deux autres croisements, est non significative.

#### **3.2.2.1.2. Réponse à la sélection du poids des épis**

La sélection, en F<sub>2</sub>, sur la base du poids des épis par plante, engendre une réponse directe positive en F<sub>3</sub>. En effet cette réponse, ou gain génétique, prend les valeurs de 197.4, 76.5 et 142.2 g m<sup>-2</sup>, pour des moyennes de la fraction sélectionnée de 1148.2, 1162.7 et 1261.8 g m<sup>-2</sup>, respectivement chez Ofanto/MBB, Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (Tableau 11).

Ces moyennes ( $\mu'$ ) sont significativement supérieures à celles des parents, dont les moyennes sont 950.8, 986.3, 913.8, et 846.0 g m<sup>-2</sup>, respectivement pour Ofanto, MBB, Waha et Mrb<sub>5</sub>. Ces résultats suggèrent une forte proportion de transgresseurs. Relativement à la moyenne de la population F<sub>3</sub>, le gain génétique

obtenu pour le poids des épis varie de 7.0% chez Ofanto/Waha à 20.8% chez Ofanto/MBB. Le gain observé chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub> est de 12.7%.

La réponse corrélative est positive et significative pour la biomasse aérienne, le rendement grain et la hauteur du chaume. La réponse corrélative de la biomasse est de 22.3, 14.9 et 19.8% ; celle du rendement est de 26.3, 9.3 et 14.5 ; alors que celle de la hauteur est de 4.9, 3.8 et 14.2, respectivement chez les croisements Ofanto/MBB, Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (Tableau 11). Ces résultats indiquent que la meilleure réponse corrélative pour le rendement est notée chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub> qui montre aussi la meilleure réponse corrélative du rendement lorsque la sélection est faite sur la base de la biomasse aérienne (Figure 12).

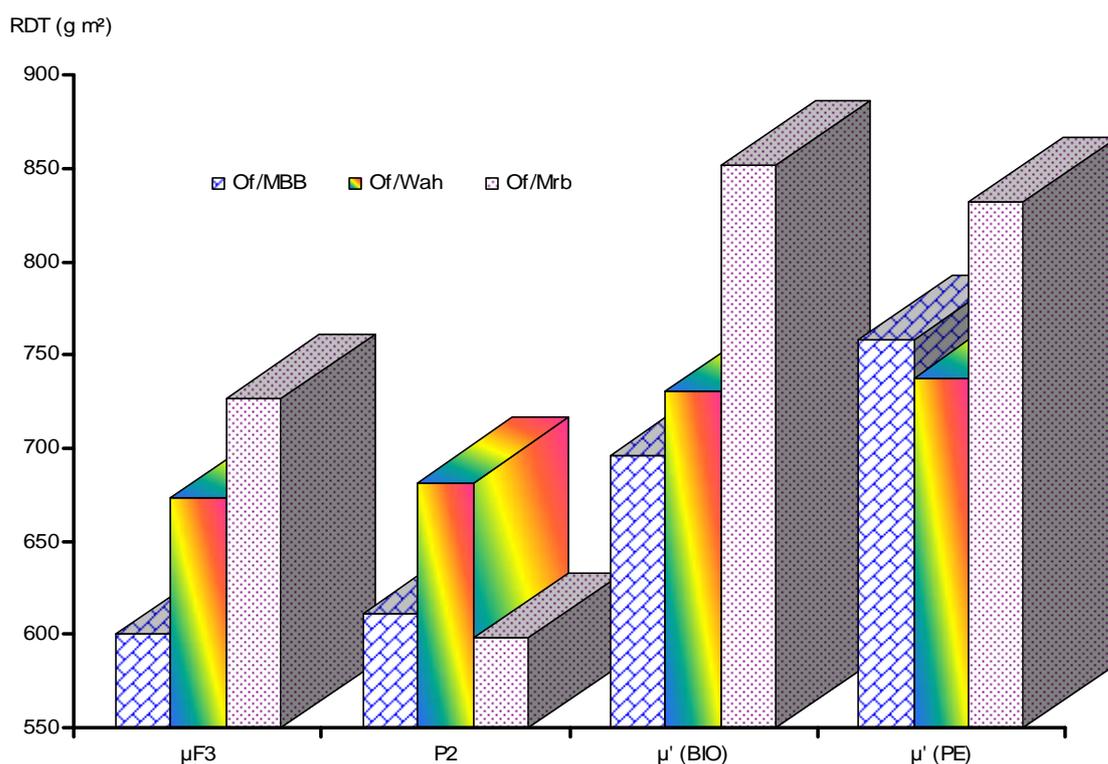


Figure 12. Moyennes des rendements de la génération F<sub>3</sub>, du parent variable et de la fraction (10%) sélectionnée sur la base de la biomasse aérienne ( $\mu'_{BIO}$ ) et sur la base du poids des épis ( $\mu'_{PE}$ ) pour les trois croisements.

La réponse corrélative du nombre d'épis n'est significative que chez Ofanto/MBB. La réponse corrélative du poids de 1000 grains est significative chez Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub>, alors que le nombre de grains par épi ne répond pas significativement à la sélection sur la base du poids des épis, chez les trois populations. Le nombre de grains m<sup>2</sup> change positivement et significativement chez Ofanto/MBB (Tableau 11).

### **3.2.2.2. Sélection sur indice**

#### **3.2.2.2.1. Sélection différentielle**

Les indices utilisés identifient, à une lignée près, les mêmes plants F<sub>2</sub> pour un croisement donné (Tableau 12), suggérant la similitude des résultats des indices. Seuls les résultats d'un seul indice le EWFI seront discutés. La différentielle de sélection de la biomasse aérienne varie de 17.8 à 31.7g plant<sup>-1</sup>, chez les trois croisements dans cet ordre : Ofanto/MBB, Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (Tableau 13). Cette différentielle de sélection varie 82.5 à 161.1 % de la moyenne de la génération F<sub>2</sub>, ce qui représente des gains appréciables pour le caractère biomasse aérienne.

Pour la hauteur, la différentielle de sélection varie de 5.4 à 12.3 cm, soit des valeurs relatives variant de 8.9 à 24.8 %. La différentielle de sélection des épis et du poids des épis par plant montre aussi des gains important en valeur relative pour ces deux caractères, supérieurs à 50% (Tableau13). Globalement les meilleures valeurs de la différentielle de sélection, en valeur relative, sont observées chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub> et pour les quatre caractères.

Les meilleurs moyennes de la fraction sélectionnée sont observées chez Ofanto/MBB pour la hauteur du chaume qui prend une valeur de 91.8 cm ; chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub> pour la biomasse aérienne (51.3 g) et le nombre d'épis par plante (7.4 épis) et chez Ofanto/Waha pour le poids des épis par plante (20.6) (Tableau 13).

Tableau 12. Numéros des plantes F<sub>2</sub> sélectionnées par indice pour les 3 croisements

EWFI	OF/MBB			
	BSI	SWI	RSI	
	5	5	5	4
	14	14	14	5
	29	29	29	14
	31	31	32	29
	32	32	33	31
	33	33	38	32
	38	38	48	38
	48	48	63	48
	63	63	64	63
	71	71	71	64
	80	80	80	80
	91	91	91	91
	OF/Waha			
	11	11	4	4
	25	25	25	25
	29	29	29	29
	31	31	31	31
	53	53	53	53
	77	77	77	77
	98	98	98	98
	106	106	106	106
	110	110	110	110
	112	112	112	112
	119	119	119	119
	120	120	120	120
	OF/Mrb <sub>5</sub>			
	10	10	10	10
	27	27	27	27
	33	33	33	33
	36	36	36	36
	39	39	39	39
	40	40	48	40
	60	60	60	60
	66	66	66	66
	69	69	69	69
	90	90	90	90
	97	97	97	97
	117	117	117	117

Tableau 13. Moyennes de la génération F<sub>2</sub>, de la fraction sélectionnée et différentielle de sélection en valeur réelle et relative des caractères inclus dans l'indice de sélection (EWFI) des 3 croisements.

