

REPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'Agriculture et des  
Ressources Hydrauliques

Institution de la Recherche et de  
l'Enseignement Supérieur  
Agricoles



Ministère de l'Enseignement  
Supérieur, de la Recherche  
Scientifique et de la Technologie

Université du 7 Novembre  
À Carthage

Institut National Agronomique de Tunisie

Thèse de doctorat en sciences agronomiques  
Spécialité : Sciences de la Production Végétale

Thème :

**Contribution à l'étude de l'adaptation des cultivars  
de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'agriculture  
biologique : Rendement en grains, stabilité  
et qualité technologique et nutritionnelle**

Préparée et présentée publiquement par :

**Khaled Sassi**

Le 01 novembre 2008 devant le jury composé de :

Pr. Mohamed Ben Khedher	: Président
Pr. Abderrazak Daaloul	: Directeur de Thèse
Dr. Salah Rezgui	: Rapporteur
Pr. Moncef Harrabi	: Rapporteur
Pr. Mohamed Bouslama	: Examineur

## Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier tout particulièrement Professeur Abderrazak Daaloul pour m'avoir accueilli dans son équipe et encadré durant toutes ces années. Pour sa patience, son implication personnelle, son soutien qui le caractérisent, ses orientations qui ont ponctué ces années de thèse et tout le temps qu'il m'a consacré malgré ses nombreuses occupations, mais aussi pour la liberté d'action qu'il m'a laissée, je l'assure de ma profonde reconnaissance. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance, de ma profonde admiration et de ma respectueuse considération.*

*Je tiens également à exprimer ma vive gratitude et mon profond remerciement aux Professeurs Mohsen Boubaker et Mohamed Ben Khedher, qui m'ont aimablement guidé tout au long de ce travail. Je souhaiterais ici leur témoigner ma sincère reconnaissance pour tous les conseils et les remarques objectives qu'ils m'ont apportés.*

*Je remercie très sincèrement Docteur Salah Rezgui pour avoir pris le temps de m'expliquer les modèles statistiques utilisés, pour les remarques constructives et les conseils prodigués au cours de la rédaction.*

*Je remercie très chaleureusement mon collègue et ami Professeur Mokhtar Mahouachi, qui n'a jamais été avare en conseils, en encouragements. Il m'a beaucoup rassuré par son enthousiasme et sa disponibilité.*

*Je tiens à remercier plus particulièrement les deux rapporteurs, Professeur Moncef Harrabi & Docteur Salah Rezgui d'avoir consacré une partie de leur temps à ce travail.*

*Je remercie vivement Professeur Mohamed Ben Khedher pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de cette thèse.*

*Je remercie aussi Professeur Mohamed Bouslama, pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent également au Professeur Bouzid Nasraoui, Directeur de l'Ecole Supérieure d'Agriculture du Kef, pour sa gentillesse, son aide, sa disponibilité et ses conseils.*

*Je ne saurais terminer cette liste de remerciements sans évoquer les ouvriers, les techniciens, les secrétaires et tous les collègues de l'Ecole Supérieure d'Agriculture du Kef pour leur bonne humeur, leur dévouement, leur disponibilité et leur efficacité.*

*Je tiens à remercier aussi le Directeur du Centre Technique des Céréales de Bousalem, Monsieur Khelifa M'Hedhbi qui m'a facilité la tâche pour la conduite des essais durant les quatre années d'expérimentation ainsi que tout le staff qui travaille avec lui.*

*Je remercie également Professeur Claude Deroanne ainsi que son assistant Christophe Blecker de m'avoir accueilli chaleureusement à leur Unité de Technologie des Industries Agro-Alimentaires de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique) pour accomplir l'analyse de la qualité de semences de blé dur. Au sein de cette Unité, de nombreuses personnes ont aussi, de près ou de loin, participé à ce travail par leur orientation et ainsi permis sa réalisation : merci donc à Christine Anceau, Pascal Bodson, Albert Drouard, Stéphane Guillaume, Maguy Pétré...*

*Mes remerciements vont aussi au Professeur Adibe Gabriel Hathout de l'Université de Paris ainsi qu'au Professeur Joseph Robins de l'Université d'Utah (USA) avec qui j'ai pu analyser la supériorité variétale au niveau du traitement de la stabilité.*

*Je n'oublierai pas d'adresser ma grande gratitude au Professeur Abdelaziz Ben Mabrouk, sans qui rien n'aurait été possible. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.*

*Ces remerciements seraient bien incomplets si ma famille n'y était associée. Merci donc à mon père, qui a tant voulu cette thèse, à ma mère, mon frère et mes sœurs, à mon épouse Souha, mon ange Emna, qui a laissé travailler son papa avec beaucoup de patience, à ma belle-sœur et à mes beaux-parents. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance. Cette thèse leur est dédiée en reconnaissance des efforts et des sacrifices consentis durant toutes ces années.*

*Une pensée particulière à tous mes ami(e)s et particulièrement à Mohamed Ali Mehouchi, Hatem Zgallai, Sadreddine Beji et Ouissal Khachchou pour leur précieux soutien tout au long de ce travail.*

*Enfin, à tous ceux dont le nom m'échappe à cet instant et que je regretterai de n'avoir pas cités, tous mes remerciements.*

*Khaled  
Novembre 2008*

## RESUME

Le présent travail a pour objectif général de prospector les variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) pouvant s'adapter au mode de culture biologique. Dans cette optique, quatre années d'études expérimentales (2001, 2002, 2003 et 2004) ont été mises à profit pour caractériser le comportement de quatorze variétés de blé dur dont neuf anciennes et cinq améliorées. Ces expérimentations ont été conduites en modes biologique et conventionnel et dans deux sites à vocation céréalière : Le Kef « Boulifa »: semi-aride inférieur et Bousalem « El Kodia »: semi-aride supérieur. Les paramètres étudiés ont porté sur (i) le rendement en grains de ces variétés, (ii) la stabilité du rendement en utilisant les paramètres de stabilité tels que : le coefficient de variation, le coefficient de régression linéaire, les déviations de régression, l'écovalence de Wricke, l'écovalence de Shukla, l'écovalence de Plaisted et Peterson et la supériorité de Lin et Binns, (iii) la qualité technologique et nutritionnelle du grain entier à partir de la matière sèche, le poids spécifique, les protéines, les acides aminés, la matière minérale, le gluten, l'activité amylasique et la force boulangère.

Les résultats ont montré que le rendement en grains est en moyenne plus faible en mode biologique qu'en mode conventionnel (23.2 et 29.8 qx/ha ESM=0.18 qx/ha respectivement). Cependant, ce comportement des variétés vis-à-vis du mode de culture change en année sèche de 2001. Par ailleurs, l'analyse des données met en évidence le potentiel de production de certaines variétés telles que Khiar, Ben Bechir et INRAT69 (24.7 ; 24.6 et 24.4 qx/ha respectivement) en mode biologique. INRAT69 se caractérise en outre par une stabilité du rendement satisfaisante en mode biologique présentant ainsi un coefficient de variation parmi les plus faibles (33 %) et un coefficient de régression linéaire avoisinant l'unité ( $b_i=0.94$ ). Les deux autres variétés identifiées comme étant potentielles en mode biologique (Khiar et Ben Bechir) présentent cependant une stabilité de rendement moindre.

Les résultats issus de la qualité technologique et nutritionnelle, ont montré l'influence du mode de culture sur les paramètres étudiés. Le mode biologique semble être déterminant dans l'augmentation du poids spécifique des grains (80.3 vs 78.3 kg/hl, ESM=0.03 kg/hl), des teneurs en proline (1.154 vs 1.146 g/100g de MF) et cystéine (0.216 vs 0.186 g/100g de MF), du gluten index responsable des propriétés rhéologiques de la pâte (64.73 vs 61.46 %) et de l'activité

amylasique (406.7 vs 442.6 s, ESM=1.78 s). Contrairement au mode biologique, la teneur en protéines se trouve meilleure en mode conventionnel (13.9 vs 13.5 %/MF, ESM=0.008 %/MF).

Lorsqu'elle est conduite en mode biologique, la variété INRAT69 se distingue aussi par une qualité technologique et nutritionnelle supérieure dont certains paramètres (poids spécifique, matière sèche, teneurs en acides aminés totaux, gluten index et activité amylasique).

Indépendamment du mode de culture, les résultats obtenus montrent que certaines variétés anciennes (Badri, Jnah Khortifa et Hamira) se distinguent par leurs teneurs élevées en protéines (> 16 %/MF) et en acides aminés totaux (> 14.5 g/100g MF). Ces variétés devraient intéresser les sélectionneurs dans les schémas de création des variétés de blé dur spécifiques à l'agriculture biologique.

Sur la base de l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, seule la variété INRAT69 pourrait être retenue pour être potentiellement exploitée en agriculture biologique (rendement satisfaisant et stable, bonne qualité technologique et nutritionnelle). Cette variété pourrait être ainsi adaptée à des utilisations ciblées pour la fabrication des pâtes et couscous biologiques.

**Mots clés.** Agriculture biologique - Blé dur - Sélection - Stabilité - Rendement - Qualité.

## ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the potential of different durum wheat varieties that could be adapted for organic farming. In this context, four experimental years studies (2001, 2002, 2003 and 2004) were carried out in order to assess fourteen durum wheat varieties including nine old and five improved varieties conducted under organic and conventional cultivation methods and in two cereal growing locations : Kef « Boulifa » : low semi-arid and Bousalem “El Kodja” : higher semi-arid. Studied parameters included (i) grain yield, (ii) yield stability using coefficient of variation, linear regression coefficient, deviations from regression, ecovalence of Wricke, ecovalence of Shukla, ecovalence of Plaisted and Peterson and superiority index of Lin and Binns, (iii) technological and nutritional quality of the whole grain, dry matter, specific weight, proteins, amino acids, mineral content, gluten, amylasic activity and baking strength.

Results of the agronomic traits indicated that grain yield is on the average lower under organic cultivation compared to conventional methods (23.2 and 29.8 qx/ha SEM=0.18 qx/ha respectively). However, varieties performance under this environment changed in dry year as was the case in 2001. Data analysis indicated high production potential of some varieties such as Khiar, Ben Bechir and INRAT69 (24.7, 24.6 and 24.4 qx/ha respectively) under organic farming method. INRAT69 was found stable for grain yield under organic farming with low coefficient of variation (33 %) and a linear regression coefficient close to one ( $bi=0.94$ ). Khiar and Ben Bechir varieties, identified for organic cultivation, were unstable.

Results of the technological and nutritional quality were influenced by the cultivation method. The organic method affected positively specific grain weight (80.3 vs 78.3 kg/hl, SEM=0.03 kg/hl), proline contents (1.154 vs 1.146 g/100g of FM) and cystéine (0.216 vs 0.186 g/100g of FM), gluten index which is responsible for the rheological properties of dough (64.73 vs 61.46 %) and amylasic activity (406.7 vs 442.6 s, SEM=1.78 s). Contrary to the organic method, grain protein content is better in the conventional method (13.9 vs 13.5 %/MF, ESM=0.008 %/MF).

Organic cultivation of INRAT69 variety was found to be associated with high nutritional and technological quality parameters such as grain weight, dry matter, total amino acids content, gluten index and amylase activity.

Regardless of the cultivation method, results showed that old varieties Badri, Jnah Khortifa and Hamira have high protein and total amino acids content ( $> 16\%$  FM and  $> 14.5\text{ g}/100\text{g}$  FM, respectively). These varieties should be considered by breeders in selection and breeding programs of durum wheat for organic farming.

Based on these results, only INRAT69 variety could be potentially used in organic agriculture not only because of its stable yield, but also because of its higher technological and nutritional quality. This variety could also be adapted for manufacturing organic pasta and couscous.

**Keywords.** Organic agriculture - Durum wheat - Selection – Stability – Yield – Quality.

## خلاصة

يهدف هذا العمل لاستكشاف الأصناف من القمح الصلب الملائمة للزراعة البيولوجية. لهذا الغرض، وقع استعمال أربعة عشر صنفا من القمح الصلب منها تسعة قديمة و خمسة محسنة و ذلك لمدة زمنية دامت أربع سنوات (2001-2002-2003-2004). و قد أحدثت هذه التجارب لمقارنة الانتاجية في النمطين البيولوجي و العادي وذلك ضمن موقعين مختصين في إنتاج الحبوب و هما الكاف "بوليفة" : شبه جاف سفلي و بوسالم "الكدية" : شبه جاف علوي. هذا و قد اعتنت المؤشرات المدروسة (أ) بإنتاجية الحبوب لمختلف الأصناف، (ب) و استقرار انتاجيتها عبر تحديد ضارب الاختلاف و ضارب الانحدار الخطي و انعطافات الانحدار و مجموع مربعات انحرافات التداخل بالاعتماد على Wricke, shukla et Plaisted et Peterson و تفوق Lin et Binns، (ج) و جودتها التكنولوجية و الغذائية بما في ذلك المادة الجافة و الوزن الخصوصي و البروتينات و الأحماض الأمينية و المادة المعدنية و الجلوتينين و النشاط الأميلازي و مدى الصلوحية لصناعة الخبز. مع العلم و أن المؤشرات الأخيرة حلت من الدقيق الكامل.

و قد أظهرت نتائج التشخيص الزراعي أن معدل إنتاجية الحبوب كان أدنى في النمط البيولوجي بالمقارنة مع النمط العادي (23.2 و 29.8 ق/هك ، الخطأ المعياري للمعدل "خ.م.م." = 0.18 ق/هك على التتابع). هذا وإن سلوك الأصناف بالنسبة لطريقة الزراعة يتغير في السنين الجافة كما كان عليه الحال في سنة 2001. ومن جهة أخرى فإن تحليل المعطيات يبرز قوة إنتاج بعض الأصناف في النمط البيولوجي مثل خيار وبن بشير و انرات 69 (24.7، 24.6، 24.4 ق ق/هك على التتابع). و علاوة على ذلك، يختص الصنف الأخير أي انرات 69 وهو صنف قديم باستقرار مرضي في الإنتاجية في النمط البيولوجي حيث أن ضارب الاختلاف لهذا الصنف هو من المقاييس الأكثر تدنيا (33 %)، كما أن ضارب انحداره الخطي يقارب الوحدة ( $bi=0.94$ ). أما الصنفين الآخرين خيار وبن بشير المعروفين بقوة إنتاجهما في النمط البيولوجي فقط ظهرا أقل استقرارا في الإنتاجية.

بالنسبة لنتائج الجودة التكنولوجية والغذائية فقد أظهرت تأثير النمط الزراعي على المؤشرات المدروسة، حيث يبدو أن زراعة القمح الصلب في النمط البيولوجي يزيد في الوزن الخصوصي للحبوب (80.3)

عوض 78.3 كغ/هل، خ.م.م.=0.03 كغ/هل)، وفي مقادير البرولين (1.154 عوض 100/غ 1.146 عوض 100/غ مادة طازجة) والسيستين (0.216 عوض 100/غ 0.186 عوض 100/غ مادة طازجة) ويحسن مؤشر الجلوتينين المؤثر في الخصائص البيولوجية للعجين (64.73 عوض 61.46 %) وكذلك النشاط الأميلازي (442.6 عوض 406.7 ث، خ.م.م.=1.78 ث). و على عكس النمط البيولوجي، فان مقدار البروتينيات يتحسن في النمط العادي (13.9 عوض 13.5 %/مادة طازجة، خ.م.م.=0.008 %/مادة طازجة).