	BIO	HT	NE	PE	
OF/MBB					
$\mu_{F2}$		21.6	79.6	3.5	10.4
$\mu_s$		39.5	91.8	5.7	18.8
S		17.8	12.3	2.2	8.4
S(%)		82.5	15.4	64.3	80.5
OF/Waha					
$\mu_{F2}$		16.7	60.4	3.0	9.2
$\mu_s$		34.9	65.8	5.6	20.6
S		18.3	5.4	2.6	11.3
S(%)		109.4	8.9	85.1	122.9
OF/Mrb <sub>5</sub>					
$\mu_{F2}$		19.7	65.8	3.3	9.3
$\mu_s$		51.3	82.2	7.4	26.3
S		31.7	16.3	4.2	17.0
S(%)		161.1	24.8	127.6	181.9

BIO= biomasse aérienne, HT = hauteur du chaume, NE = nombre d'épis par plant ; PE = poids des épis par plant.

### 3.2.2.2.2. Réponses à la sélection sur indice

La sélection, pratiquée sur la base des indices, présente des réponses variables selon la population considérée. Cette variation est notée aussi bien pour les caractères inclus dans l'indice aussi bien que pour les caractères non pris en compte par l'indice de sélection (Tableau 14).

Ainsi on note des réponses positives et significatives pour la biomasse aérienne et la hauteur du chaume chez les trois populations. Ces réponses ou gains génétiques varient de 12.3 à 23.1% de la moyenne de la population F<sub>3</sub> chez les trois croisements et de 3.7 à 34.7% pour la hauteur du chaume. En valeur absolue, les meilleurs gains pour la biomasse sont réalisés suite à la sélection dans la population OF/Mrb<sub>5</sub> et pour la hauteur, dans la population Of/MBB, avec respectivement 488.7 g m<sup>2</sup> pour la biomasse et 27.0 cm pour la hauteur.

Pour le nombre d'épis et le poids des épis dont l'information est prise en compte par

l'indice de sélection, les réponses enregistrées en F<sub>3</sub> sont significatives chez les trois populations pour le poids des épis et chez Of/Mrb<sub>5</sub> pour le nombre d'épis (Tableau 14). La réponse du poids des épis est négative chez Of/MBB et positive chez les autres croisements. Elle est positive chez Of/Mrb<sub>5</sub> et non significative chez les autres populations, pour le nombre d'épis (Tableau 14). Les meilleurs gains sont notés chez Of/Mrb<sub>5</sub>, pour les deux variables, le poids et le nombre d'épis m<sup>2</sup>, avec respectivement 198.6 g m<sup>2</sup> et 62.7 épis m<sup>2</sup>.

Tableau 14. Moyennes de la génération F<sub>3</sub>, de la fraction sélectionnée et réponse à la sélection sur indice (EWF<sub>I</sub>) en valeur réelle et relative observées chez les 3 croisements.

OF/MBB	BIOM	PE	RDT	HT	NE	PREC	PMG	NGE	NGM <sup>2*</sup>	
μ'	2113.6	1003.6	660.8	104.6	495.6	130.7	41.1	32.4	16.1	
μ <sub>F3</sub>	1881.6	1086.3	672.9	77.6	501.4	130.4	36.2	38.5	18.8	
R	232.0	-82.7	-12.1	27.0	-5.8	0.3	4.9	-6.1	-2.7	
r(%)	12.3	-7.6	-1.8	34.7	-1.2	0.2	13.5	-15.9	-14.5	
OF/Waha										
μ'	2150.0	1160.0	730.3	80.5	520.0	130.5	37.5	37.8	19.5	
μ <sub>F3</sub>	1881.6	1086.3	672.9	77.6	501.4	130.4	36.2	38.5	18.8	
R	268.4	73.7	57.4	2.9	18.6	0.1	1.3	-0.7	0.7	
r(%)	14.3	6.8	8.5	3.7	3.7	0.1	3.7	-1.8	3.5	
OF/Mrb <sub>5</sub>										
μ'	2608.2	1318.2	865.5	109.7	597.7	129.3	44.3	33.2	19.7	
μ <sub>F3</sub>	2119.5	1119.6	726.5	93.4	535.0	129.5	39.4	35.5	18.5	
Ppds5%	116.7	51.4	35.5	2.6	32.8	0.4	0.9	2.3	1.1	
R	488.7	198.6	139.0	16.3	62.7	-0.2	5.0	-2.2	1.2	
r(%)	23.1	17.7	19.1	17.4	11.7	-0.2	12.6	-6.3	6.2	

\* x10<sup>3</sup>

Du point de vue réponses corrélatives, la précocité moyenne, dont la valeur moyenne varie de 129 à 130 jours, ne change pas significativement, suite à la sélection pratiquée chez les trois croisements. Le poids de 1000 grains augmente significativement chez les trois populations, de 1.3 à 5.0 g, respectivement chez Of/Waha et Of/Mrb<sub>5</sub>.

Le nombre de grains par épi diminue significativement chez Of/MBB, alors que le nombre de grains m<sup>2</sup> diminue chez Of/MBB et augmente chez Of/Mrb<sub>5</sub> (Tableau 14). La diminution du nombre de grains par épi est de 6.1 grains par épi et celle de nombre de grains m<sup>2</sup> est de 2700 grains m<sup>2</sup> chez Of/MBB. Le nombre de

grains m<sup>-2</sup> augmente de 1200 grains chez Of/Mrb<sub>5</sub> (Tableau 5).

En ce qui concerne le rendement grain, qui est le caractère le plus important, on note que la sélection pratiquée enregistre des réponses positives et significatives chez deux populations et une réponse non significative chez la troisième population (Tableau 14). Le gain de rendement grain est de 57.4 et 139.0 g m<sup>-2</sup> chez OF/Waha et OF/ Mrb<sub>5</sub>.

Le meilleur gain noté chez Of/Mrb<sub>5</sub> est associé avec la meilleure moyenne de la fraction sélectionnée. Ceci indique que le croisement Of/Mrb<sub>5</sub> contribue à l'amélioration du rendement par l'effet de la sélection sur indice, effet représenté par  $r$  et par l'effet du fond génétique propre à ce croisement, effet représenté par la moyenne de la génération F<sub>3</sub> ( $\mu_{F3}$ ).

Ces résultats indiquent donc que la sélection sur indice intégrant les caractères liés au rendement grain présente des réponses variables en valeurs et signes selon le croisement, aussi bien pour les caractères inclus dans l'indice et que pour les caractères non pris en compte par l'indice de sélection. Cette variation semble avoir pour origine le rôle joué par la hauteur du chaume chez les trois croisements.

Dans l'indice de sélection, la hauteur est prise comme étant un caractère qui affecte positivement, au même titre que la biomasse, le poids et le nombre d'épis, le rendement grain. Si les liaisons de la biomasse aérienne, du nombre et du poids des épis se confirment en F<sub>3</sub>, chez les trois croisements, la liaison de la hauteur avec le rendement et les autres variables varie d'un croisement à l'autre.

En effet chez Ofanto/MBB, la hauteur ne présente de liaisons significatives qu'avec le poids de 1000 grains ( $r= 0.446^{**}$ ) et avec le nombre de grains par épi ( $r = -0.214^*$ ) (Tableau 15). Les plantes hautes ont tendance avec avoir un poids de 1000 grains élevé, mais de faible rendement, vu la position des caractères sur le plan formé

par les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des données de ce croisement (Figure 13).

Le poids de 1000 grains élevé, associé à la hauteur, se fait par compensation au détriment du nombre de grains par épi, suite à la corrélation entre ces deux variables ( $r = -0.436^{**}$ ). Le nombre de grains par épi reste lié au rendement grain ( $r = 0.252^{**}$ ), au nombre de grains par m<sup>2</sup> ( $r = 0.424^{**}$ ) et sans effet négatif significatif sur le nombre d'épis m<sup>-2</sup> ( $r = -0.09^{ns}$ ). Dans ce croisement la hauteur a donc un effet plutôt négatif que positif.

Tableau 15. Coefficients de corrélations phénotypiques entre les variables mesurées par en F3 des trois croisements

	BIO	PE	RDT	HT	NE	PREC	PMG	NGE
BIO	1							
PE	<b>0.916</b>	1			OF/MBB		$r_{5\%} = 0,187$	
RDT	<b>0.863</b>	<b>0.909</b>	1				$r_{1\%} = 0,244$	
HT	0.126	0.018	0.042	1			n=120	
NE	<b>0.814</b>	<b>0.862</b>	<b>0.828</b>	-0.04	1			
PREC	-0.072	-0.123	-0.133	<b>-0.306</b>	-0.055	1		
PMG	0.065	-0.079	-0.046	<b>0.446</b>	<b>-0.277</b>	-0.185	1	
NGE	-0.029	0.083	<b>0.252</b>	<b>-0.214</b>	-0.090	0.036	<b>-0.436</b>	1
NGM <sup>2</sup>	<b>0.719</b>	<b>0.829</b>	<b>0.893</b>	-0.164	<b>0.849</b>	-0.026	<b>-0.455</b>	<b>0.424</b>
BIOM	1							
PE	<b>0.952</b>	1			OF/Waha			
RDT	<b>0.805</b>	<b>0.869</b>	1					
HT	<b>0.519</b>	<b>0.558</b>	<b>0.500</b>	1				
NE	<b>0.881</b>	<b>0.881</b>	<b>0.719</b>	<b>0.450</b>	1			
PREC	-0.038	-0.044	-0.115	-0.076	-0.036	1		
PMG	<b>-0.259</b>	<b>-0.204</b>	-0.025	-0.084	<b>-0.393</b>	-0.176	1	
NGE	-0.134	-0.08	<b>0.286</b>	0.008	<b>-0.358</b>	-0.004	0.133	1
NGM	<b>0.841</b>	<b>0.873</b>	<b>0.927</b>	<b>0.478</b>	<b>0.819</b>	-0.056	<b>-0.377</b>	<b>0.204</b>
BIOM	1.							
PE	<b>0.912</b>	1.			Of/Mrb5			
RDT	<b>0.860</b>	<b>0.910</b>	1.					
HT	<b>0.520</b>	<b>0.312</b>	<b>0.398</b>	1.				
NE	<b>0.806</b>	<b>0.825</b>	<b>0.722</b>	<b>0.200</b>	1			
PREC	0.123	0.119	0.060	0.002	0.168	1		
PMG	<b>0.256</b>	0.129	<b>0.220</b>	<b>0.561</b>	-0.072	-0.075	1	
NGE	-0.178	-0.059	0.140	-0.106	<b>-0.438</b>	-0.129	-0.161	1
NGM <sup>2</sup>	<b>0.768</b>	<b>0.869</b>	<b>0.911</b>	0.161	<b>0.772</b>	0.092	<b>-0.187</b>	<b>0.191</b>

Chez Ofanto/Waha, la hauteur au même titre que la biomasse aérienne, le nombre et le poids des épis présentent des corrélations positives et significatives avec

le rendement grain et entre eux (Tableau 14). De plus la hauteur reste indépendante du poids de 1000 grains ( $r = -0.084^{ns}$ ) et du nombre de grains par épi ( $r = 0.008^{ns}$ ).

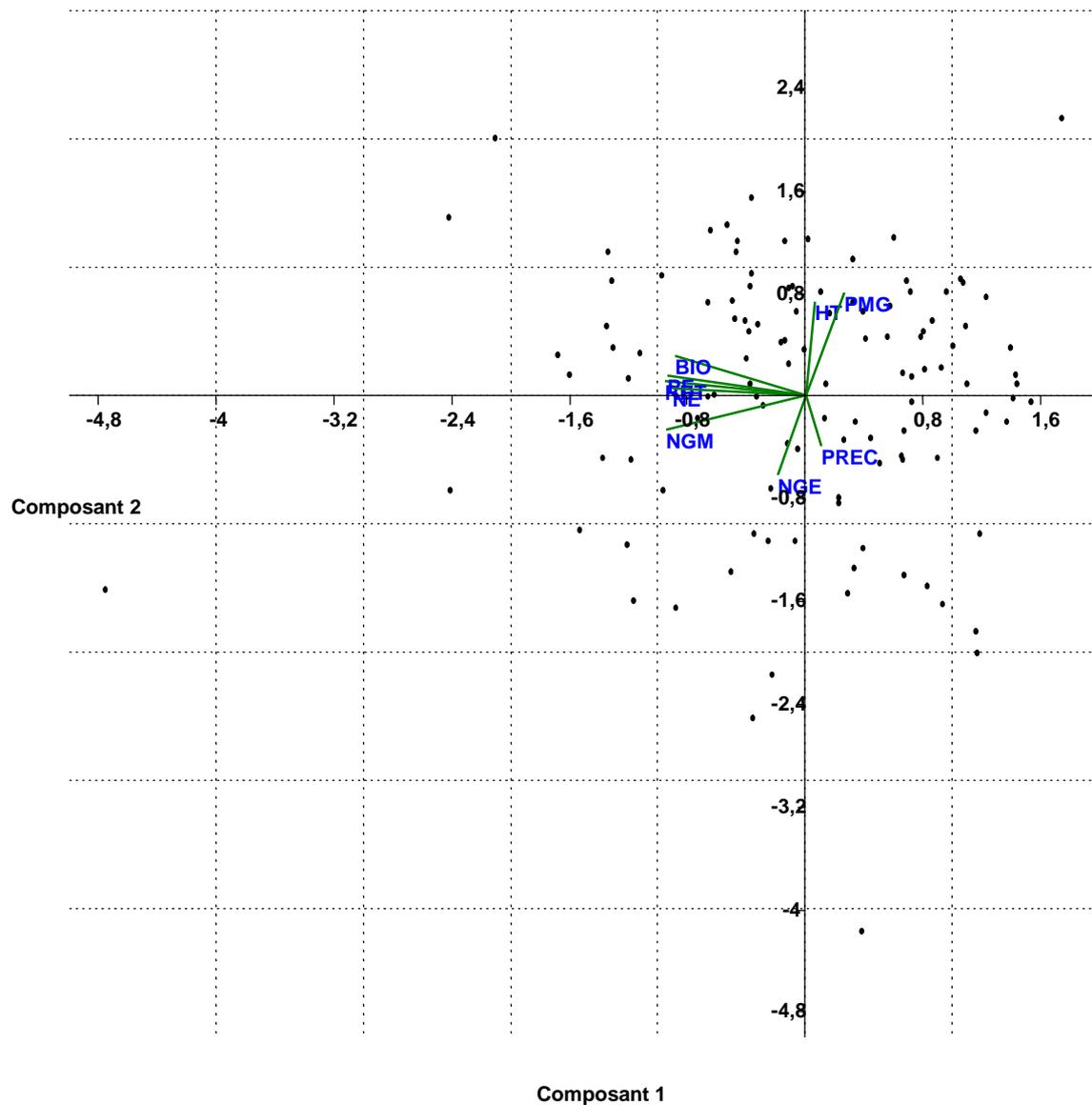


Figure 13. Biplot des composantes 1 et 2 des variables et des individus de la génération F<sub>3</sub> du croisement Ofanto/MBB (Composante 1 explique 43.7%, et la composante 2 explique 27.6%).