وعندما يطبق النمط البيولوجي على صنف انرات 69 فان هذا الأخير يتميز أيضا بحسن الجودة التكنولوجية والغذائية كمؤشرات الوزن الخصوصي والمادة الجافة ومقادير الحوامض الأمينية الجمالية ومؤشر الجلوتينين والنشاط الأميلازي.

وبقطع النظر عن النمط الزراعي، فان النتائج المتحصل عليها أظهرت أن بعض الأصناف القديمة (بدري وجناح خرطيفة وحميرة) تميزت بمقاديرها المرتفعة من البروتينات (< 16 %/مادة طازجة) والحوامض الأمينية الجمالية (< 14.5 غ/100 غ مادة طازجة). لذا فإنه يمكن للمشرفين على انتقاء الحبوب أن يستعملوها في برنامج خلق أصناف جديدة من القمح الصلب خاصة بالفلاحة البيولوجية.

واستنادا لجملة النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة، يمكن استغلال الطاقة الجينية لصنف انرات 69 في الفلاحة البيولوجية نظرا لإنتاجيته المرضية والقارة ولحسن جودته التكنولوجية والغذائية. وهذا الصنف يمكن تكييفه لاستخدامات موجهة لصنع العجين والكسكي البيولوجيين.

**كلمات مفاتيح:** الفلاحة البيولوجية - القمح الصلب - الانتقاء - الاستقرار - الإنتاجية - الجودة.

## LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES

AA	acides aminés
AAI	acides aminés indispensables
AANI	acides aminés non indispensables
AB	agriculture biologique
$\alpha\beta_{ge}$	interaction entre le génotype et l'environnement
AC	agriculture conventionnelle
AFSSA	agence française de sécurité sanitaire des aliments
AFNOR	association française de normalisation
$\alpha_g$	effet principal du génotype
Ala	alanine
ANOVA	analyse de la variance
Arg	arginine
Asp	acide aspartique
$\beta_e$	effet principal de l'environnement
$b_i$	coefficient de régression
C	poids des cendres
Ca	calcium
CEMAGREF	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
CNUCED	conférence des nations unies sur le commerce et le développement
Cr	chrome
Cu	cuire
CV	coefficient de variation
Cys	cystéine
Desf.	René Desfontaines (abréviation botanique officielle)
DGPA	direction générale de la production agricole
DON	désoxynivalénol
e	environnement
E	nombre total d'environnements considérés
€	euro
E[Yge]	espérance de la performance du génotype
ESAK	école supérieure d'agriculture du Kef
ESM	erreur standard de la moyenne
FAO	food and agriculture organization
Fe	fer
g	génotype
GH	gluten humide
GI	gluten index (g)
GLM	generalised linear model
Glu	acide glutamique
Gly	glycine
$G_r$	gluten résiduel

$G_r$	gluten total
ha	hectar
HBr	bromure d'hydrogène
HCl	acide chlorhydrique
His	histidine
HNO <sub>3</sub>	nitrate d'hydrogène
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	peroxyde d'hydrogène
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	acide sulfurique
IFOAM	international federation of organic agriculture movements
IGE	interaction génotype environnement
Ile	isoleucine
ITCF	institut technique des céréales et des fourrages
K	potasse
Leu	leucine
Lys	lysine
$\mu$	moyenne générale des performances estimée sur l'ensemble des environnements
MB	mode biologique conventionnel
MC	mode conventionnel
Met	méthionine
MF	matière fraîche
Mg	magnésium
$\mu\text{g}$	microgramme
$M_j$	réponse maximale de la localité numéro j
Mn	manganèse
<i>MPT</i>	teneur en protéine
MS	matière sèche
MSDA	Manuel suisse des denrées alimentaires
n	nombre de localités
N	azote
NaCl	chlorure de sodium
NaOH	hydroxyde de sodium
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ammonium
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ammonium sulfate
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	nitrate
$\sigma_i^2$	variance de la stabilité de Shukla
OGM	organismes génétiquement modifiés
OMC	organisation mondiale de commerce
ONIC	office national interprofessionnel des céréales
OTA	ochratoxine A
P	phosphore
<i>P</i>	poids de la prise d'essai
$P_g$	poids du gluten
pH	potentiel hydrogène
Phe	phénylalanine
$P_i$	indice de supériorité

PMA	plantes médicinales et aromatiques
ppm	partie par million
Pro	proline
PS	poids spécifique
P/L	rapport ténacité / extensibilité
qx	quintaux
R	rang
RM	rang moyen
SAS	Statistical Analysis System
Ser	sérine
SETRAB	syndicat européen des transformateurs et distributeurs de produits de l'agriculture biologique
$S_i^2$	variance génotypique à travers les environnements
SJFI	danish institute of agricultural and fisheries economics
$S^2 d_i$	déviation de régression
$T$	titre de l'acide sulfurique
Thr	thréonine
Tyr	tyrosine
US	united states
$V$	volume d'acide nécessaire pour la titration moins celui du blanco
Val	valine
vitamine B1	thiamine
vitamine B2	riboflavine
Vitamine B3 ou PP	acide nicotinique
Vitamine B5	acide pantothénique
Vitamine B6	pyridoxine
Vitamine B9	acide folique
vitamine C	acide ascorbique
vitamine E	tocophérol
$X_{ij}$	nombre de fois que le génotype $i$ a eu le plus grand rendement dans la localité $j$
$Y_{..}$	performance moyenne de l'ensemble des génotypes sur l'ensemble des environnements
$Y_{.e}$	performance moyenne observée sur l'environnement
$Y_{g.}$	performance moyenne du génotype.
$Y_{ge}$	performance du génotype dans l'environnement
$W$	force boulangère
$W_{g^2}$	écovalence variétale
$W_1$	écovalence de Wricke
$W_2$	écovalence de Shukla
$W_3$	écovalence de Plaisted & Peterson
Zn	zinc

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Comparaison des teneurs en matière sèche (M.S.) dans les légumes feuilles, légumes racines, bulbes et tubercules cultivés selon le mode biologique et conventionnel.....	45
<b>Tableau 2.</b> Composition en lipides du blé.....	53
<b>Tableau 3.</b> Composition en acides gras des lipides du blé, du germe et de l'albumen (% acides gras totaux).....	54
<b>Tableau 4.</b> Comparaison entre les teneurs en vitamines de l'orge biologique et conventionnel (en $\mu\text{g}/100\text{g}$ de M.S.).....	56
<b>Tableau 5.</b> Composition vitaminique moyenne du grain entier du blé (en $\text{mg}/100\text{g}$ de M.S.).....	57
<b>Tableau 6.</b> Teneur en nitrates de divers légumes issus d'exploitations en agriculture biologique.....	61
<b>Tableau 7.</b> Récapitulatif des travaux sur la teneur en nitrate dans la comparaison entre produits de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle.....	62
<b>Tableau 8.</b> Résultats pour quelques indicateurs d'impact sur l'environnement de trois systèmes de production en agriculture biologique (AB) et en agriculture conventionnelle (AC).....	65
<b>Tableau 9.</b> Variétés de blé dur utilisées dans l'expérience.....	71
<b>Tableau 10.</b> Utilisations potentielles des blés selon leur force boulangère.....	85
<b>Tableau 11.</b> Rendements moyens en grains ( $\text{qx}/\text{ha}$ ) de quatorze variétés de blé dur dans deux sites selon deux modes de culture et pendant deux années d'essai.....	89
<b>Tableau 12.</b> Rendements en grains ( $\text{qx}/\text{ha}$ ) de quatorze variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique dans le site du Kef et Bousalem pendant les années d'essai 2001 et 2002.....	93
<b>Tableau 13.</b> Rendements en grains ( $\text{qx}/\text{ha}$ ) de sept variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique dans le site du Kef et Bousalem pendant l'année d'essai 2004.....	98
<b>Tableau 14.</b> Rendements moyens en grains ( $\text{qx}/\text{ha}$ ) de sept variétés de blé dur dans de deux sites selon deux modes de culture, pendant quatre années d'essai .....	99
<b>Tableau 15.</b> Analyse de stabilité du rendement des génotypes de blé dur biologique pour les années d'essais 2000-2004 en utilisant le rendement (Rdt) en $\text{qx}/\text{ha}$ , le coefficient de variation (CV), le coefficient de régression linéaire ( $b_i$ ), les déviations de régression ( $S^2d_i$ ), l'écovalence de Wricke ( $W_1$ ), l'écovalence de Shukla ( $W_2$ ), l'écovalence de Plaisted & Peterson ( $W_3$ ), la supériorité de Lin & Binns ( $P_i$ ) ainsi que leur rang (R) et le rang moyen (RM).....	103
<b>Tableau 16.</b> Le coefficient de corrélation de rang de Spearman pour tous les paramètres de stabilité à travers les années d'essai.....	106
<b>Tableau 17.</b> Analyse de stabilité du rendement des génotypes de blé dur conventionnel pour les années d'essais 2000-2004 en utilisant le rendement (Rdt) en $\text{qx}/\text{ha}$ , le coefficient de variation (CV), le coefficient de régression linéaire ( $b_i$ ), les déviations de régression ( $S^2d_i$ ), l'écovalence de Wricke ( $W_1$ ), l'écovalence de Shukla ( $W_2$ ), l'écovalence de Plaisted & Peterson ( $W_3$ ), la supériorité de Lin & Binns ( $P_i$ ) ainsi que	

leur rang (R) et le rang moyen (RM).....	108
<b>Tableau 18.</b> Poids spécifique moyen (kg/hl) et matière sèche moyenne (%) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur selon deux modes de culture.....	110
<b>Tableau 19.</b> Teneur en protéines des semoules entières issues des 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique (%/MS).....	113
<b>Tableau 20.</b> Composition en acides aminés indispensables (en g/100g MF) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.....	119
<b>Tableau 21.</b> Composition des acides aminés non indispensables (en g/100g MF) des semoules entières issues des 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.....	120
<b>Tableau 22.</b> Teneur en gluten (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique .....	125
<b>Tableau 23.</b> Activité amylasique (en secondes) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique .....	128
<b>Tableau 24.</b> Teneur en cendres (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique .....	130
<b>Tableau 25.</b> Teneur en macroéléments (en g/100g de MS) des farines entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique .....	131
<b>Tableau 26.</b> Utilisations potentielles des différentes variétés de blé dur suivant la valeur de la force boulangère.....	134

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Proportion de superficie mondiale (en %) consacrée à l'agriculture biologique pour chaque continent.....	29
<b>Figure 2.</b> Distribution des revenus totaux (en %) de produits et boissons biologiques par région .....	29
<b>Figure 3.</b> Evolution du nombre de producteurs et des superficies (en ha) conduites en agriculture biologique en Tunisie.....	30
<b>Figure 4.</b> Superficies des différentes cultures conduites en agriculture biologique (en ha).....	31
<b>Figure 5.</b> Représentation schématique des réponses observées sur des réseaux multiloaux pour deux génotypes.....	39
<b>Figure 6.</b> Composition des protéines de la farine de blé.....	47
<b>Figure 7.</b> Régulation du métabolisme azoté du blé et son effet sur l'accumulation de protéines dans le grain.....	49
<b>Figure 8.</b> Représentation schématique du devenir possible de l'azote chez les plantes.....	50
<b>Figure 9.</b> Constitution d'une granule d'amidon.....	51
<b>Figure 10.</b> Représentation schématique de la gélatinisation de l'amidon.....	52
<b>Figure 11.</b> Relation entre le taux de mitadinage et la teneur en protéines du grain.....	69
<b>Figure 12.</b> Principe du gluten index .....	78
<b>Figure 13.</b> Influence de la quantité de gluten humide (en %) sur le volume du pain.....	79
<b>Figure 14.</b> Appareil de Hagberg.....	80
<b>Figure 15.</b> Tubes de gélatinisation.....	80
<b>Figure 16.</b> Principe de la mesure de l'indice de chute de Hagberg.....	80
<b>Figure 17.</b> Conséquences de l'activité amylasique sur l'aspect du produit après cuisson....	81
<b>Figure 18.</b> Etapes de développement de la pâte pendant la mesure à l'alvéographe.....	84
<b>Figure 19.</b> Principe de l'essai à l'alvéographe.....	84
<b>Figure 20.</b> Courbes alvéographiques schématiques des différentes classes de blé.....	85
<b>Figure 21.</b> Rendements en grains (qx/ha) de neuf variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique dans le site du Kef pendant l'année d'essai 2003.....	96
<b>Figure 22.</b> Rendements en grains (qx/ha) de neuf variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique dans le site de Bousalem pendant l'année d'essai 2003.....	96
<b>Figure 23.</b> Relation entre l'adaptabilité des génotypes de blé dur biologique et leur rendement moyen dans deux environnements et durant quatre années d'essai.....	102
<b>Figure 24.</b> Relation entre le coefficient de régression et le rendement moyen en grains de 7 génotypes de blé dur biologique sur deux environnements et durant quatre années d'essai selon Finlay et de Wilkinson (1963).....	104
<b>Figure 25.</b> Teneur en matières protéiques des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur selon les modes de culture conventionnel et biologique.....	115
<b>Figure 26.</b> Relation entre teneur en protéines et rendement en grains pour quatorze variétés de blé dur conventionnel issues de l'année d'essai 2002.....	117
<b>Figure 27.</b> Répartition des valeurs du rendement en grains en fonction de la teneur en protéines des quatorze variétés de blé dur conventionnel issues de l'année d'essai 2002.....	117
<b>Figure 28.</b> Teneur moyenne en acides aminés (en g/100g MF) des semoules entières	

issues de 14 variétés de blé dur selon le mode de culture.....	121
<b>Figure 29.</b> Teneur en acides aminés totaux (en g/100g MF) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur selon le mode de culture.....	122
<b>Figure 30.</b> Répartition des valeurs de la teneur en protéines en fonction de la teneur en acides aminés des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.....	122
<b>Figure 31.</b> Teneur en gluten index (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.....	126
<b>Figure 32.</b> Teneur en gluten sec (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique .....	126
<b>Figure 33.</b> Répartition des valeurs de la teneur en protéines en fonction du gluten index des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.....	127
<b>Figure 34.</b> Teneur moyenne en macroéléments (en %) des farines entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.....	132
<b>Figure 35.</b> Répartition des valeurs de la teneur en protéines en fonction de la force boulangère des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.....	136
<b>Figure 36.</b> Répartition des valeurs de gluten index en fonction de la force boulangère des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.....	136

# Introduction

## INTRODUCTION

Depuis plus d'un demi siècle, l'usage intensif des engrais et des pesticides chimiques de synthèse a conduit à un déséquilibre écologique. En effet, dans certains pays, les sols sont presque biologiquement morts. Les nitrates, la dégradation des ressources naturelles, l'érosion et la perte de la matière organique des sols, ainsi que l'uniformité génétique sont la conséquence des dégâts causés à l'environnement.

Dans les années 60, l'homme a pris conscience des problèmes de la pollution et de la sécurité alimentaire. Lors du Sommet de Rio de Janeiro en 1992, les nations du monde entier ont pris conscience de la nécessité d'économiser les ressources naturelles non renouvelables et de protéger la qualité de notre environnement. Le développement durable a alors été défini comme un développement répondant aux besoins présents d'une humanité solidaire, mais qui laisse aux générations futures la possibilité de survivre et de prospérer.