Cependant l'augmentation du nombre des épis, suite à la sélection sur indice, induit une compensation sur le nombre de grains par épi qui est réduit ( $r = -0.358^{**}$ ), et qui réduit de la contribution au nombre de grain produit par m<sup>2</sup> ( $r = 0.204^*$ ),

comparativement à celle des épis ( $r=0.772^{**}$ ) (Tableau 14, Figure 14). Ce résultats suggère que l'augmentation d'une seule composante n'est probablement pas intéressante suite aux effets de compensation, mais qu'il faut cherche un équilibre entre les trois composantes.

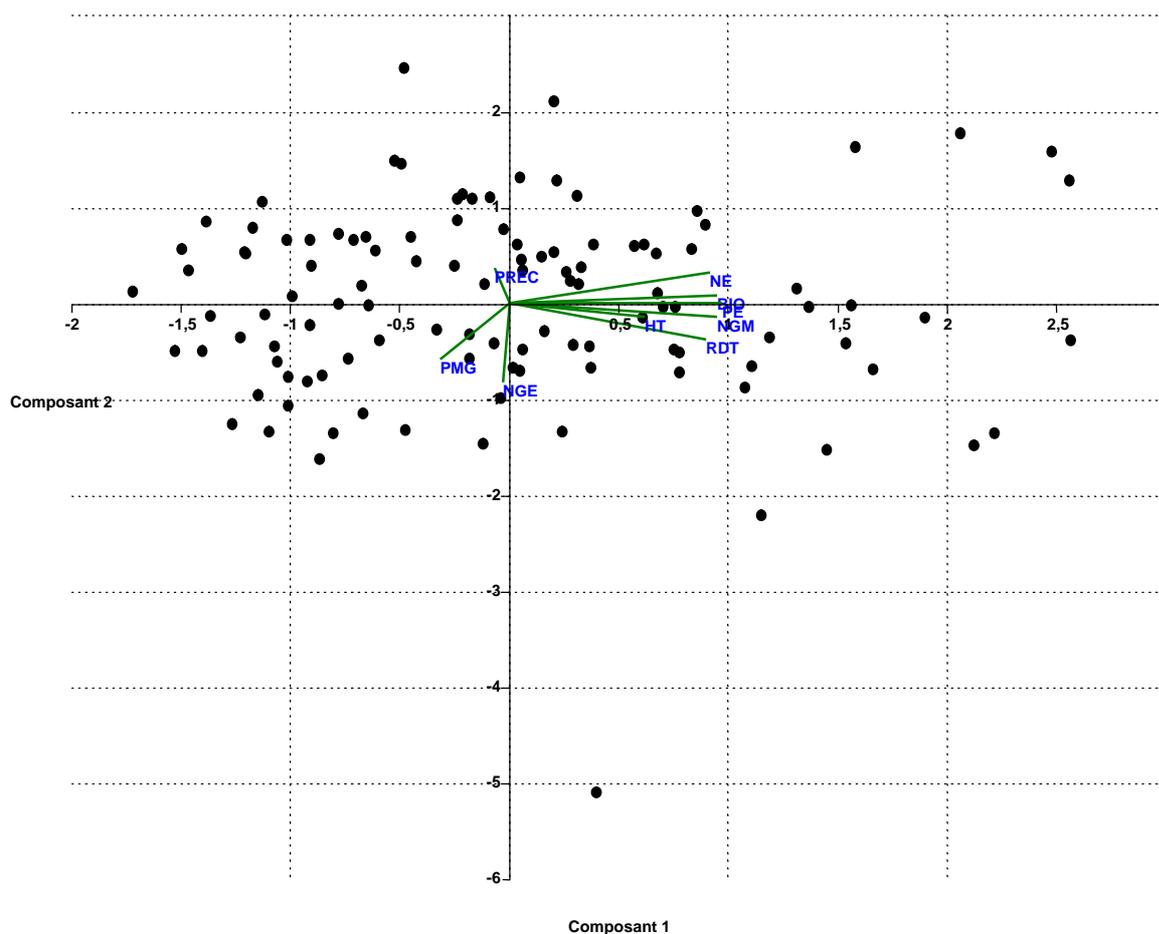


Figure 14. Biplot des composantes 1 et 2 des variables et des individus de la génération F<sub>3</sub> du croisement Ofanto/Waha (Composante 1 explique 50.7%, et la composante 2 explique 21.3%).

Chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub>, la hauteur est liée à la biomasse, au nombre et au poids des épis, au rendement et au poids de 1000 grains. Le poids de 1000 grains est lié positivement au rendement et reste indépendante du nombre de grains par épi et par m<sup>2</sup> (Tableau 14). Dans ce croisement, la hauteur contribue au rendement au poids de 1000 grains, au même titre que la biomasse, le nombre et le poids des épis (Figure 15).

Ceci explique la forte réponse observée suite à la sélection sur indice (Tableau 14).

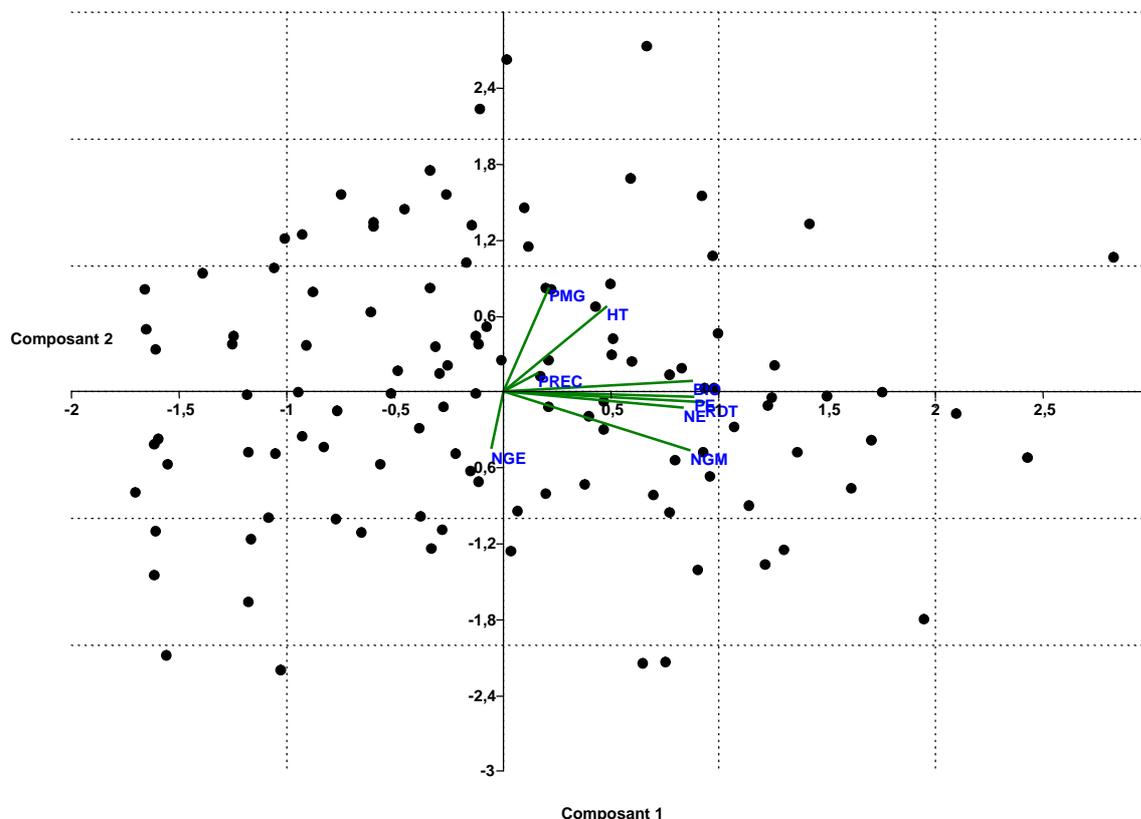


Figure 15. Biplot des composantes 1 et 2 des variables et des individus de la génération F<sub>3</sub> du croisement Ofanto/Waha (Composante 1 explique 54.2%, et la composante 2 explique 23.8%).

Malgré une réponse corrélative du rendement grain à la sélection sur indice positive et significative chez Ofanto/Waha et Ofanto/Mrbs<sub>5</sub> (Tableau 14), la fraction sélectionnée ne représente pas l'ensemble des meilleures lignées pour le rendement grain observé en F<sub>3</sub>. En effet, les meilleures lignées (10%) du point de vue rendement grain mesuré en F<sub>3</sub>, présentent des moyennes de rendement de 939.4, 1097.0 et 1070.0 g m<sup>-2</sup> respectivement pour les trois croisements Ofanto/MBB, Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub> (Figure 16).

Ces résultats indiquent que la sélection sur indice intégrant les variables liées au rendement grain est loin d'être efficace. Elle est surtout moins efficace chez le croisement Ofanto/Waha, où le rendement des sélections ne représente que 67% de

celui des meilleures 10% F<sub>3</sub>. Ce chiffre est de 71% pour Ofanto/MBB et de 81% pour Ofanto/Mrb<sub>5</sub>. Parmi les lignées présentant le meilleur rendement en F<sub>3</sub>, 4 lignées ont été retenues par la sélection sur indice chez Ofanto/MBB : les numéros 5, 14, 29 et 91. Trois lignées ont été retenues chez Ofanto/Waha, les numéros 29, 53 et 112 et seulement deux lignées chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub> : les numéros 10 et 69 (Tableau 12).

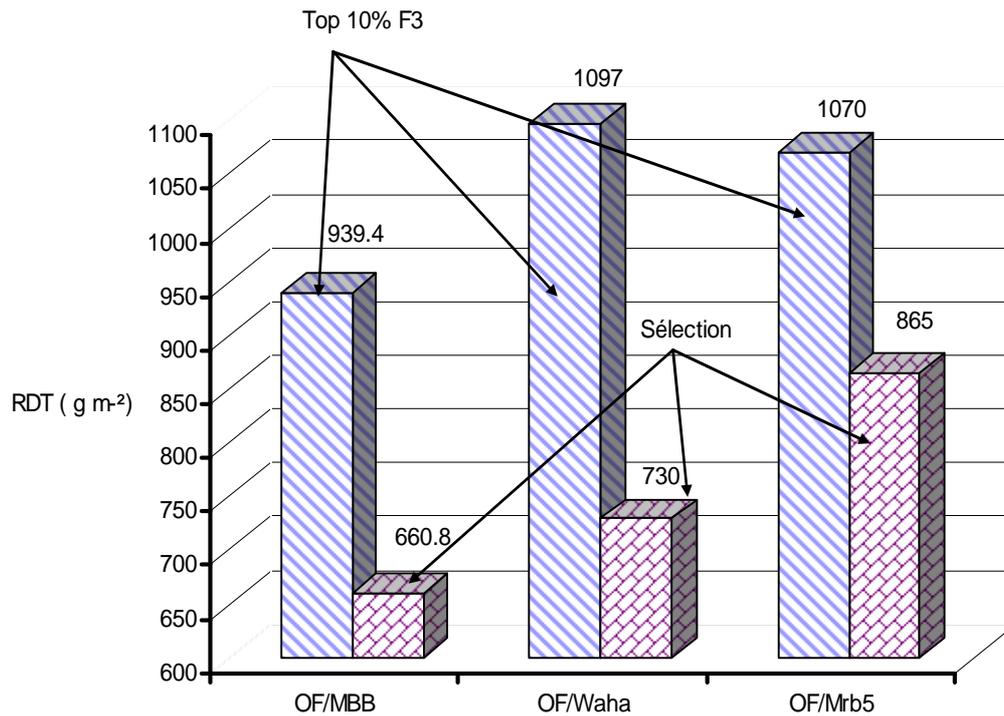


Figure 16. Moyennes des rendements grain des sélections sur indice et des 10% des lignées ayant les meilleurs rendements grain observés en F<sub>3</sub> des trois croisements.

## Synthèse

La culture des céréales est la spéculation prédominante de l'agriculture algérienne. La production nationale est faible, ne permettant pas de satisfaire les besoins d'une population croissante. La faiblesse des performances de la céréaliculture algérienne a plusieurs origines dont le manque d'eau est le principal facteur limitant. La sélection est faite à partir des introductions de matériels exotiques et le progrès génétique réalisé n'est pas toujours valorisé à cause des faibles taux d'adoption des nouvelles variétés qui se montrent souvent très sensibles à la variation climatiques.

En effet les nouvelles variétés sont sélectionnées sur la base de leur potentiel de rendement sans tenir compte des caractères adaptatifs qui sont des régulateurs de la production en milieux variables. L'utilisation des caractères morphologiques comme la biomasse aérienne, la hauteur du chaume, le nombre et le poids des épis apparaît attractive suite aux rôles que jouent ces caractères dans l'adaptation au milieu de production.

Dakheel *et al.* (1993) notent que la hauteur du chaume présente une corrélation modérée avec le rendement grain sous stress. Cette liaison s'affaiblit à mesure que le stress s'amointrit, pour changer de signe lorsque la plante est conduite en l'absence de la contrainte. Une paille relativement haute devient une caractéristique désirable sous stress. Elis et Brown (1986) trouvent que les variétés à paille longue deviennent plus productives dans les zones affectées par la sécheresse, comparativement aux variétés naines.

En conditions de stress, une paille haute est plus apte à stocker plus de réserves glucidiques, qui sont susceptibles d'être transférées vers le grain, au cours de la phase de remplissage. Selon Clarke *et al.* (1991), une biomasse élevée est une caractéristique désirable en milieux semi-arides. Siddique *et al.* (1989) soulignent

qu'une biomasse élevée est la principale cause des rendements élevés enregistrés chez les variétés récentes. Monneveux *et al.*, (2006) mentionnent que la réalisation des biomasses aériennes élevées induit des rendements élevés.

Richards (1996) mentionne cependant que le frein à la réalisation d'un gain de rendement significatif, dans les environnements à humidité limitée, résulte de la variation de la multitude des caractères qui semblent conditionner le rendement sous de telles conditions de production. L'identification des caractères, les plus efficaces, est très difficile et demande du temps.