A cet égard, plusieurs concepts, techniques et méthodes sont utilisés. Le concept de l'agriculture biologique couvre les aspects environnementaux, économiques, sociaux sans oublier la qualité de la production agricole. Ce type de production, considéré prometteur, s'appuie sur le renforcement des procédés biologiques tout en interdisant l'utilisation des engrais et les pesticides synthétiques afin de préserver l'environnement agricole et de produire des aliments sains. De nombreux pays dans le monde lui accordent de l'importance. Par ailleurs, l'agriculture biologique constitue une opportunité à saisir pour mettre en valeur les ressources favorables dont dispose le pays. En Tunisie, les grandes potentialités, qui existent dans plusieurs secteurs accompagnées d'un fort soutien politique, favorisent le bon développement de ce mode de culture. Les céréales biologiques représentent une filière qui peut s'adapter aisément à la conversion en agriculture biologique dans la mesure où elles présentent certaines prédispositions. En effet, ces céréales, qui revêtent une importance capitale tant sur le plan économique qu'environnemental, commencent à se développer mais avec des proportions insuffisantes pour satisfaire la demande. La superficie qui lui est réservée ne dépasse pas ainsi les 45000 ha (DGPA, 2007) soit 3.46 % de la superficie totale du secteur céréalier. Actuellement, les attentes des consommateurs tunisiens et étrangers vis-à-vis de la qualité des céréales biologiques et notamment le blé dur, sont nombreuses et leur demande est en augmentation continue. En effet, le blé dur est la céréale de choix pour la

fabrication des pâtes alimentaires et couscous biologiques de très bonne qualité. Outre l'innocuité, les caractéristiques de qualité du blé dur biologique comprennent : la valeur nutritionnelle ; les propriétés organoleptiques tels l'aspect, la couleur, la texture, le goût et les propriétés de transformation (FAO, 2000). Cette qualité se rapporte aussi bien à l'aspect des produits qu'à leurs aptitudes culinaires (Autran, 1981 ; Feillet, 2000). Les consommateurs s'attendent ainsi à ce que leur nourriture soit exempte de résidus de pesticides et de haute valeur nutritive.

La production du blé dur biologique de qualité, en quantité suffisante, est une condition pour le bon développement des marchés céréaliers biologiques qui s'annoncent les plus promoteurs à l'avenir. En revanche, le défi de notre pays est de satisfaire la demande locale tout en se tournant vers l'exportation. La Tunisie possède donc de nombreux atouts pour produire et exporter des produits biologiques surtout vers l'Europe. Parmi ces atouts, on peut citer la demande persistante des pays européens en céréales biologiques, la proximité géographique de la Tunisie par rapport au lieu de la demande, la qualité supérieure (teneur élevée en protéines) surtout de certaines variétés anciennes de blé dur (Ben Salem *et al.*, 1995). Cela représente à la fois une opportunité pour résorber partiellement le déficit des importations de produits agricoles et agroalimentaires, et un moyen d'augmenter les débouchés avec des produits à forte valeur ajoutée.

Cependant, la réussite de la culture biologique du blé dur dépend en grande partie du choix de la variété. Très peu de recherches ont été initiées pour sélectionner des variétés adaptées à l'agriculture biologique alors que la sélection est un facteur primordial du rendement et de la qualité des productions (De Silguy, 1994). Dans le but de contribuer à identifier quelques variétés adaptées à l'agriculture biologique, nous avons entrepris un travail de recherche qui s'intéresse à 14 variétés anciennes et récentes.

Les objectifs de ce travail sont :

- ✓ Etudier les potentialités de production de 14 variétés de blé dur en conditions biologiques.
- ✓ Comparer les deux modes de productions de blé dur (conventionnel et biologique) dans différentes conditions.
- ✓ Déterminer les variétés les plus stables en mode biologique.
- ✓ Etudier la qualité technologique et nutritionnelle du blé dur issu de l'agriculture biologique.

Les résultats de cette étude devraient identifier l'aptitude de chaque variété à être cultivée en agriculture biologique et de déterminer des similitudes dans le comportement de chaque variété en culture biologique et en culture conventionnelle.

# **Problématique générale**

## PROBLEMATIQUE GENERALE

Dans le but de développer la filière « blé biologique », il paraît prioritaire de mieux comprendre les causes de la fluctuation des rendements en grains enregistrés. En effet, la production du blé biologique est confrontée à de nombreuses difficultés techniques (déficit en azote, concurrence des adventices, pression des maladies) conduisant à une limitation des rendements (20 à 40 % inférieurs à ceux obtenus en agriculture conventionnelle) (Halberg & Kristensen, 1997 ; Offermann & Nieberg, 2000 ; Taylor *et al.*, 2001) ayant de faibles teneurs en protéines (Woëse *et al.*, 1997) et surtout soumis à une forte variabilité des résultats (Tamm, 2000 ; Mäder *et al.*, 2002).

Les difficultés techniques rencontrées dépendent avant tout des systèmes céréaliers pratiqués. Dans les systèmes traditionnels, associant culture et élevage, une part importante de l'azote organique provient des légumineuses fourragères et des amendements organiques (Köpke, 1995). L'inadéquation entre la cinétique de disponibilité de l'azote issu des amendements organiques et les besoins instantanés en cet élément de la culture conduit à des carences azotées fréquentes (Berry *et al.*, 2002).

Le développement, en Tunisie, des systèmes céréaliers sans élevage a fait naître de nouvelles questions concernant la gestion de l'azote sur blé. La faible présence de légumineuses dans la rotation, associée à l'absence d'effluents d'élevage, conduit, dans ces situations, à l'utilisation exclusive de sources d'azote exogène à la ferme. En plus, les régions traditionnellement cérésières (surtout du Nord-Ouest de la Tunisie) présentent un taux réduit de conversion en agriculture biologique suite à l'absence de structures de développement et d'approvisionnement « relais » spécifiques à ce mode de culture, et à la concurrence des autres productions à forte valeur ajoutée (céréales conventionnelles, cultures maraîchères,...) auxquelles s'ajoute un certain rejet professionnel de cette agriculture alternative face à un système conventionnel dominant.

En agriculture conventionnelle, on peut facilement raisonner le choix d'une variété de blé et estimer par la suite l'objectif de rendement. En agriculture biologique, la présence de nombreux facteurs limitants surtout l'interdiction d'utilisation des engrais et des pesticides chimiques, conduit à de fortes variations du rendement ce qui rend délicat le choix variétal et l'estimation de

l'objectif de rendement. Il est, par conséquent, difficile d'adapter les méthodes de raisonnement utilisées en agriculture conventionnelle. La fluctuation des rendements du blé biologique par exemple, peut osciller, au sein d'une même région de moins de 10 qx/ha à plus de 65 qx/ha (Le Clech & Hachler, 2003). Par ailleurs, on note une forte variabilité des résultats pour un même cultivar en fonction des conditions édaphiques, climatiques et culturales. En Tunisie par exemple, la production de céréales est fortement tributaire des aléas climatiques. Ainsi, la récolte de céréales conventionnelles de 0.6 millions de tonnes en 1995 a été suivie en 1996 d'une production record de 2.8 millions de tonnes (Lemiegre *et al.*, 2001). En effet, le choix des variétés en agriculture biologique est plus difficile qu'en agriculture conventionnelle car il se heurte à plusieurs contraintes imposées par la réglementation. Le choix de variétés résistantes par exemple (Largo, 2001), semble être le moyen le plus efficace pour limiter les maladies foliaires (rouille, oïdium, septoriose). De plus, un des principes de l'agriculture biologique est de chercher à préserver le patrimoine variétal, pour cela, nous avons tendance à privilégier des variétés rustiques et anciennes. Ces variétés traditionnelles sont particulièrement adaptées à certaines conditions de culture dans lesquelles d'autres variétés connaîtraient un développement plus difficile.

Dans les régions semi-arides, le choix des variétés adaptées de blé dur biologique est un facteur parmi d'autres influençant l'expression du rendement. En effet, l'adaptation spécifique des cultivars a conduit les chercheurs à s'intéresser davantage aux écotypes locaux. Par ailleurs, Ceccarelli (1989) préconise la recherche de géotypes productifs à stabilité agronomique très spécifique. En Tunisie, les variétés de blé dur comportent des types très variés. Cependant, aucune indication sur leur performance selon les modes de conduite n'est disponible. Les concepts d'adaptabilité et de stabilité restent des concepts peu maîtrisés en Tunisie surtout pour les variétés conduites biologiquement.

Le choix des variétés de blé utilisées en agriculture biologique doit mettre aussi en évidence la recherche prioritaire de qualité boulangère (ONIC, 2000). Les teneurs en protéines et en gluten devraient être prises en considération. En effet, ces teneurs sont souvent faibles chez les blés biologiques (Gooding *et al.*, 1993 ; Poutala *et al.*, 1994 ; Woëse *et al.*, 1997) compte tenu de la présence de forts déficits azotés au printemps. Les farines biologiques présentent aussi une tolérance réduite au pétrissage ainsi qu'un gonflement limité de la pâte (Dlouhy, 1981 ; Feil & Stamp, 1993).

Néanmoins, la présence de fréquents déficits azotés auxquels s'ajoute le manque de références techniques conduit à produire des blés de qualité boulangère moyenne à faible. L'amélioration de la qualité technologique et nutritionnelle du blé biologique nécessite le développement de recherches dans le domaine de la sélection variétale (Lammers Van Bueren *et al.*, 2002).

Il convient alors de développer des recherches dont le but serait d'identifier et de sélectionner des variétés de blé ayant un potentiel en agriculture biologique et se caractérisant par une bonne adaptation, une stabilité suffisante et une qualité qui mettraient en valeur les céréales.

# *CHAPITRE 1*

## **Synthèse bibliographique**

# CHAPITRE 1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1- Agriculture biologique : Définition, principe et intérêts

Contrairement aux idées reçues et répandues, l'agriculture biologique n'est pas une nouveauté. Ce n'est pas, non plus, une pratique culturale absolument opposée à l'agriculture conventionnelle. En fait, les spécificités de l'agriculture biologique n'excluent pas l'application de techniques utilisées en agriculture conventionnelle. Outre la rotation, qui est le pilier central de l'agriculture biologique, trois autres aspects techniques sont importants pour la production : la fertilisation, le désherbage et la lutte contre les maladies (Villeneuve, 1992).

L'agriculture biologique demande un niveau de technicité élevé, elle associe les acquis permanents de la tradition et les connaissances récentes de la biologie et de l'agronomie (Guet, 1999).

Les pragmatiques la considèrent comme une niche économique en pleine expansion et/ou comme un laboratoire d'idées et de pratiques agricoles innovantes (Gautronneau *et al.*, 1981).

Pour d'autres, l'agriculture biologique se réfère aux systèmes agricoles qui suivent les principes et les logiques d'un organisme vivant dans lequel tous les éléments (le sol, les plantes, les animaux, les insectes, le paysan etc.) sont étroitement liés les uns aux autres. Elle doit donc être basée sur une compréhension approfondie et une gestion intelligente de ces interactions et processus (Eyhorn *et al.*, 2002).

Ce nouveau mode de culture est un système cultural particulier décrit selon des normes de base (réglementation) sans l'utilisation des engrais et pesticides artificiels (Ben Khedher, 2000). Il est codifié dans un cahier des charges dont le point central est l'exclusion de l'usage de produits chimiques de synthèse (engrais, pesticides, hormones de croissance) (Guet, 1999 ; Solana, 1999). L'agriculture biologique est donc réglementée dans le but de protéger aussi bien les producteurs que les consommateurs (Raiffaud, 2001) et surtout de préserver l'environnement et l'équilibre de la biodiversité. Des systèmes d'inspection et de certification sont mis en place afin de certifier les produits agricoles biologiques ou les denrées alimentaires qui en sont issus (Tovey, 1997 ; DeLind, 2000 ; Michelsen, 2001 ; Ramboatiana, 2002). Il est donc le seul mode de production agricole réglementé obligeant les producteurs d'une part à suivre les recommandations inscrites

dans un cahier des charges et d'autre part à se faire contrôler pour garantir le respect de la réglementation. Cette volonté de transparence permet d'assurer le bon fonctionnement de la filière agri-biologique et la confiance des consommateurs.

Selon Durant (1998), elle est une forme de gestion fondée sur la reconstitution permanente de la fraction vivante du sol permettant de maintenir l'équilibre du sol grâce à la permanence de l'humus, à des façons culturales appropriées, à des assolements pluriannuels et à l'apport d'engrais organiques et des amendements peu solubles.

Par ailleurs, Bailleux & Scharpe (1994) indiquent qu'il s'agit d'un système de gestion de l'exploitation agricole impliquant des restrictions importantes en matière de fertilisants et de pesticides. En effet, ce système favorise le développement de méthodes de production en évitant l'utilisation des pesticides et des engrais chimiques de synthèse.

En 2000, Bonnemort rapporte que la difficulté de la culture biologique est de devoir anticiper fortement les problèmes techniques qui vont être à priori rencontrés. Chaque problème d'ordre technique sera résolu avec un raisonnement mettant en jeu l'ensemble du fonctionnement sol, plante et climat. Autrement dit, il s'agit d'un système d'exploitation qui tient compte des aspects agronomique, économique, écologique et humain (Ben Khedher, 2000).

D'après Guet (1992), l'agriculture biologique est une démarche globale fondée sur un ensemble de principes :

- utiliser des pratiques spécifiques de production pour assurer une croissance équilibrée de la plante,
- préserver la fertilité des sols,
- éviter la pollution de l'environnement et le gaspillage des ressources naturelles,
- préserver la faune et la flore,
- utiliser une liste limitée de produits "non chimique" de fertilisation, de traitement, de stockage et de conservation respectant le cahier des charges,
- produire des aliments de qualité.

D'autre part, l'agriculture biologique devrait aboutir à la production de denrées alimentaires saines, exemptes de résidus et en parfaite harmonie avec la nature, tout en respectant la

biodiversité et les ressources naturelles (Bailleux & Scharpe, 1994 ; Kilcher, 1996 ; Kilcher *et al.*, 1996). Selon Caplat & Giraudel (1996), elle fait appel à un savoir-faire, et la recherche de la qualité pourrait entrer à la fois dans une logique de marché et une logique de protection de l'environnement.

Une étude scientifique réalisée par Joyeux (2000), révèle que les aliments biologiques contiennent plus de vitamines et de micro-nutriments préventifs des cancers que les aliments non biologiques.

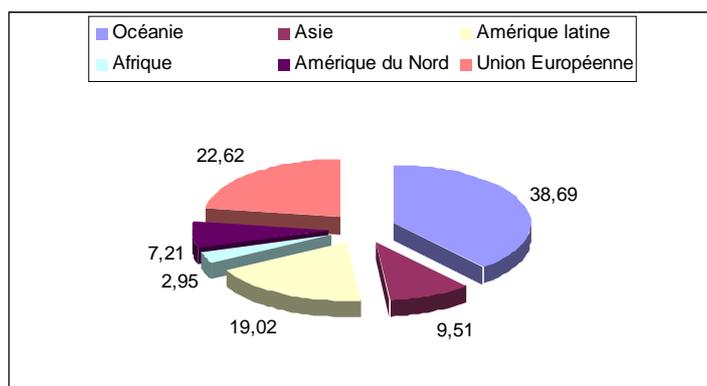
Enfin Minnar *et al.* (1996) affirment que l'agriculture biologique, par la qualité de ses produits, offre actuellement un intérêt croissant chez les consommateurs, les producteurs et les gouvernements dans de nombreux pays.

Ces intérêts expliquent sans doute l'attention que lui accordent de plus en plus de pays, nombreux dans le monde.

## **2- Agriculture biologique dans le monde**

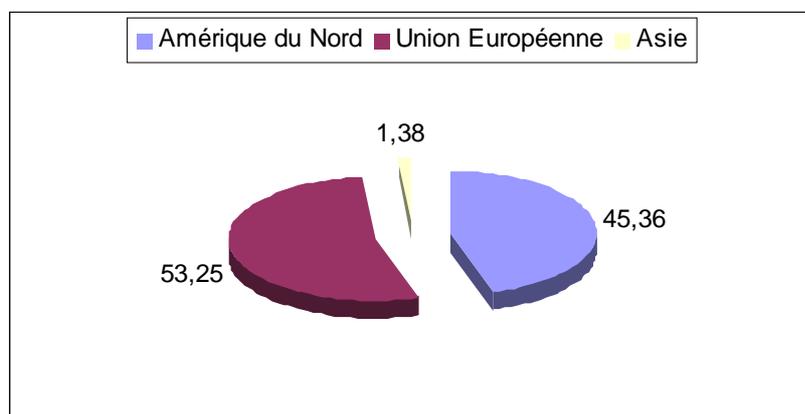
L'intérêt suscité par l'agriculture biologique a été renforcé par les inquiétudes du grand public concernant la pollution, la sécurité sanitaire des aliments et la santé humaine et animale, ainsi que par la valeur accordée à la nature et à l'environnement. En conséquence, l'agriculture biologique, s'est répandue rapidement dans plus de 120 pays.

Entre 1995 et 2000, la superficie totale de terres biologiques en Europe et aux Etats-Unis avait triplé. En 2006, on estime que dans le monde entier, environ 31 millions d'hectares sont cultivées de façon biologique. Près de la moitié se trouvait en Océanie, presque un quart en Europe et un cinquième en Amérique latine (figure 1).



**Figure 1.** Proportion de superficie mondiale (en %) consacrée à l’agriculture biologique pour chaque continent (en %) (Source : IFOAM, 2007)

Aujourd’hui, grâce à la collaboration de plusieurs grandes chaînes de supermarchés, le marché des produits biologiques est en plein essor. Selon les estimations faites par le Centre de Commerce International du CNUCED/OMC, le marché mondial de détail pour les aliments et les boissons biologiques a atteint 33 milliards de dollars US en 2005. Les plus grands marchés pour les produits biologiques dans le monde entier sont aux Etats-Unis, en Europe et en Asie. Ils détiennent la plus grande part des revenus globaux estimés respectivement à une valeur de 11.5 milliards d’€ (45.36 %), 13.5 milliards d’€ (53.25%) et 350 millions d’€ (1.38 %) (figure 2).



**Figure 2.** Distribution des revenus totaux (en %) de produits et boissons biologiques par région (Source : IFOAM, 2007)

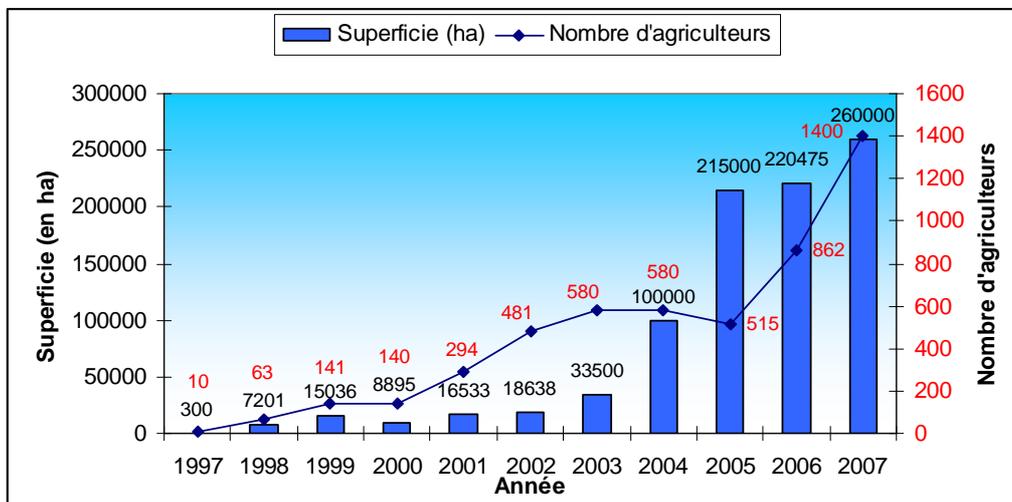
Bien que les marchés d’exportation soient difficiles d’accès, ils constituent de bonnes opportunités pour les pays en voie de développement en vue de l’exportation des produits biologiques qui ne sont pas produits en Europe ou en Amérique du Nord. Il est à noter que la

rapidité de l'augmentation de la demande est largement supérieure à l'offre du moins à court et moyen terme.

### 3- Agriculture biologique en Tunisie

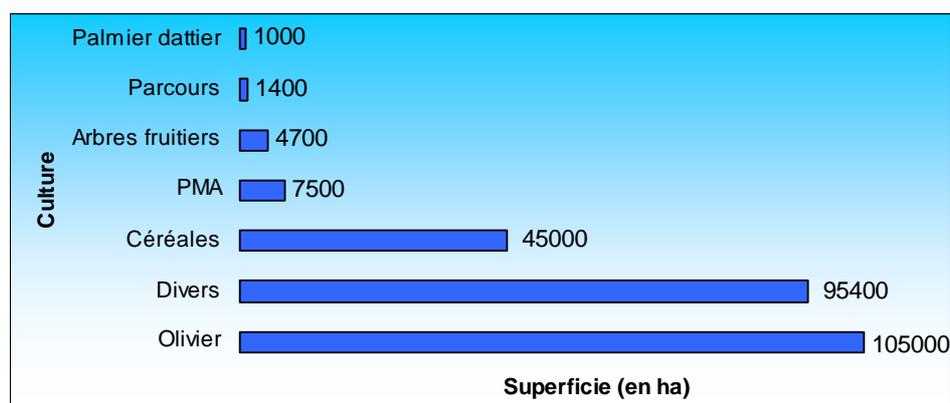
L'agriculture biologique constitue une opportunité à saisir pour une meilleure valorisation des ressources favorables dont dispose le pays. Les régions agricoles tunisiennes sont très propices au développement de ce mode de culture. En effet, elles devraient s'approprier à des itinéraires techniques basés exclusivement sur les intrants biodégradables. De même, l'attachement d'un grand nombre d'agriculteurs aux pratiques ancestrales de lutte biologique et de respect de l'environnement favorise l'adoption de ce mode de culture.

Avec une demande internationale croissante pour des produits alimentaires biologiques, ce type de culture connaît depuis quelques années un intérêt de plus en plus grand de la part des agriculteurs. En effet, ce mode d'exploitation de la terre a commencé à se développer d'une manière organisée depuis 1999. Aujourd'hui, environ 1400 agriculteurs biologiques exploitant une superficie de 260000 ha sont recensés. Cette superficie n'était que 300 ha en 1997 (DGPA, 2007) (figure 3).



**Figure 3.** Evolution du nombre de producteurs et des superficies (en ha) conduites en agriculture biologique en Tunisie (DGPA, 2007).

Le secteur de l'olivier occupe la première place avec 37 % des superficies cultivées en biologique. Le reste étant réparti sur plusieurs activités agricoles (figure 4).



(PMA : Plantes médicinales et aromatiques ; Divers : Cultures annuelles et maraîchères, Cactus, Fourrages...)

**Figure 4.** Superficies des différentes cultures conduites en agriculture biologique (en ha) (DGPA, 2007).

En Tunisie, le secteur de l'agriculture biologique bénéficie d'un fort encadrement juridique institutionnel et financier. En effet, et malgré son histoire relativement récente, ce secteur bénéficie, à titre d'exemple, depuis 1999 d'un cadre juridique. Ainsi, la Chambre des Députés a adopté le 5 avril 1999, la loi n°99-30 relative à l'agriculture biologique. Elle a été promulguée au Journal Officiel du 9 avril 1999. Outre les dispositions générales qui concernent l'agriculture biologique, le texte de loi fixe les règles de production, de préparation et de commercialisation des produits biologiques, le système de contrôle et de certification, la commission nationale de l'agriculture biologique. Depuis, plusieurs textes d'application (décret relatif au contrôle et à la certification, des cahiers des charges relatifs à la production végétale, animale et transformation) ont été promulgués.

Pour renforcer ce cadre juridique et favoriser le développement de ce secteur, le code d'incitations aux investissements a été amendé pour offrir des encouragements spécifiques aux investisseurs dans l'agriculture biologique. Il s'agit essentiellement d'une subvention couvrant 30 % de la valeur des équipements nécessaires au développement de ce mode de production et d'une prime annuelle pendant cinq ans, couvrant jusqu'à 70 % des frais de contrôle et de certification. Le décret n°99-22027 du 13 septembre 1999 fixe les modalités d'octroi de ces primes d'incitations.

Les producteurs tunisiens devraient saisir cette occasion pour initier et développer l'agriculture biologique permettant ainsi d'offrir à une clientèle, tunisienne ou étrangère prête à payer plus cher, une production de qualité.

Pour cela, la Tunisie devrait diversifier ses produits d'exportation en cultivant par exemple les céréales biologiques, puisque actuellement les marchés internationaux en sont déficitaires.

#### **4- Les céréales biologiques**

L'intensification de la culture et l'adoption de cultivars à haut rendement ont entraîné le déclin de l'utilisation des variétés céréalières qui sont adaptées aux conditions culturelles du semi-aride et caractérisées par une utilisation limitée d'intrants. Cependant, la substitution des variétés céréalières locales se solde par une érosion de la diversité des plantes cultivées et par une uniformisation génétique croissante.

En effet, la biodiversité céréalière est la première source de variations utiles et exploitables en amélioration génétique. En outre, elle représente une composante majeure de l'agriculture biologique et plus précisément de l'agriculture durable (Ellis, 2000).

Pour cela, plusieurs programmes de recherche s'intéressent aux ressources phylogénétiques céréalières et leur résistance aux maladies et adaptation aux différents milieux. Ces programmes s'attachent principalement à évaluer, sauvegarder et valoriser les variétés des céréales cultivées autrefois dans notre pays.

L'objectif principal est de chercher, parmi les vestiges de l'ancienne diversité céréalière, des variétés présentant une bonne résistance aux maladies, au stress hydrique et une bonne adaptation, qui puissent servir par exemple, de géniteurs dans des travaux d'amélioration des céréales biologiques.

Les connaissances acquises sur les variétés des céréales traditionnelles montrent que leur polymorphisme peut être considérable et que celui-ci peut avoir une grande importance adaptative face à la diversité climatique entre les régions.

La conservation des ressources phylogénétiques et plus précisément des anciennes variétés cultivées et certains de leurs parents sauvages, demeure l'un des premiers intérêts de la conversion en céréales biologiques. En effet, les réserves de variabilité génétique, que constituent ces variétés, sont maintenant menacées par l'intensification agricole. Une bonne

gestion de ces ressources naturelles est indispensable sans perturber la balance écologique (Rölling & Jiggins, 1998). En effet, le respect de l'environnement doit figurer lors de la résolution des problèmes d'ordre technique en conduisant les variétés des céréales biologiques. Il s'agit donc d'un raisonnement mettant en jeu l'ensemble du fonctionnement sol, plante et environnement.

En cas d'intervention, le céréaliculteur biologique doit réagir d'une manière constructive et durable avec les systèmes et les cycles naturels, c'est-à-dire favoriser des interactions positives entre les systèmes naturels pour assurer un équilibre biologique sain.

Généralement, l'agriculteur biologique cherche dans une variété un compromis entre l'adaptation locale, la productivité, la rusticité et la qualité. Ces critères sont vraisemblablement présents dans les anciennes variétés. D'autre part, l'agriculture biologique favorise le choix de ces variétés puisqu'elles présentent l'un des moyens le plus important pour lutter préventivement contre les maladies et les ravageurs. En effet, la non-utilisation de substances agrochimiques implique que la variété doit être naturellement mieux adaptée aux conditions locales. Les systèmes biologiques favorisent ainsi le développement de variétés de cultures, ainsi que la préservation des variétés adaptées et espèces locales qui existent depuis longtemps (Stolton & Geier, 2002).

Actuellement, on trouve des petits agriculteurs surtout dans les zones marginales (environnement aride ou semi-aride, régions montagneuses) qui cultivent encore les variétés locales et utilisent des techniques de production presque biologique avec une utilisation limitée d'intrants (Spampinato, 2000 ; Leibl, 2000). Dans ces conditions, le choix de conversion à l'agriculture biologique apparaît comme relativement attractif et assez facile, car l'influence du système de production traditionnel, à faibles consommations intermédiaires chimiques, sur l'environnement naturel est assez limité (Beopoulos, 1997). En effet, ces agriculteurs maîtrisent les techniques agronomiques qui utilisent des quantités très réduites d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires et peuvent, du fait de la conversion à l'agriculture biologique, vendre leur production parfois 50 % plus cher. Latouche *et al.* (1998) ont montré par ailleurs, qu'une relation directe s'établit entre qualité des produits, signes de reconnaissance, et prix élevés. L'avantage économique, du moins à court terme, des céréales biologiques réside dans un prix plus élevé à la récolte. Dans ce cas, l'agriculture biologique est en mesure d'offrir une option d'exploitation agricole importante dans plusieurs des catégories de zones identifiées. En effet, et dans le

contexte des exploitations céréalières, les changements induits par la conversion à l'agriculture biologique (augmentation du travail, nouveaux investissements, etc.) aboutissent à des revenus équivalents ou supérieurs pour les agrobiologistes (Gautronneau *et al.*, 1997). Au Danemark, des comparaisons entre exploitations céréalières en production conventionnelle et d'autres en production biologique montrent que ces dernières donnent des rendements légèrement supérieurs (+ 4 %) (SJFI, 1998). En effet, le développement et la valorisation de ces productions constituent une alternative tant sous l'angle de la diversification de produits que de la recherche de qualités spécifiques (Gautronneau, 1997). Dans ce cas, les céréales biologiques peuvent être aussi destinées à l'exportation puisque la demande internationale est accrue. C'est une autre voie prometteuse de diversification pour les exploitants.

En conclusion, une des priorités d'agriculture biologique et précisément la céréaliculture biologique est la préservation et la sauvegarde des ressources phytogénétiques disponibles localement impliquant de maintenir les équilibres écologiques et d'exploiter au mieux les processus biologiques. En même temps, la productivité du système céréalier doit être stable et régulière. Ainsi, associée à des stratégies de sauvegarde de la biodiversité, la céréaliculture biologique peut jouer un rôle majeur dans l'accroissement durable de cette diversité. Elle pourrait même devenir un outil régional de protection et d'embellissement du paysage, contribuant à la préservation des écosystèmes agricoles, ainsi qu'à la conservation, à la mise en valeur et à la gestion du paysage (Folke *et al.*, 1998 ; Mansvelt & Lubbe, 1999 ; IFOAM, 2001) En effet, les objectifs écologique, économique et social ne peuvent être séparés.

## **5- Le blé biologique**

La croissance exponentielle des ventes de produits céréaliers biologiques conduit les transformateurs à s'intéresser fortement au marché des céréales, et plus précisément au blé, destiné à l'alimentation humaine, qui, représente aujourd'hui 2 % en valeur de ventes totales de céréales en Europe (Hamm *et al.*, 2002).