L'analyse de la F<sub>1</sub> montre que les parents présentent une hauteur de chaume significativement plus élevée que celle des hybrides, avec peu de différences pour la biomasse et le poids des épis. La liaison significative existant entre la biomasse aérienne et le poids des épis suggère que le poids des épis est une composante déterminante de la biomasse aussi bien chez les parents que chez les hybrides.

Alors que la liaison entre le poids des épis et la hauteur du chaume suggère que pour avoir un poids des épis élevé, il faut consentir une importante réduction de la hauteur du chaume. L'effet génique est variable selon le croisement et le caractère, variant de l'additivité à la dominance complète. Les résultats indiquent que le poids des épis et la biomasse aérienne sont indicateurs du rendement de l'hybride et pour lesquels le meilleur hybride est Ofanto/Mrb<sub>5</sub>.

La génération F<sub>2</sub> montre une importante variabilité, intra et inter croisements, des caractères mesurés, suggérant que la sélection serait efficace. Pour l'amélioration de la hauteur c'est Ofanto/MBB et pour le poids des épis, c'est Ofanto/Mrb<sub>5</sub> qui présente les meilleures valeurs moyennes. Les coefficients de l'héritabilité au sens large sont moyens à élevés. La biomasse est liée au nombre et au poids des épis des trois croisements, alors que la hauteur montre peu liaisons avec ces caractères.

Mesurée en F<sub>3</sub>, la réponse à la sélection sur la base de la biomasse aérienne et celle sur la base du poids des épis est positive et significative, chez les trois croisements. La meilleure réponse et la meilleure moyenne sont observées chez le croisement Ofanto/Mrb<sub>5</sub>. Cette réponse directe est suivie de réponses corrélatives positives et significatives pour le poids et le nombre des épis m<sup>2</sup>, le rendement grain, la hauteur du chaume et le nombre de grains m<sup>2</sup>. Le gain de rendement grain est de 16, 8.5 et 17.3%, chez Ofanto/MBB, Ofanto/Waha et Ofanto/Mrb<sub>5</sub>.

L'utilisation de l'indice en sélection présente des réponses variables selon la population considérée. Cette variation est notée aussi bien pour les caractères inclus dans l'indice que pour les caractères non pris en compte par l'indice de sélection. Les gains de biomasse varient de 12.3 à 23.1% et ceux de la hauteur de 3.7 à 34.7%. Les meilleurs gains du poids et du nombre d'épis m<sup>2</sup> sont notés chez Of/Mrb<sub>5</sub>, avec respectivement 198.6 g m<sup>2</sup> et 62.7 épis m<sup>2</sup>. Le rendement grain augmente significativement chez deux populations et ne répond pas chez la troisième. Le gain de rendement grain varie de 57.4 à 139.0 g m<sup>2</sup> chez Of/Waha et Of/ Mrb<sub>5</sub>.

La variation de la réponse à la sélection sur indice a pour origine le rôle, variable, joué par la hauteur du chaume chez les trois croisements. Chez Ofanto/MBB la hauteur a un effet plutôt négatif que positif, alors que chez Ofanto/Waha, la hauteur au même titre que la biomasse aérienne, le nombre et le poids des épis favorisent le rendement grain tout en restant indépendante du poids de 1000 grains et du nombre de grains par épi. Par contre chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub>, la hauteur contribue au rendement, au poids de 1000 grains, au même titre que la biomasse, le nombre et le poids des épis, ce qui explique la forte réponse observée suite à la sélection sur indice, chez cette population.

Comparativement aux meilleures lignées F<sub>3</sub> pour le rendement grain, la sélection sur indice est loin d'être efficace. La moyenne de rendement des lignées sélectionnées sur la base de l'indice ne représente que 67%, 71% et 81% du

rendement des meilleures lignées F<sub>3</sub> pour Ofanto/Waha, Ofanto/MBB et Ofanto/Mrb<sub>5</sub>. Parmi les lignées présentant le meilleur rendement en F<sub>3</sub>, 4 lignées ont été retenues par la sélection sur indice chez Ofanto/MBB, trois lignées chez Ofanto/Waha et deux lignées chez Ofanto/Mrb<sub>5</sub>.

Le manque d'eau et les hautes températures qui caractérisent la région des hauts plateaux suggèrent de choisir une durée de la phase végétative et celle du cycle végétatif pour esquiver ces stress. En effet selon Passioura (2004), pour éviter les périodes critiques du manque d'eau, certaines variétés accomplissent leur cycle de développement avant l'installation de la contrainte hydrique. La précocité constitue, de ce fait, un important mécanisme d'esquive des stress de fin de cycle. La précocité assure une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau.

Cet important rôle joué par la précocité dans l'esquive des stress n'est, cependant, pas toujours évident, lorsque les stress sont de nature intermittente comme c'est le cas de la région ciblée (Mekhlouf *et al.*, 2006). Ainsi dans la présente étude, la durée de la phase végétative ne montre pas une grande variabilité, en F<sub>3</sub>, comme celle qui est constatée pour les autres variables mesurées. L'effet des hautes températures qui se sont imposées brusquement dès le début du mois de mai 2009 a probablement annulé les différences génotypiques pour cette variable. La précocité d'épiaison n'a pas été utile comme critère de sélection telle que suggéré par Akkaya *et al.*, (2006).

Parmi les caractères adaptatifs ciblés dans la présente étude figurent la biomasse accumulée, le poids et le nombre d'épis et la hauteur du chaume. En effet, selon Bajji (1999), les génotypes à croissance rapide qui arrivent à maturité précocement et qui en plus accumulent une biomasse élevée, utilisent mieux l'eau disponible et de ce fait sont moins sensibles aux stress environnementaux. La sélection sur la base de la biomasse accumulée, seule en combinaison avec d'autres

caractères sous la forme d'un indice, présente une réponse directe positive et des réponses corrélatives positives pour le rendement et les nombre et poids des épis. Ces réponses sont cependant variables selon le fond génétique de la population.

Selon Slafer *et al.*, (2005), les variétés adaptées investissent dans le développement d'un système racinaire profond, pour avoir accès à des horizons plus humides, et ainsi elles s'assurent une meilleure alimentation hydrique. Selon Araus *et al.*, (2002), cette caractéristique est liée à la hauteur du chaume. Dans la présente étude, le rôle de la hauteur du chaume, en combinaison avec la biomasse aérienne et le nombre et le poids des épis, s'est révélé très variable selon le croisement.

La connaissance des liaisons qui existent entre les composantes et le rendement permet d'identifier les composantes à utiliser comme critères de sélection. Ces informations permettent d'orienter le processus de sélection de manière à promouvoir les caractères capables d'engendrer une amélioration du rendement. Le nombre de grains produit par unité de surface, résultant du produit du nombre des épis et du nombre de grains par épi, est le caractère le plus fortement lié au rendement. De ce fait, la sélection concomitante pour les épis et/ou le nombre de grains par épi débouche forcément à l'amélioration de la productivité. L'effet de compensation négatif entre les composantes, sous conditions semi-arides, produit des effets incontrôlés sur le rendement grain (Bahlouli *et al.*, 2005 ; Elhani *et al.*, 2007).