En Europe, les rendements du blé biologique sont, en moyenne, de 20 à 40 % inférieurs à ceux obtenus en agriculture conventionnelle (Offerman & Nieberg, 2000). Ceci peut être expliqué par de nombreux facteurs limitants et difficilement maîtrisables (pression des maladies, déficit en azote, concurrence des adventices ...) (Taylor *et al.*, 2001). Brangeon & Chitrit (1999) rapportent aussi lors d'un essai comparatif des marges brutes du blé français, un net avantage au

profit du blé biologique. En effet, selon les mêmes auteurs, cet avantage réside d'abord au niveau du produit brut généré par le différentiel de prix de vente en faveur du blé biologique en dépit des rendements plus faibles de 50 à 60 % de ceux du blé conventionnel. Ceci est expliqué par le niveau inférieur des charges de la culture du blé biologique par rapport à celle du blé conventionnel. Cette différence serait attribuée en partie à une réduction des charges relatives aux produits des traitements.

Une gamme importante de consommateurs préfèrent acheter les produits du blé biologique malgré leur faible teneur en protéines et gluten due à de forts déficits azotés au printemps (Woëse *et al.*, 1997). En effet, les farines biologiques présentent une tolérance réduite au pétrissage ainsi qu'un gonflement limité de la pâte (Feil & Stamp, 1993). Ceci serait éventuellement attribué à de fortes précipitations. En Tunisie, le blé cultivé dans les régions semi-arides pourrait avoir un avantage comparatif supérieur compte tenu des précipitations limitées et des pratiques communes prévalentes dans ces régions.

Traditionnellement, la production de blé biologique est un système pratiqué principalement au niveau des exploitations mixtes où les céréales se trouvent associées avec des cultures fourragères caractérisées par des rotations s'étalant entre 8 et 10 ans (Younie *et al.*, 1996).

En effet, le blé très souvent semé après retournement des légumineuses fourragères, valorise l'enrichissement du sol en azote lié aux matières organiques compostées ou non (Schmidt & Von Fragstein, 1999). En production de blé biologique, s'ajoutent les obstacles supplémentaires d'ordre technique et son développement se heurte en particulier à la difficulté d'obtenir une production régulière et de qualité technologique satisfaisante. Cette régularité et cette qualité sont tributaires de divers facteurs dont les deux principaux sont le contrôle des adventices et la nutrition azotée de la plante (David, 1996 ; Promayon & David, 1996).

Tamm (2000) et Mäder *et al.* (2002) soulignent que la production de blé biologique se caractérise par une forte fluctuation des rendements pouvant osciller même au sein d'une même région et représente une contrainte majeure au développement des produits biologiques. Woëse *et al.* (1997) ont montré que les anciens cultivars indigènes peuvent être compatibles avec le climat et le sol locaux, et résistants aux maladies et aux parasites. Par exemple, une variété non sélectionnée de blé cultivé dans une exploitation biologique renferme moins de protéines, tandis qu'une variété améliorée en contient davantage et fournit un blé de meilleure qualité à la cuisson

(Woëse *et al.*, 1997). De ce fait, le choix variétal du blé est un choix stratégique qui permet de réduire le coût de production puisqu'il influence le niveau de rendement de la culture, le comportement vis-à-vis des mauvaises herbes, des maladies et ravageurs ou encore de l'alimentation azotée (Viaux, 1999 ; Fontaine, 2004). La variété doit être adaptée au milieu pédo-climatique, ce qui nécessite de tenir compte des caractéristiques physiologiques de chaque variété (précocité, résistance au froid ou à la sécheresse, etc.). Mais, les variétés ont aussi des capacités de résistance aux maladies, à certains parasites ou à la verse, ainsi que des caractéristiques de qualité technologique. Le nombre de paramètres à prendre en compte pour choisir une variété est donc souvent très important (Viaux, 1999). La stabilité des performances de variétés de blé est devenue un critère de sélection très recherché par les sélectionneurs afin de déterminer leur comportement différentiel en conditions biologiques et dans des milieux différents.

## **6- La stabilité**

### **6-1- Introduction**

L'analyse du comportement des génotypes dans différents environnements est depuis longtemps un sujet de préoccupation important. Généralement, l'agronome cherche à adapter les techniques culturales aux variétés. Par ailleurs, le sélectionneur cherche à développer des cultivars avec adaptation spécifique ou adaptation large. Le rendement par exemple est variable d'un environnement à un autre pour un génotype donné. Cette variation est la résultante des interactions entre le génotype et l'environnement. Dans ce contexte les notions de stabilité de rendement ont été largement étudiées pour interpréter l'interaction génotype \* environnement (IGE). En effet, la stabilité est une notion plus large que la notion d'interaction : elle caractérise l'importance des fluctuations d'un caractère observé (par exemple le rendement), pour une même variété cultivée dans différents milieux ou à différentes conditions climatiques. Plus une variété est stable, moindre est sa variation phénotypique (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997). Dans le cas contraire, l'IGE pourrait empêcher la réponse à la sélection variétale et ainsi à son amélioration (Cooper & DeLacy, 1994). Cette interaction une fois identifiée, doit être soigneusement évaluée afin d'orienter le programme de sélection et identifier les cultivars adaptés aux différents environnements.

## 6-2- Les concepts de la stabilité

Selon Freeman (1973) une des principales raisons de la conduite des génotypes dans des environnements distincts est d'estimer leur stabilité. Les termes stabilité phénotypique, stabilité du rendement et adaptation sont souvent employés par les sélectionneurs. Différents concepts et définitions de stabilité ont été décrits au cours des années (Lin *et al.*, 1986 ; Becker & Léon, 1988).

Lin *et al.* (1986) ont identifié trois concepts de stabilité :

- Premier concept : Si la variation d'un génotype au sein d'un environnement est faible. Becker & Léon (1988) ont appelé cette stabilité le concept statique ou biologique de stabilité. Un génotype stable possède une performance constante sans être influencé par les variations des conditions culturales. Ce concept de stabilité est utile par exemple pour la résistance des maladies et aux stress et la teneur en protéines. Les paramètres utilisés et qui décrivent ce type de stabilité sont le coefficient de variation (CV<sub>i</sub>) utilisé par Francis et Kannenburg (1978) pour chaque génotype comme un paramètre de la stabilité et la variance génotypique à travers les environnements ( $S_i^2$ ).

- Deuxième concept : Si la réponse d'un génotype aux environnements est semblable à la réponse moyenne de tous les génotypes de l'essai. Becker & Léon (1988) ont appelé cette stabilité le concept dynamique ou agronomique de stabilité. Un génotype stable n'a aucune déviation de la réponse générale aux environnements et permet ainsi une réponse prévisible aux environnements. Le coefficient de régression ( $b_i$ ) (Finlay & Wilkinson, 1963) et la variance de la stabilité de Shukla (1972) ( $\sigma^2_i$ ) peuvent être utilisés pour mesurer ce type stabilité.

- Troisième concept : Si le carré moyen résiduel du modèle de régression en fonction de l'indice de l'environnement est faible. L'indice de l'environnement désigne le rendement moyen de tous les génotypes dans chaque site moins le rendement moyen de tous les génotypes dans tous les sites. Ce troisième type de stabilité est appelé aussi le concept dynamique ou agronomique qu'accorde Becker & Léon (1988). Les méthodes qui décrivent ce type de stabilité sont les méthodes d'Eberhart & Russell (1966) et Perkins & Jinks (1968). Becker & Léon (1988) ont rapporté que toutes les procédures de stabilité basées sur des effets de mesure de l'IGE appartiennent au concept dynamique. Ceci inclut les procédures de l'écovalence de Wricke

(1962) et les écovalences de Shukla (1972), les procédures utilisant l'approche de régression telle que proposée par Finlay & Wilkinson (1963), Eberhart & Russell (1966) et Perkins & Jinks (1968) et les analyses non paramétriques de stabilité.

Lin & Binns (1988) ont proposé un quatrième concept de stabilité qui se base sur la variation non génétique prévisible et imprévisible. La variation prévisible est en rapport avec le site de culture et la variation imprévisible est en rapport avec les années. Ils ont suggéré l'usage d'une approche de régression pour le premier cas et le carré moyen pour années x sites pour chaque génotype comme une mesure pour le deuxième cas.

### **6-3- Les méthodes statistiques de mesure de l'interaction génotype \* environnement**

La procédure d'analyse combinée de la variance est la méthode la plus commune employée pour identifier l'existence de l'IGE à partir des essais multilocaux. Si l'IGE trouvée est significative, plusieurs méthodes de mesure de stabilité de génotypes peuvent être utilisées pour identifier le ou les génotypes stables.

Plusieurs méthodes sont disponibles pour l'analyse de l'IGE. Elles sont classées en trois groupes: analyse de composantes de la variance, analyse de la stabilité et méthodes multivariées et qualitatives.

#### **6-3-1- Analyse de la variance**

L'information issue de l'expérimentation variétale est potentiellement riche. Des approches biométriques ont largement été développées dans le passé pour tenter de synthétiser cette information en dissociant les effets du génotype, du milieu et de l'interaction génotype \* milieu à travers des modèles statistiques (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997).

Ces outils sont tous fondés sur une décomposition statistique des performances des génotypes dans différents environnements, du type modèle d'analyse de variance à deux facteurs avec interaction, ce qui peut s'exprimer par :

$$E[Y_{ge}] = \mu + \alpha_g + \beta_e + \alpha\beta_{ge} \quad [1]$$

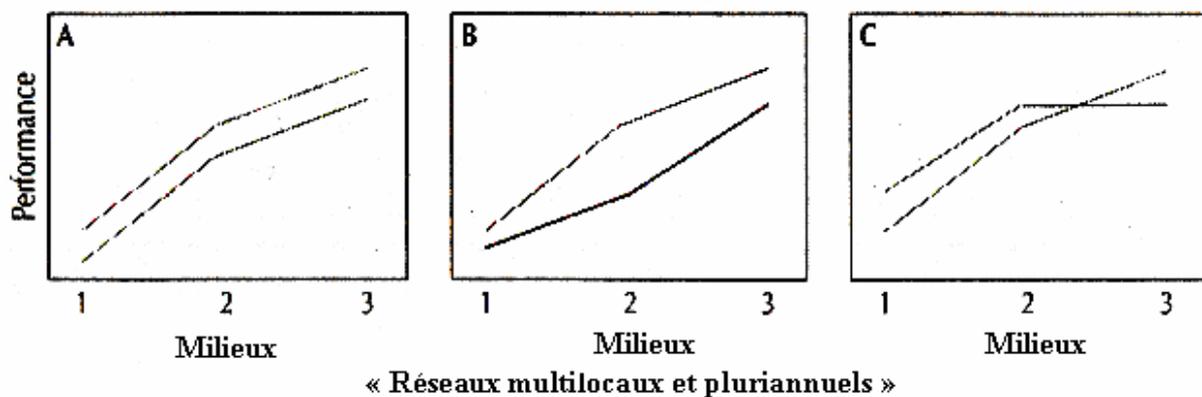
où  $E[Y_{ge}]$  représente l'espérance de la performance du génotype  $g$  dans l'environnement  $e$  ;  $\mu$  représente la moyenne générale des performances estimée sur l'ensemble des environnements ;

$\alpha_g$  : l'effet principal du génotype ;  $\beta_e$  : l'effet principal de l'environnement et  $\alpha\beta_{ge}$  : l'interaction entre le génotype et l'environnement (IGE).

On distingue trois types d'IGE (Baril, 1992; Foucteau, 2001), illustrés sur la figure 5 :

- Absence d'interaction : réponse similaire de tout les génotypes quelque soit l'environnement,
- Interaction sans changement de classement : réponse plus nuancée de quelques génotypes adaptés aux conditions favorables que ceux adaptés aux conditions défavorables,
- Interaction avec changement de classement : réponse avec une amplitude de variation significative des différents génotypes par rapport aux environnements

Les effets principaux du génotype (G) et de l'environnement E représentent les effets moyens du génotype et du milieu considéré par rapport à la moyenne générale, alors que le terme d'interaction du modèle représente la variabilité des performances du génotype avec le milieu qui n'est pas prise en compte dans l'effet principal G.



**Figure 5.** Représentation schématique des réponses observées sur des réseaux multilocaux pour deux génotypes : a) courbe de réponse sans interaction (les courbes sont parallèles) : IGE $\rightarrow$ 0, b) interactions quantitatives : IGE significative sans changement de classement d'un environnement à l'autre et c) interactions qualitatives : IGE significative avec changement de classement d'un environnement à l'autre, d'après Brancourt-Hulmel (2000).

Le modèle d'analyse de variance permet d'identifier l'interaction, mais il ne permet pas de quantifier, pour chaque génotype, son influence dans les variations des performances, ni d'isoler les facteurs à l'origine de ces variations. Différentes méthodes, fondées sur des analyses de

variance dérivées de la régression, tentent de modéliser plus précisément l'interaction. Elles permettent de décrire le comportement individuel d'un génotype sur un ensemble d'environnements. L'interaction génotype \* environnement est alors appréhendée à travers des statistiques descriptives (coefficient de régression, variance) et/ou des modèles de régression.

### ***6-3-2- Analyse de la stabilité ou approche paramétrique***

L'analyse de stabilité donne une idée sur la nature de réponses des génotypes aux changements environnementaux. Pour décomposer les termes d'interaction, c'est-à-dire réduire la part d'incertitude liée à l'interaction génotype \* environnement, l'analyse de la régression a été développée à travers les environnements et les années. Il s'agit d'une régression à plusieurs variables pour exprimer la performance des génotypes comme une fonction linéaire d'un indice environnemental.

#### **6-3-2-1- Coefficient de régression ( $b_i$ ) et déviation de régression ( $S^2d_i$ )**

Selon Finlay & Wilkinson (1963), le rendement moyen des génotypes à travers tous les environnements de culture et les coefficients de régression sont les indicateurs importants de l'adaptation génotypique. Ils ont prouvé qu'un coefficient de régression avoisinant la valeur de l'unité indique une adaptation large, et lorsqu'on l'associe avec un rendement élevé, le génotype serait adapté ainsi aux conditions de culture favorables. Cependant, avec ce même coefficient, les génotypes ayant un rendement inférieur seraient adaptés aux conditions de culture marginales. En revanche, les valeurs de coefficient de régression supérieures à la valeur de 1 décrivent l'augmentation de la sensibilité des génotypes lorsque les conditions environnementales varient. Ainsi au-dessous de la stabilité moyenne, les génotypes montrent une grande résistance aux variations de l'environnement. En plus, le signe des coefficients de régression renseigne sur l'adaptation des génotypes, par comparaison au génotype « moyen ». Les génotypes bien adaptés auront des coefficients positifs, les génotypes mal adaptés auront des coefficients négatifs (Denis, 1980; Denis & Vincourt, 1982).

Cependant, les coefficients doivent également être associés et interprétés avec les rendements moyens des génotypes pour déterminer l'adaptabilité. En plus du coefficient de régression, Eberhart & Russell (1966) ont ajouté la déviation de la régression comme mesure de la stabilité. Ainsi, un génotype serait considéré comme étant stable lorsque la déviation se rapproche de 0.

### 6-3-2-2- Ecovalence de Wricke ( $W_1$ )

L'écovalence de Wricke (1962) est une méthode alternative qui est fréquemment employée pour déterminer la stabilité des génotypes basée sur des effets d'IGE. C'est une mesure de la stabilité relative du génotype (Becker, 1981; Becker & Léon, 1988). Il s'agit de la contribution du génotype  $g$  à la somme totale des carrés des écarts de l'interaction. La stabilité du génotype n'est plus jugée dans l'absolu, mais relativement à celle des autres génotypes testés avec lui. L'écovalence variétale ( $Wg^2$ ) est estimée par :

$$Wg^2 = \sum_{e=1}^E (Y_{ge} - Y_{g.} - Y_{.e} + Y_{..})^2$$

où  $Y_{ge}$  représente la performance du génotype  $g$  dans l'environnement  $e$  ;  $Y_{..}$  la performance moyenne de l'ensemble des génotypes sur l'ensemble des environnements ;  $Y_{.e}$  la performance moyenne observée sur l'environnement  $e$  et  $Y_{g.}$  la performance moyenne du génotype  $g$ .  $E$  représente le nombre total d'environnements considérés.

Les génotypes avec la plus basse écovalence contribuent moins à l'IGE et sont donc plus stables.

### 6-3-2-3- La méthode de Shukla de stabilité de la variance ( $W_2$ )

Pour discriminer la stabilité des génotypes selon la méthode de Shukla (1972), les paramètres de la stabilité de la variance doivent être étudiés à travers les environnements. Selon Lin & Binns (1988), la stabilité de la variance de Shukla est une mesure relative selon les génotypes utilisés dans l'essai et les résultats doivent être limités ainsi seulement aux génotypes de l'essai et ne devraient pas être généralisés. Un génotype est donc seulement considéré comme stable lorsqu'il réagit parallèlement à la réponse de tous les génotypes testés. Il s'agit de la contribution du génotype à la somme totale des carrés des écarts de l'interaction. La stabilité de la variance est une combinaison linéaire de l'écovalence (Wricke & Weber, 1980) ce qui explique le rang de  $W_1$  et  $W_2$  qui est presque équivalent.

#### 6-3-2-4- La supériorité variétale de Lin & Binns

L'indice de supériorité ( $P_i$ ) traduit la moyenne des déviations du rendement du génotype par rapport au meilleur rendement des autres génotypes. Les génotypes ayant un faible  $P_i$  sont considérés les plus stables.

Selon Lin & Binns (1988),  $P_i$  s'exprime par la formule suivante :

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - M_j)^2}{2n}$$

- $M_j$  est la réponse maximale de la localité numéro  $j$
- $n$  est le nombre de localités
- $X_{ij}$  = nombre de fois que le génotype  $i$  a eu le plus grand rendement dans la localité  $j$

Cette méthode est semblable à celle employée par Plaisted & Peterson (1959), sauf que, (a) les statistiques de stabilité sont basées sur la moyenne des effets génotypiques et les effets de l'IGE et (b) chaque génotype est comparé seulement à la réponse maximale à chaque environnement (Crossa, 1990).

#### 6-3-3-Interactions croisées et analyse non paramétrique

Crossa (1990), Gregorious & Namkoong (1986) ont rapporté que l'IGE devient très importante dans la production agricole, quand il y a des changements du rang du génotype à travers les environnements. Dans ce cas les interactions sont qualitatives ou croisées, (Peto, 1982 ; Gail & Simon, 1985). Avec une interaction qualitative, les différences des génotypes changent de direction dans les environnements, tandis qu'avec des interactions quantitatives, ces différences changent d'amplitudes et non de direction. Si des interactions qualitatives significatives se produisent, des sous-ensembles de génotypes devraient être recommandés seulement pour certains environnements, tandis qu'avec des interactions quantitatives les génotypes avec des moyennes supérieures peuvent être employés dans tous les environnements. Par conséquent, il est important de déterminer les interactions croisées (Baker, 1988).

Les principaux avantages des statistiques non paramétriques par rapport aux paramétriques sont l'homogénéité des variances et l'additivité (linéarité) des effets ne sont pas des conditions nécessaires (Hühn, 1996).

D'autres avantages peuvent être dégagés. L'analyse non paramétrique de stabilité est moins sensible aux erreurs que l'analyse paramétrique et l'addition ou la suppression d'un ou quelques observations ne sont pas susceptibles de causer une grande variation dans l'évaluation (Nassar & Hühn, 1987).

Ces différents concepts de stabilité montrent, pour un caractère complexe tel que le rendement, qu'ils sont des outils capables, dans une certaine mesure, d'identifier l'importance de l'IGE et de caractériser les différents environnements par les facteurs limitants du milieu qui affectent ce rendement. L'objectif est donc de quantifier non pas la réponse moyenne du génotype du blé dur biologique à une large gamme de conditions, mais la capacité du génotype à être plus performant que les autres dans un environnement donné, que l'on est capable de caractériser (par exemple un milieu à haut risque de stress hydrique pendant la montaison). On vise alors à caractériser l'adaptation spécifique du génotype (Gallais, 1992).

Nous avons auparavant mis en évidence l'importance de l'étude de la stabilité dans le choix des variétés qui doivent être utilisées en agriculture biologique. La qualité technologique et nutritionnelle constitue un autre paramètre non moins négligeable et doit être pris en considération dans le développement de ce mode de culture. En effet, l'amélioration de cette qualité du blé biologique, nécessite le développement de recherches dans le domaine de la sélection variétale (Lammers Van Bueren *et al.*, 2002).

## **7- La qualité**

Autrefois la qualité était uniquement appréciée par le goût et la qualité technologique (exemple variété de blé panifiable). Aujourd'hui, nous parlons d'assurance qualité, de traçabilité, de certification produit, de label. Cette évolution n'est pas uniquement une mode ou un nouvel outil de marketing pour les grands distributeurs. Il s'agit de répondre à une demande des consommateurs qui, à la suite d'événements dramatiques comme la vache folle ou les poulets aux dioxines, s'interrogent de plus en plus sur la qualité des produits qu'ils consomment. Pour cela, on assiste maintenant à une croissance de la demande d'aliments biologiques. Or, les attentes du public sont importantes, et la question du consommateur pourrait se résumer en ces termes : peut-on faire confiance aux produits biologiques, quelle(s) notion(s) de qualité recouvrent-ils, et quels sont les impacts réels de ce mode de culture sur l'environnement et la santé humaine ?

## **7-1- Définition**

D'après l'AFNOR (1991), la qualité d'un produit est son aptitude à satisfaire les besoins des utilisateurs. En effet, elle est le résultat de facteurs multiples et complexes. Elle peut être considérée comme une caractéristique complexe d'un aliment qui détermine son intérêt ou son acceptabilité pour le consommateur (Raiffaud, 2001).

La qualité biologique tient compte de la qualité générale en plus des spécifications particulières codifiées dans le cahier des charges (Guet, 1999).

Par ailleurs, nous n'avons jamais autant parlé de qualité des produits alimentaires que ces dernières années avec toutefois des perceptions variées de la qualité : pour les uns, elle correspond en premier lieu à la sécurité sanitaire. Pour les autres, c'est l'aspect gustatif et culinaire. Pour d'autres encore, c'est une régularité parfaite des caractéristiques du produit. Donc elle correspond en fait à la capacité d'un produit à répondre à l'attente précise du consommateur, attente pour laquelle il est disposé à payer un prix élevé (Raiffaud, 2001). L'agriculture biologique peut être considérée comme la première profession qui a tenté de concilier ces différents aspects (Guet, 1999).

Quant à la qualité des blés, elle dépend d'un grand nombre de facteurs, plus ou moins liés les uns aux autres tels que le choix des variétés cultivées, les conditions de développement des plantes (pratiques agricoles, conditions météorologiques, nature des sols,...), les modes de stockage etc. (Feillet, 2000). La notion de qualité est donc relative à l'utilisateur du produit ou du service concerné ; ainsi l'on peut distinguer une multiplicité de qualité, en fonction de l'utilisateur (Minnar, 1995).

## **7-2- La qualité nutritionnelle**

Elle concerne la qualité des produits en terme de nutrition et d'équilibre alimentaire (Raiffaud, 2001). La plupart des études comparatives (agriculture biologique par rapport à l'agriculture conventionnelle) portent sur la qualité nutritionnelle concernant les teneurs en matière sèche et sa composition en éléments minéraux, protéines, lipides, vitamines,... (Ducasse-Cournac & Leclerc, 2000).

### 7-2-1- La teneur en eau

Ce critère est important pour évaluer l'aptitude à la conservation des produits (Raiffaud, 2001). En effet, il a été constaté que certains produits issus de l'agriculture biologique se conservent mieux que ceux issus conventionnellement, probablement en raison d'une teneur en matière sèche (MS) plus élevée (Lairon *et al.*, 1984a). En fait, il est intéressant de disposer de produits ayant le plus fort taux de matière sèche puisque leur intérêt nutritionnel est dû aux composés présents dans la matière sèche. Plusieurs auteurs (Lairon *et al.*, 1982 ; Finesilver *et al.*, 1989 ; Smith, 1993) soulignent le fait que certains produits issus de l'agriculture biologique, comme les légumes-feuilles ont des teneurs en matière sèche généralement plus élevées. Par ailleurs, Smith (1993) montre que si l'on analyse sur une base de poids frais, dans 90 % des cas étudiés les aliments biologiques présentent des teneurs plus élevées que les produits conventionnels.

Le tableau 1 comprend des données comparatives des teneurs en matière sèche de quelques produits maraîchers.

**Tableau 1.** Comparaison des teneurs en matière sèche (MS) dans les légumes feuilles, légumes racines, bulbes et tubercules cultivés selon le mode biologique et conventionnel.

Légumes	Teneur en MS	Auteur
Salades	>	Vogtmann (1984)
Laitue	>	Lairon <i>et al.</i> (1982)
Choux	>	Vogtmann <i>et al.</i> (1993), Rembialkowska (2000)
Pomme de terre	>	Lairon <i>et al.</i> (1982), Termine <i>et al.</i> (1984), Dlouhy (1989), Vogtmann <i>et al.</i> (1993), Alföldi <i>et al.</i> (1996), Granstedt & Kjellenber (1997).
Carottes	>	Pither & Hall (1990), Hogstad <i>et al.</i> (1997)
Poireaux	>	Lairon <i>et al.</i> (1982)
Céleri racine	>	Leclerc <i>et al.</i> (1991)

> : Teneur en MS significativement supérieure dans les produits issus d'agriculture biologique.

Quant à la teneur en eau du blé, elle peut être définie comme étant la quantité d'eau éliminée après maintien du produit dans une atmosphère où la pression de vapeur est égale à zéro pendant un temps suffisant pour atteindre un équilibre en poids (Feillet, 2000).

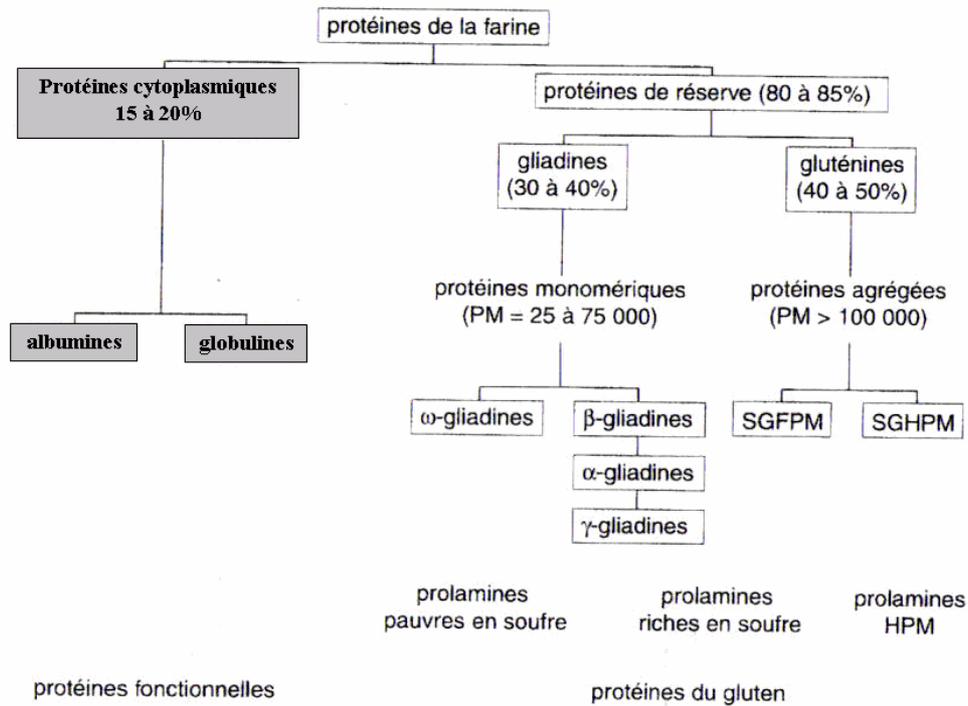
La mesure de la teneur en eau des céréales est une opération capitale ayant trois intérêts principaux : le premier, technologique, correspond à la détermination des opérations de récolte, de séchage ou de stockage. Le deuxième, analytique, rapporte les résultats des analyses de toute nature à base fixe et le dernier intérêt est réglementaire puisque les contrats commerciaux fixent des seuils de teneur en eau à partir desquels sont appliquées des bonifications et des réfections (ITCF & ONIC, 1995).

En plus de sa teneur en eau, un aliment constitue une somme de macro nutriments (lipides, protéines, glucides) et de micro nutriments (vitamines et éléments minéraux).

### ***7-2-2- Les macro nutriments***

#### ***7-2-2-1- La teneur en protéines***

Pour les céréales à pailles, la teneur en protéine est une caractéristique essentielle. C'est un critère important d'appréciation de la qualité. Elle représente un intérêt technologique et nutritionnel pour l'utilisation du blé (Gate, 1995). Les protéines de l'albumen des céréales sont classiquement réparties en quatre classes selon leur solubilité : les albumines, les globulines, les prolamines (nommées gliadines chez le blé) et les glutélines (Feillet, 2000). Les deux premières fractions sont formées par l'ensemble des enzymes et des structures protéiques nécessaires à la vie cellulaire. Les deux dernières fractions, principales constituant du gluten, forment les protéines de réserve et représentent 70 à 85 % des protéines d'un grain (Lasztity, 1984 ; AFSSA, 2003). La figure 6 montre les familles et les sous-unités des gliadines et des glutélines.



**Figure 6.** Composition des protéines de la farine de blé (Shewry *et al.*, 1986)

Les protéines forment de 8 à 18 % de la matière sèche du blé et c'est à leur déficience marquée en lysine que les protéines du blé doivent leur faible valeur nutritionnelle (Feillet, 2000).

En ce qui concerne les différences des teneurs en protéines entre le blé biologique et conventionnel Lockeretz *et al.* (1981) n'observent pas de différences significatives. Il en est de même pour le soja (The Rodale Institute, 2000). Cependant, Woëse *et al.* (1997) suggèrent une moindre teneur en protéines dans les pommes de terre biologiques que dans les pommes de terre conventionnelles. Ces différences seraient imputables à un moindre apport azoté dans le cas de la production biologique avec des conséquences comparables à celles observées pour les céréales (Millard, 1986 ; Hemingway, 1999).