La sélection sur la base du poids des épis, comme celle des épis, induit un changement positif du rendement grain. Ce gain de rendement est inférieur à celui réalisé par la sélection sur la base du rendement grain. Selon Witcombe *et al.*, (2004) le semencier cherche une variété qui soit adaptée à une large zone de production pour intéresser le plus grand nombre d'agriculteurs. Cependant une large adaptabilité n'est pas toujours significativement associée à un haut rendement grain, selon Sinebo *et al.*, (2005). Les variétés à large adaptation sont relativement moins

productives. Selon Menad *et al.*, (2008), elles répondent moins à la fertilité du milieu. La sélection pour la tolérance induit, certes, une baisse des rendements sous contrainte, mais cette baisse est cependant moins importante chez les génotypes tolérants comparativement à celle notée chez les génotypes sensibles (Fellah *et al.*, 2002 ; Bahlouli *et al.*, 2005).

### **Conclusion**

La nature variable du climat des hautes plaines semi-arides, impose que la sélection soit faite pour la performance et l'adaptabilité.

Parmi les caractères qui jouent un rôle dans l'adaptation figurent la biomasse aérienne et la hauteur du chaume. Le poids des épis représente la part de la biomasse aérienne qui est traduite sous forme de grain.

Les résultats de la présente étude montrent que la sélection sur la base de la biomasse, du poids des épis et de leur combinaison, sous la forme d'un indice, chez trois populations F<sub>2</sub> de blé dur aboutit à des effets positifs sur le rendement grain de la descendance en F<sub>3</sub>. Ces effets varient, en valeur, selon le potentiel de la population sous sélection.

Les meilleurs niveaux de rendement sont obtenus sous sélection à l'intérieur de la population Ofanto/Mrb5 quelque soit le critère de sélection utilisé. Parmi les trois critères de sélection employés et vu la nature variable du milieu de production ciblé qui est la région des hautes plaines, il est suggéré de pratiquer la sélection sur indice pour avoir un contrôle sur l'ensemble des variables qui affectent le potentiel de rendement et l'adaptabilité à l'intérieur de Ofanto/Mrb5.

### Références bibliographiques

1. Akkaya, A. T. Dokuyucu, R. Kara, M. Akcura. 2006. Harmonization ratio of post tp pre anthesis durations by thermal times for durum wheat cultivars in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 42: 404-408.
2. Allard, R.W. 1964. *Principles of Plant Breeding*, 3<sup>rd</sup> Edition. John Willey and Son Eds, 247 pp.
3. Annicchiarico P., F. Bellah, T. Chiari. 2005. Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop Sci.* 45:1741-1749.
4. Annicchiarico P., P. Bellah. T. Chiarai. 2006. Repeatable genotype x location interaction and its exploitation by conventional GIS-based cultivar recommendation for durum wheat in Algeria. *Europ. J. Agronomy*, **24**: 70-81.
5. Annicchiarico, P., A. Iannucci. 2008. Adaptation strategy, germplasm type and adaptive traits for field pea improvement in Italy based on variety responses across climatically contrasting environments. *Field Crops Res.* **108**: 133-142.
6. Araus J.L., G.A. Slafer, M.P. Reynolds, C. Royo. 2002. Plant breeding and water relations in C3 cereals: what should we breed for? *Annals of Botany*, **89**: 925-940.
7. Bahlouli F., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, K.L. Hassous. 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.
8. Bajji M. 1999. Etude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur: caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux invitro. Thèse de doctorat, faculté des sciences, Université catholique de Louvain.
9. Baker, R.J. 1974. Selection indices without economic weights for animal breeding. *Can. J. Ani. Sci.* **54**: 1-8.

10. Baldy C. 1974. Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques et leurs influences sur la production des principales zones céréalières. *Document du projet céréales*, 170 pp.
11. Bédrani S. 2001. Stratégie et politiques agricoles des pays du Maghreb central. *C.R. Agric.* **87**: 179-188.
12. Benmahammed A., M. Kribaa, H. Bouzerzour, A. Djekou, .2008. Relationships between F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> and F<sub>4</sub> derived lines for above ground biomass and harvest index in three barley crosses in a Mediterranean type environment. *Agricultural Journal* **3**:313-318.
13. Benmahammed, A. H. Nouar, L. Haddad, Z. Laala, A. Oulmi, H. Bouzerzour.2010. Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **14**: 1-12,
14. Belkherchouche H., S. Fellah, H. Bouzerzour, A. Benmahammed, N. Chellal. 2009. Vigueur de la croissance, translocation et rendement grain du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Courrier du savoir*, **9**:17-24.
15. Bouzerzour H., A. Benmahammed, N. Benkahrbache, K.L. Hassous. 2002. Contribution des nouvelles obtentions à l'amélioration et à la stabilité du rendement d'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Revue Recherche Agronomique (INRAA)* **10**: 45-58,
16. Bouzerzour H., A. Djekoun, A. Benmahammed, K.L. Hassous. 1998. Contribution de la biomasse aérienne de l'indice de récolte et de la précocité à l'épiaison au rendement en grain (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Cahiers de l'Agriculture*, **8**: 133-137.
17. Brancourt-Hulmel, M., G. Doussinault, C. Lecomte, P.Berard, V. Le Buanec, M.Trotte. 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci.* **43**: 37-45.

18. Brancourt-Hulmel, M., E. Heumez, P. Pluchard, D. Beghin, C. Depatureaux, A. Giraud, and J. Le Gouis 2005. Indirect versus direct selection of winter wheat for low-input or high-input levels. *Crop Sci.* **45**:1427–1431.
19. Cantero-Martinez, C., J.M. Villar, I. Romagosa, E. Fereres. 1995. Growth and yield responses of two contrasting barley cultivars in a mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, **4**: 317-326
20. Ceccarelli S., S. Grando, A. Impiglia. 1998. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, **103**: 307-318.
21. Chennafi H., A. Aidaoui, H. Bouzerzour, A. Saci. 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.
22. CIC. 2007. International Grains Council. World Grains Statistics, p 13-17.
23. Clarke J.M., R.M. De Pauw, T.F. Townley-Smith. 1991. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. *Crop Sci.*, **32**: 723-728.
24. Condon, A.G., R.A. Richards, G.J. Rebetzke. 2004. Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, **55**: 2447-2460.
25. Cooper, M., R.E. Stucker, I.H. DeLacy, B.D. Harch. 1997. Wheat breeding nurseries, target environments, and indirect selection for grain yield. *Crop Sci.* **37**:1168–1176
26. Cropstat 7.2.3. 2008. Software package for windows, International Rice Research Institute, IRRI, Manila.
27. Dakheel, A.J., I. Nadji, V. Mahalazkshmi, J.M. Peacock. 1993. Morphological traits associated with adaptation of durum wheat to harsh Mediterranean environments. *Aspects of Applied Biology*, **34**: 297-307.
28. Debaeke P., M. Willaume, P. Casadebaig, J.M. Nolot. 2008. Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau. *Innovations Agronomiques*, **2**: 19-36.

29. Ellis, R.P., J. Brown. 1986. Yield in spring barley at contrasting sites in England and Scotland. *Ann Appl Biol*, 109: 613–617.
30. Elston, R.C. 1963. A weight-free index for the purpose of ranking selection with respect to several traits at a time. *Biometrics* 19:85-97.
31. Excel. 2003. Microsoft office Excel 2003.
32. FAOSTAT. 2007. Statistical database of the food and agriculture organisation of the United Nations.
33. Falconer, D.S., 1982. Introduction to Quantitative Genetics, third edition. Longman, Harlow, UK.
34. Fellah A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Djekoun. 2002. Sélection pour améliorer la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Actes de l'IAV HII*, 64: 35-42
35. Feliachi , K. 2000. Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. *Proceedings du symposium « blé 2000, Enjeux et Stratégies »*, 21-28.
36. Garcia del Moral L.F., Y. Rharrabti, D. Villegas, C. Royo. 2003. Evaluation of grain yield and its components in durum wheat under Mediterranean conditions: an ontogenic approach. *Agron. J.* 95: 266–274.
37. Haddad, L. 2009. Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de Magister, Département Agronomie, Faculté des Sciences, UFAS, 70 pp.
38. Hammer, O., D.A.T. Harper, P. D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4: 9pp.
39. Hervieu, B., R.Capone, S. Abis. 2006. The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean. *Ciheim analytical note*, N°9, 14pp.