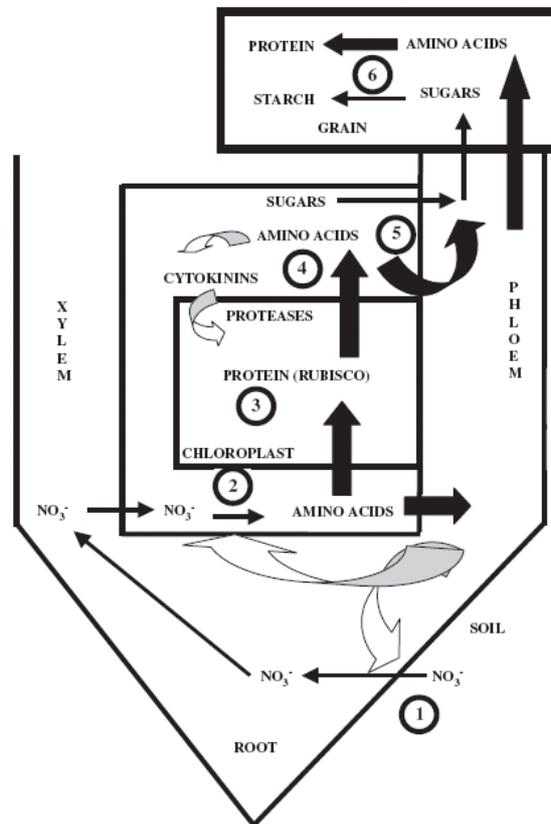
Pour les céréales, Woëse *et al.* (1997) s'accordent sur une réduction de concentrations en protéines pour l'agriculture biologique pouvant atteindre 3 à 4 points par rapport à celles observées dans les céréales issues de l'agriculture conventionnelle et ceci pour des variétés et des conditions climatiques comparables. La diminution de la quantité de protéines par masse de grain

provient d'une moindre remobilisation des protéines à partir des feuilles vers le grain qui constituent l'organe de stockage de l'azote chez le blé (figure 7). Ce résultat est aussi expliqué par une faible assimilation de l'azote minéral pendant la formation du grain en raison d'une faible disponibilité de cet élément dans les conditions biologiques (Gate, 1995).

Plusieurs groupes de recherches ont montré qu'une meilleure distribution de l'azote durant le cycle de blé entraîne une amélioration de la qualité des pâtes alimentaires (Gate 1995, Borghi *et al.*, 1997, Wuest & Gassman., 1992) et qu'un apport tardif d'azote tend à augmenter la teneur du grain en protéines du grain d'une façon plus accentuée qu'un apport précoce. Il est ainsi admis que la teneur en protéines dépend du stade de développement de la plante (Feillet, 2000). Chez l'orge biologique par exemple, la teneur en protéines dépasse significativement celle de l'orge conventionnelle avec des valeurs de 8.17 et 7.42 % de MS respectivement (Raiffaud, 2001). Finesilver *et al.* (1989) citent de nombreuses études montrant que les fortes applications d'azote pourraient faire augmenter la concentration des protéines brutes dans les végétaux mais également diminuer la valeur nutritionnelle de ces protéines (moins d'acides aminés indispensables « AAI »). Wang *et al.* (1998) arrivent à ces mêmes conclusions sur du riz montrant que le riz biologique a une concentration en azote significativement plus faible, par contre les acides aminés libres, l'acide glutamique, la glutamine et l'asparagine sont significativement plus concentrés dans le riz biologique.

Concernant les protéines du blé, elles ont une teneur élevée en acide glutamique. Les albumines et les globulines contiennent moins d'acide glutamique et de proline que les protéines du gluten mais leur teneur en lysine est beaucoup plus élevée alors que les gliadines et les gluténines contiennent une faible teneur en acides basiques (Feillet, 2000).

En effet, les albumines et les globulines sont les protéines les plus intéressantes sur le plan de la teneur en acides aminés indispensables, vu que les acides aminés essentiels sont ceux que l'organisme ne peut pas synthétiser parmi lesquels on cite la lysine, la méthionine, la valine, le tryptophane etc. (Raiffaud, 2001). L'enrichissement relatif en ces protéines dans les céréales issues de l'agriculture biologique se traduit par une augmentation de 25 à 30 % de la concentration en lysine de la fraction protéique du blé, de l'orge ou du maïs (AFSSA, 2003).

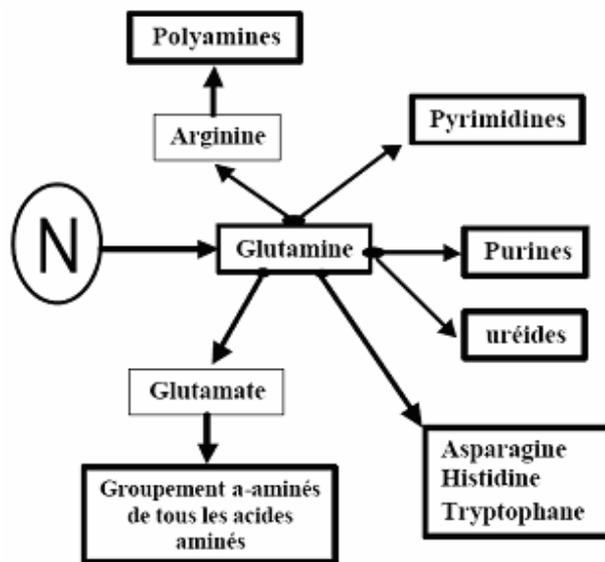


**Figure 7.** Régulation du métabolisme azoté du blé et son effet sur l'accumulation de protéines dans le grain. Les flèches linéaires indiquent les flux du sucre et de nitrate. Les flèches de bloc indiquent les flux d'acides aminés. Les flèches blanches de bloc indiquent les régulations possibles par la concentration en acides aminés. Les nombres en cercles indiquent le nombre de régulations possibles : (1) prise  $\text{NO}_3^-$ , (2) réduction  $\text{NO}_3^-$ , (3) synthèse des protéines, (4) hydrolyse des protéines, (5) exportation d'acides aminés vers le phloème et (6) synthèse des protéines dans le grain (Barneix, 2006).

D'une façon générale, les conditions agro-environnementales ne modifient pas l'expression qualitative (présence ou absence) des protéines de réserve. Chaque variété a un spectre protéique caractéristique, qu'elle soit produite en conditions conventionnelles ou biologiques. Cependant, pour une variété de blé donnée, la concentration en protéines des grains dépend principalement des conditions climatiques et de la nutrition azotée de la plante (Jeuffroy *et al.*, 2000). En agriculture biologique, ce dernier facteur, fréquemment limitant, couplé à l'utilisation de variétés

d'agriculture conventionnelle non adaptées au système de l'agriculture biologique, vient affecter négativement l'accumulation de protéines dans le grain.

D'autre part, Luo *et al.* (2000) et Gyory *et al.* (2002) montrent que la disponibilité en éléments nutritifs pour la plante (azote notamment) (figure 8) et les conditions climatiques (température, stress thermique, hydrique) peuvent également modifier les quantités respectives des différentes classes de protéines de réserve présentes dans le grain. D'autres études soulignent qu'une nutrition azotée limitante peut affecter la concentration de certains acides aminés indispensables (Wieser & Seilmeier, 1998 ; Metho *et al.* 1999 ; Brandt *et al.*, 2000).



**Figure 8.** Représentation schématique du devenir possible de l'azote chez les plantes. N : Azote sous ses formes d'absorption ou de transport ( $\text{NO}_3^-$  ou  $\text{NH}_4^+$ ) (Barbier, 2004).

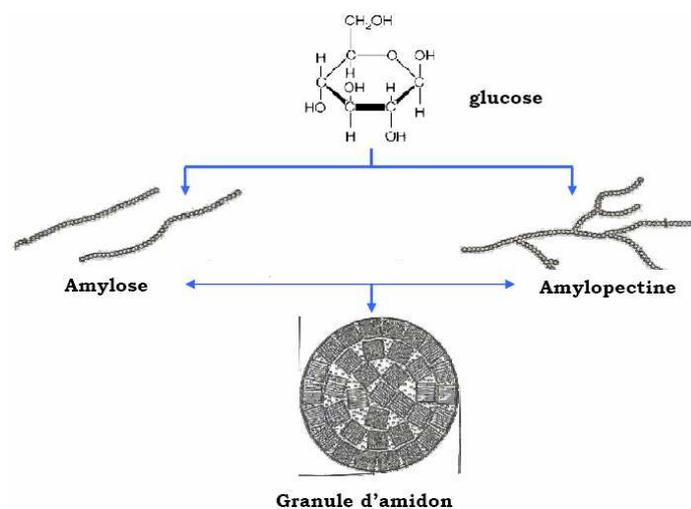
Enfin, nous pouvons dire que la teneur en protéines des céréales et précisément du blé issu de l'agriculteur biologique semble être plus faible que celle issue de l'agriculture conventionnelle. Cette moindre teneur est en relation, en grande partie, avec la diminution des apports azotés en production biologique.

### 7-2-2-2- La teneur en amidon

Il existe quelques études de l'influence du mode de culture (biologique ou conventionnel) des végétaux sur leurs teneurs en glucides et spécifiquement sur leurs teneurs en amidon dans le cas de céréales et de pomme de terre.

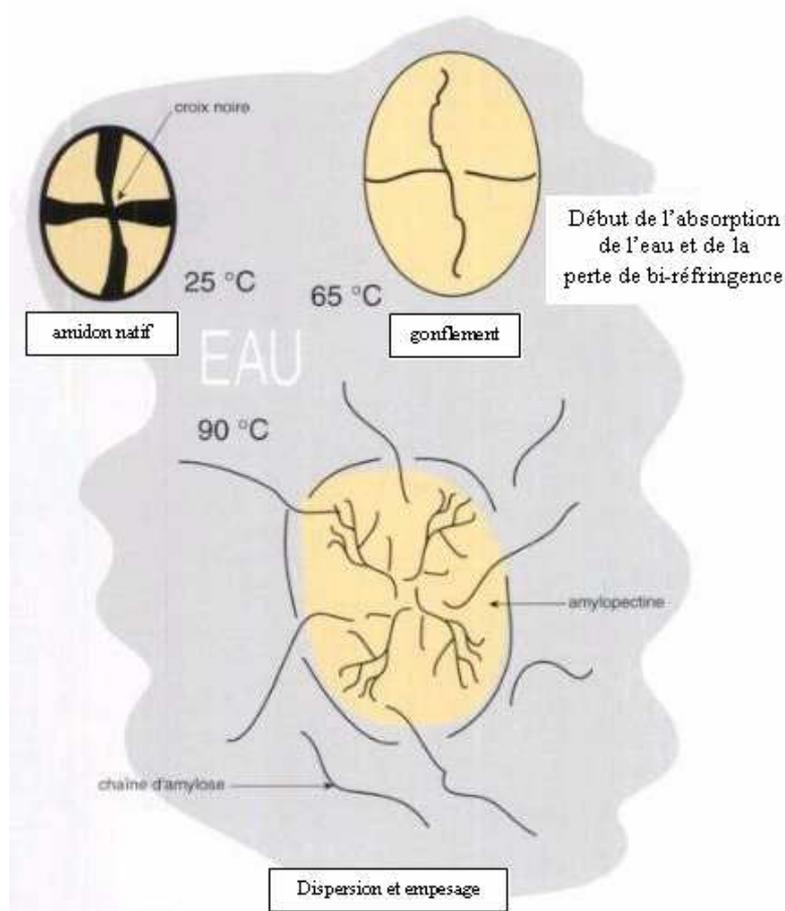
L'analyse de la teneur en amidon présente un intérêt nutritionnel vu que l'amidon est une source de glucides importante dans l'alimentation et un intérêt réglementaire dans le but de contrôler la pureté des amidons industriels (ITCF & ONIC, 1995). L'amidon constitue le glucide le plus consommé dans le monde. C'est grâce à leur richesse en amidon que les céréales sont une source d'énergie.

L'amidon est le principal polysaccharide de réserve des végétaux supérieurs (grains de céréales, tubercules de pomme de terre,...). Les farines de blé contiennent de 78 à 82 % de l'amidon. C'est l'un des polymères fonctionnels le plus important des aliments en raison de son pouvoir gélifiant, viscosant et fixateur d'eau. L'amidon de blé est constitué de granules de type A (plus gros et lenticulaires), de granules de type B (plus petits et sphériques) et 1 à 2 % d'impuretés (protéines, enzymes liées à la surface des granules et lipides). Les amidons de blé sont des entités semi-cristallines formées de deux molécules : l'amylose (homo polymère linéaire de 500 à 6000 unités D-glycosyl ) et l'amylopectine (homo polymère ayant une structure ramifiée branche de dizaines de milliers d'unités glucose sous forme de D-glucopyranose ) (figure 9).



**Figure 9.** Constitution d'une granule d'amidon (Chene, 2004).

L'amidon a un rôle important dans la panification puisqu'il assure la dilution du gluten, fixe l'eau et constitue une source de sucres fermentescibles (Feillet, 2000). Par son pouvoir fixateur d'eau, variable selon le degré d'endommagement des granules, et sa capacité à former des liaisons non-covalentes (liaisons hydrogènes) avec les protéines, l'amidon contribue de manière active à la formation de la pâte. D'autre part, il ressort de travaux d'Eliasson *et al.* (1995) que l'aptitude à la panification des amidons de blé serait d'autant meilleure que leur température de gélatinisation est élevée (figure 10).



**Figure 10.** Représentation schématique de la gélatinisation de l'amidon (Feillet, 2000).

D'autres données disponibles indiquent que l'amidon du blé dur gélatinise à une température légèrement inférieure que l'amidon du blé tendre (Lii & Leneback, 1977 ; Nelson, 1982 ; Lintas, 1988). En plus, le pourcentage d'amyllose est légèrement supérieur au niveau de l'amidon du blé

dur que l'amidon du blé tendre (Medcalf & Gilles, 1965 ; Soulaka & Morisson, 1985 ; Lintas, 1988).

Une étude de Varis *et al.* (1996) a montré que la teneur en amidon de la pomme de terre conduite en biologique est significativement supérieure par rapport à celle conduite conventionnellement, mais les études sont peu nombreuses et ces résultats doivent être confirmés (AFSSA, 2003) pour s'assurer de l'influence du mode de culture sur la teneur en amidon surtout dans le cas des céréales.

### 7-2-2-3- La teneur en lipides

Les principales matières grasses du blé, du germe et de la farine sont des acides gras, des glycérides simples et des lipides polaires (phospholipides et glycolipides) (tableau 2).

**Tableau 2.** Composition en lipides du blé (Feillet, 2000)

Fraction du grain	Lipides totaux (% MS)	% des lipides totaux			
		Lipides non polaires	Phospholipides	Glycolipides	Acides gras libres
Grain entier	1.5 – 3.5	44 – 80	6 – 40	8 – 21	-
Germe	10 – 30	80 – 85	14 – 17	0	1 – 2
Farine	1.4 - 2	50	20 - 25	24 - 28	5

L'albumen amylicé (les farines) contient la plus grande part des lipides polaires du grain (82 % des lipides du grain se retrouvent dans l'albumen, 15 % dans les sons et 3 % dans le germe). Quant à la farine, sa composition lipidique dépend des conditions de mouture et de leur taux de purification. Leur composition en acides gras est caractérisée par une proportion élevée d'acides insaturés soit environ 75 à 80 % et une teneur en acides gras saturés comprise entre 20 et 25 % (tableau 3).