40. Huang, L., S.A. Brooks, W.L. Li, J.P. Fellers, H.N. Trick, B.S. Gill. 2003. Map-based cloning of leaf rust resistance gene *Lr21* from the large and polyploid genome of bread wheat. *Genetics* 164:655–664.
41. Kameli A., D.M. Losel. 1995. Growth and sugar accumulation on durum wheat plant under water stress. *New Phytol*, **132**: 57-62.
42. Kotzamanidis K.T., A.S. Lithourgidis, A.G. Mavromatis, D.I. Chasioti, D.G. Roupakias. 2008. Prediction criteria of promising F<sub>3</sub> populations in durum wheat: A comparative study. *Field Crops Research* **107** : 257–264
43. Laumont P., J. Erroux. 1961. Inventaire des blés durs rencontrés et cultivés en Algérie. *Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord* **5** : 1- 96
44. Levy, A.A., M. Feldman. 2002. The impact of polyploidy on grass genome evolution. *Plant Physiol.* 130: 1587-1593.
45. Lamkey, K. R., M. Lee. 1993. Quantitative genetics, molecular markers, and plant improvement. p. 104-115. In: B. C. Imrie and J. B Hacker (ed.) *Focused plant improvement: Towards responsible and sustainable agriculture. Proc. 10th Australian Plant Breeding Conf., Gold Coast*
46. Langridge, P., N Paltridge, G. Fincher .2006. Functional genomics of abiotic stress tolerance in cereals. *Briefing in functional genomics and proteomics.* **4** :343-354.
47. Mac Key J. 2005. Wheat: Its concept, evolution, and taxonomy. In: *Conxita, R., Nachit, M., di Fonzo, N., Araus, J.L., Pfeiffer, W.H., and Slafer, G.A. (eds.). Durum wheat breeding: current approaches and future strategies. Food product press.* 3-61.
48. M.A.D.R. 2007. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Annuaire statistiques, Série B.
49. Mekhlouf A., H. Bouzerzour. 2000. Déterminisme génétique et associations entre le rendement et quelques caractères à variation continue chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Recherche Agronomique, INRAA*, **7** : 37-49.

50. Mekhlouf A., F. Dehbi, H. Bouzerzour, A. Hannachi, A. Benmahammed, A. Adjabi. 2006. Relationships between cold tolerance, grain yield performances and stability of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes grown at high elevation area of Eastern Algeria. *Asian Journal of Plant Sciences*, **5**: 700-708.
51. Mekhlouf A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Hadj Sahraoui, N. Harkati. 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse* **17**: 507-513.
52. Menad, A. 2009. Contribution à l'étude de l'interaction Génotype x milieu de l'orge. *Mémoire magister, INA El Harrach*, **70pp.**
53. Mian, M.A.R., M. A. Bailey, D. A. Ashley, R. Wells, T. E. Carter, W. A. Parrott, H. R. Boerma. 1996. Molecular markers associated with water use efficiency and leaf ash in soybean. *Crop Sci.* **36**:1252-1257.
54. Monneveux, P., C. Sanchez, D. Beck, G.O. Edmeades. 2006. Drought tolerance improvement in tropical maize source populations: Evidence of progress. *Crop Sci.* **46**:180-191.
55. Mulamba, N.N., L.J. Mock. 1978. Improvement of yield potential of the Eto Blaco maize (*Zea mays*. L.) population by breeding for plant traits. *Egypt. J. Genet. Cyt.* **7** :40-51.
56. Nouar H., L. Haddad, Z. Laala, A. Oulmi, H. Zerargui, A. Benmahammed, H. Bouzerzour 2009. Performances comparées des variétés de blé dur : Mohammed Ben Bachir, Waha et Boussalam dans la wilaya de Sétif. Soumis à *Céréaliculture*
57. 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](http://www.regional.org-au/au/cs).

58. Pena, R.J., W.H. Pfeiffer. 2005. 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. Food product press. 663-686.*
59. Pesek, J. , R.J. Baker. 1969. Desired improvement in relation to selection indices. *Can J. Plant Sci.* **49** :803-804.
60. Reynolds, M.P., A. Pellegrineschi, B. Skovmand. 2005. Sink-limitation to yield and biomass: a summary of some investigations in spring wheat. *Ann. Appl. Biol.* **146**: 39–49.
61. Richards R.A. 2006. Physiological traits used in the breeding of new cultivar for water- scarce environments. *Agricultural Water Management*, **80**: 197-211.
62. Richards, R.A., Rebtzke, G.J., A.G. Condon. A.F. Van Herwaarden. 2002. Breeding for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci.*, **41**: 111-121.
63. Safi R.2010. Etude de l'interaction génotype x milieu et son impact sur la sélection de quelques variétés de blé dur cultivées en Algérie. *Mémoire de magister, Faculté des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, Université Saad Dahleb. 90 pp.*
64. Siddique, K.H.M., E.J.M. Kirby, M.W. Perry. 1989. Ear:stem ratio in old and modern wheat varieties: relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Res.*, **21**: 59-78.
65. Simane, B., J.M. Peacock, P.C. Struik. 1993. Differences in development and growth rate among drought-resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). *Plant Soil*, **157**: 155-166.
66. Sinebo, W., R. Gretzmacher, A. Edelbauer. 2004. Genotypic variation for nitrogen use efficiency in Ethiopian barley. *Field Crops Res.*, **85**, 43–60..

67. Slafer, G.A., J.L. Araus, C. Royo, L.G. Del Moral. 2005. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *J. Applied Biology* **146** : 61-79.
68. Strefeler, M.S., T.C. Wehner.1986. Comparison of six methods of multiple-trait selection for fruit yield and quality traits in three fresh-market cucumber populations. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **111** :792-798.
69. Tardieu, F. M.Reymond, B. Muller. 2004. Dealing with the genotype x environment interaction via a modelling approach: a comparison of QTLs of maize leaf length or width with QTLs of model parameters. *J. Exp. Bot.* **55** : 2461–2472.
70. Troccoli, A., G. M. Borrelli, P.D. Vita, C. Fares, N.D. Fonzo. 2000. Durum wheat quality: a multidisciplinary concept. *Journal of Cereal Science* **32**: 99–113.
71. Virk, D.S., K.A. Steele, J.R. Witcombe. 2008. Mass and line selection can produce equally uniform rice varieties. *Field Crops Research* **100**:341–347
72. Wehner T.C. 1982. Weighted selection indices for trials and segregating populations. *Cucurbit. Genet. Coop. Rpt.* **5** : 18-20.
73. Witcombe, J.R., D.S. Virk, D.S. 2001. Number of crosses and population size for participatory and classical plant breeding. *Euphytica* **122**:451-462
74. Zhang B. F.M., L.G.Huang, Z.Y.Cheng, Y. Zhang.2006. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural Water Management*, **79**: 28-42.