**Tableau 3.** Composition en acides gras des lipides du blé, du germe et de l'albumen (% acides gras totaux) (Feillet, 2000)

<b>Acides gras</b>	<b>Grain entier</b>	<b>Germe</b>	<b>Albumen</b>
<b>Acides gras saturés :</b>			
Myristique	Traces	-	-
Palmitique	25	19	18
Stéarique	1	0.5	1
<b>Acides gras insaturés :</b>			
Palmitoléique	1	0.5	1
Oléique	12	17	20
Linoléique	55	57	56
Linoléinique	4	5	3
Autres et insaponifiables	2	1	1

Bien que leur teneur dans les farines ne dépasse pas 2 à 3 %, les lipides jouent un rôle important dans la panification. En effet, les lipides polaires (notamment les galactolipides) possèdent un fort pouvoir moussant et contribuent à la fabrication d'un pain bien développé. A l'inverse, les lipides non polaires, triglycérides et acides gras libres, ont des propriétés antifoisonnantes qui se répercutent de manière défavorable sur le volume du pain (Feillet, 2000). Les lipides des blés sont précocement synthétisés et leur teneur diminue au cours de la maturation (Feillet, 2000).

Les teneurs en acidité grasse est un indicateur de l'état de bonne conservation des blés, des farines et des semoules. En effet, au cours de la conservation, les lipides se dégradent en se transformant en acides gras libres (ITCF & ONIC, 1995).

Les acides gras polyinsaturés sont des nutriments essentiels surtout pour la croissance, leur stabilité est nécessaire sur le plan technologique au cours de la panification. D'autre part, le germe est un co-produit de la transformation des blés en farine. Il est possible d'en extraire de l'huile, dont l'intérêt réside dans sa teneur élevée en vitamine E et en octacosanol. En effet, elle est essentiellement destinée aux marchés de la santé et des cosmétiques.

Les études relatives à la teneur en lipides des aliments issus du mode de production biologique et conventionnelle traitent rarement des huiles. Raiffaud (2001) cite que pour l'orge il n'y a pas eu de différence significative entre la teneur en lipide pour les deux modes de culture. Pour le colza, la teneur en huile est dépendante de la variété mais aussi et de manière plus importante de la fertilisation azotée. Les systèmes de production avec des niveaux d'azote faibles permettent des

teneurs élevées en huile. Cette augmentation de la teneur en huile s'accompagne d'une diminution de la teneur en protéines des tourteaux (Viaux, 1999).

### **7-2-3- Teneur en micro nutriments**

#### 7-2-3-1- Teneur en minéraux et oligo-éléments

Le blé constitue une excellente source minérale (Demirbas, 2005). Le dosage des minéraux pour le blé a un intérêt essentiellement réglementaire, il permet la classification des farines et des semoules (ITCF & ONIC, 1995).

L'étude de Hemingway (1999) a montré qu'une diminution d'apports azotés entraîne une diminution des teneurs en phosphore et en potassium, par contre les apports de phosphore semblent ne pas influencer, même à long terme le contenu en phosphore et en calcium des graminées fourragères. Il a indiqué qu'il est très difficile de modifier la composition minérale de l'herbe par la fertilisation qu'elle soit organique ou non.

Les résultats publiés par Raiffaud (2001) montrent des différences pour certains éléments. Par exemple le blé biologique est particulièrement plus riche en zinc que le blé conventionnel. De même, et selon le même auteur, l'orge biologique présente une teneur en fer significativement plus importante que l'orge conventionnelle avec des valeurs de 2374 et 2199 µg/100g de MS respectivement.

Woëse *et al.* (1997) soulignent une absence de différences significatives des teneurs en minéraux et oligo-éléments entre les produits végétaux issus de l'agriculture conventionnelle ou biologique. Morel *et al.* (1984) confirment que les teneurs en P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe, Cu et Cr du grain entier du blé sont remarquablement constantes quel que soit le type de fertilisation.

D'autres études ont été réalisées sur l'orge et le blé biologique et ont rapporté les mêmes résultats. Toutefois l'orge issue de l'agriculture biologique est légèrement plus riche en Ca, Cu et Zn alors que le blé biologique présente une teneur en Cu légèrement plus riche mais plus pauvre en Zn (Alföldi *et al.*, 1996).

D'une façon générale, les teneurs en micro nutriments des plantes sont fortement liées à la composition du sol, aux conditions climatiques et aux apports externes (Raiffaud, 2001). Warman & Havard (1997, 1998), en analysant les teneurs en éléments minéraux de pommes de terre,

choux, carottes et maïs, trouvent des corrélations entre certains éléments minéraux contenus dans les parties analysées et les mêmes éléments extractibles des sols.

Ainsi, il ressort que les teneurs en minéraux et oligo-éléments des aliments issus de l'agriculture biologique se rapprochent de ceux issus de l'agriculture conventionnelle.

#### 7-2-3-2- Teneur en vitamines

Selon Bourgeois (2003), les vitamines sont des substances organiques, sans valeur énergétique propre, qui sont nécessaires à l'organisme et que l'homme ne peut synthétiser en quantité suffisante. Elles doivent donc être fournies par l'alimentation.

Il existe peu de données sur l'influence du mode de culture sur les teneurs en vitamines des produits en découlant. Les résultats les plus importants concernent surtout la teneur en vitamine C (acide ascorbique) qui a un effet positif au mode de production biologique par rapport au mode conventionnel surtout chez la pomme de terre (Fischer & Richter, 1986 ; Abele, 1987 ; Dlouhy, 1989 ; Kolbe *et al.*, 1995), le chou (Rembalkowska, 2000), la tomate (Pither & Hall, 1990) et le céleri (Leclerc *et al.*, 1991).

Pour les céréales, Potier de Courcy *et al.* (1999) et Martin (2001) mentionnent de faibles différences en vitamines B1 (thiamine) et B2 (riboflavine) en faveur des produits issus de l'agriculture biologique.

Le tableau 4 illustre les teneurs en vitamines B1, B2, B6 (pyridoxine) et E (tocophérol) chez l'orge biologique et conventionnel

**Tableau 4.** Comparaison entre les teneurs en vitamines de l'orge biologique et conventionnelle (en µg/100g de MS) (Raiffaud, 2001)

Vitamines	Orge biologique	Orge conventionnelle
B1	360*	340
B2	240**	160
B6	350	350
E	1950	2160*

\* : différence significative ; \*\* : différence très significative

Il est à signaler que le blutage du blé, séparation du son de l'albumen, provoque la perte de la vitamine B1, située essentiellement dans les enveloppes des céréales, quel que soit le mode de

culture. Les teneurs en vitamines du grain entier du blé indiquées dans le tableau 5, mettent bien en évidence les effets délétères du blutage.

**Tableau 5.** Composition vitaminique moyenne du grain entier du blé (en mg/100g de MS) (Favier *et al.*, 1995)

<b>Vitamine</b>	<b>Blé entier</b>	<b>Farine</b>	<b>Germe</b>
Vitamine E	2.5	0.3	21
Vitamine B1	0.41	0.1	2
Vitamine B2	0.11	0.05	0.6
Vitamine B3 ou PP (acide nicotinique)	4.7	0.6	5.7
Vitamine B5 (acide pantothénique)	0.85	0.3	1.8
Vitamine B6	0.38	0.2	2.2
Vitamine B9 (acide folique)	50	24	350

Parmi les facteurs de variation de la teneur en vitamines, on cite la grande variabilité génétique et la grande diversité des modes de culture. Le climat aussi n'est pas étrange aux grandes variations vitaminiques. D'autres facteurs interviennent d'une façon significative tel que le degré de maturation des fruits et des légumes. On observe également des variations importantes à l'intérieur d'un même fruit ou d'un même organe. C'est ainsi que les vitamines B1 et B2 sont réparties inégalement à l'intérieur du grain de blé.

En amélioration des céréales, les sélectionneurs cherchent à améliorer, outre le rendement et la qualité nutritionnelle, la qualité technologique de nombreux produits céréaliers.

### **7-3- La qualité culinaire**

La qualité culinaire correspond à l'aptitude d'un blé dur à être transformé en pâtes. Ce critère de qualité culinaire est complexe et recouvre plusieurs facteurs dont la texture des produits cuits qui tient compte de la fermeté et de la masticabilité des pâtes après cuisson et qui peut être déterminée par des caractéristiques rhéologiques (fermeté, ténacité et viscoélasticité).

Les études de Martin (1994) ont montré la relation qui existe entre la teneur en protéines d'une variété et certaines de ses caractéristiques technologiques (force boulangère et test de sédimentation). En effet, les propriétés rhéologiques des pâtes alimentaires sont principalement dépendantes de la teneur en protéines et de la viscosité du gluten. Plus celles-ci sont élevées plus les pâtes sont fermes (Feillet *et al.*, 1989). Les gluténines, qui constituent environ 40 % des

protéines totales du grain de blé, influencent largement la qualité de l'extrusion des pâtes alimentaires ainsi que les propriétés rhéologiques des pâtes boulangères (Finnois *et al.*, 1987).

En blé dur, il existe un exemple de marqueurs de qualités technologiques. Il s'agit de la présence du marqueur LMW2 ou LMW1, identifié au moyen d'une électrophorèse des protéines.

La présence du marqueur LMW2 est un gage de qualité pour l'industrie des pâtes. La présence des marqueurs LMW1 au contraire indique un risque, la variété porteuse de ce marqueur risque de ne pas être adaptée au procédé de fabrication des pâtes. Un test réel visant à fabriquer des pâtes est alors indispensable pour lever le doute.

Triboï & Triboï (2002) ont montré que la faible teneur des farines des blés biologiques en gluten peut avoir comme conséquence des propriétés rhéologiques plus faibles.

#### **7-4- La qualité hygiénique**

Aussi bien dans l'aliment conventionnel que dans l'aliment issu de l'agriculture biologique, il y a un certain nombre de dangers. En ce qui concerne l'agriculture biologique, l'interdiction de l'emploi des produits chimiques de synthèse peut être à l'origine d'une meilleure qualité pour le consommateur.

La qualité hygiénique des produits biologiques attendue par les consommateurs correspond donc à l'absence de résidus pesticides et de produits toxiques d'origine biologique (Guet, 1992).

##### **7-4-1- Résidus de pesticides**

Sur le plan toxicologique, on peut estimer que les risques de non-conformité des produits biologiques à la réglementation sont minimes du fait des contraintes de production en agriculture biologique et des restrictions imposées par les cahiers des charges.

Une étude du syndicat européen des transformateurs et distributeurs de produits issus de l'agriculture biologique menée de 1993 à 1997 (SETRAB, 2000) montre que 6 % des produits biologiques analysés se trouvent au-dessus du huitième de la limite maximale des résidus autorisés. Ce seuil correspondrait à des contaminations environnementales involontaires ou non maîtrisées (air, eau, voisins, transports,...). Bourn & Prescott (2002) rapportent qu'aucun résidu de pesticides n'a été détecté dans les carottes, laitues, tomates et fraises issues de l'agriculture

biologique. De même Maruejols & Vidal (1999) montrent que les laitues biologiques sont exemptes de résidus de pesticides.

Brangeon & Chitrit (1999) notent que pas plus de 10 % des produits biologiques commercialisés pourraient contenir des résidus de pesticides, fongicides et autres produits interdits en agrobiologie à des doses inférieures au seuil de détection officiel (2 mg/tonne). Également, Woëse *et al.* (1997) soulignent qu'en regard des pesticides autorisés en agriculture conventionnelle, les niveaux de résidus dans tous les fruits et légumes biologiques sont plus faibles. D'autre part, Baker *et al.* (2002) citent qu'aucun résidu n'a été détecté dans des aliments biologiques traités par des pesticides d'origine naturelle. En effet, ces derniers ont la réputation de se dégrader rapidement et, en conséquence, de ne pas laisser de résidus sur les denrées alimentaires.

En conclusion, les différentes études montrent clairement que les produits issus de l'agriculture biologique contiennent moins de résidus de pesticides que les produits conventionnels.

Cependant, les produits biologiques ne sont pas à l'abri de contaminations accidentelles dues notamment à l'importance de la volatilisation des pesticides épandus parfois à proximité des zones de production biologique (Brangeon & Chitrit, 1999), à la persistance dans les sols de certains produits très rémanents ou à la contamination par l'atmosphère ou par l'eau (Raiffaud, 2001), par exemple en France la concentration des pesticides dans les eaux de pluies peut atteindre 1 à 20 g/l (Solona, 1999).

Enfin, on peut affirmer qu'il y a moins de résidus sur les produits biologiques et que la contamination des systèmes agrobiologiques est bien moindre.

#### ***7-4-2- Résidus en métaux lourds***

La contamination de la chaîne alimentaire par les métaux lourds est liée à la pollution des sols. Les végétaux représentent la principale source d'exposition du consommateur aux micropolluants du sol. Les transferts sol/végétaux dépendent de nombreux paramètres liés au sol (pH, matière organique, teneur en argile,...) et au végétal (certaines espèces sont plus accumulatrices telles que le tabac pour le cadmium).

Alföldi *et al.* (2001) et Woëse *et al.* (1997) ont publié des études visant à comparer le niveau de contamination en métaux lourds de produits végétaux issus de l'agriculture biologique et conventionnelle. Ils soulignent qu'il n'y a pas eu de différences significatives entre les deux

modes de productions. Cependant Malmauret *et al.* (2002) ont trouvé des teneurs significativement supérieures en plomb dans les carottes biologiques et en cadmium dans les épinards biologiques par rapport aux produits conventionnels.

La possibilité de contamination des denrées alimentaires par des métaux lourds, d'origine industrielle, ne peut être écartée et concerne aussi bien les productions biologiques que conventionnelles si elles se trouvent à proximité de la source de pollution.

Quelque soit le mode de production, l'exposition aux métaux lourds reste inférieure aux valeurs toxicologiques de référence.

#### ***7-4-3- La teneur en nitrates***

Les aliments sont une source importante de nitrates dans notre alimentation. Ils posent des problèmes en matière de sécurité alimentaire à cause de leur transformation en nitrites soit au niveau des aliments soit dans le tube digestif. Ces nitrites présentent des risques graves tels que la synthèse possible des nitrosamines cancérigènes ou le risque de méthémoglobine (liaison de NO<sub>2</sub> à l'hémoglobine au lieu de l'oxygène).

Les nitrates font intégralement partie du cycle de l'azote. Le risque de leur accumulation apparaît dès que la plante ne peut plus les transformer après absorption, ce qui apparaît fréquemment dans le cas des cultures sous serre, en hiver ou lorsque la minéralisation de l'azote dans le sol est élevée suite par exemple à un apport d'engrais organique à dégradation rapide (Ducasse-Cournac & Leclerc, 2000).

Ainsi, l'accumulation des nitrates dépend essentiellement de l'ensoleillement (facteur principal pour la photosynthèse), la température (plus elle est élevée plus la minéralisation de la matière organique est importante, il en est de même pour l'absorption des éléments nutritifs par les racines et le métabolisme de la plante), la pluviométrie et l'irrigation (qui lessivent les nitrates présents dans le sol superficiel) et essentiellement du régime de fertilisation azotée (AFSSA, 2003).

Plusieurs études comparatives des teneurs en nitrates de plusieurs végétaux selon leur mode de culture ont été réalisées. Woëse *et al.* (1997) font également ressortir de la littérature des taux de nitrates notablement supérieurs dans le cas des légumes conventionnels. Ainsi, Lairon *et al.* (1984a) ont montré que pour les épinards, la fertilisation minérale est responsable de teneurs en

nitrate supérieure comparée à la fertilisation organique avec des composts et des fumiers. Les mêmes résultats ont été obtenus pour la salade, les poireaux, les choux, les navets et les pommes de terre (tableau 6).

**Tableau 6.** Teneur en nitrates de divers légumes issus d'exploitations en agriculture biologique ou conventionnelle, d'après Lairon *et al.* (1982).

Espèce	Teneur en nitrate (ppm/MF)	
	Mode de production biologique	Mode de production conventionnelle
Pommes de terre	191	265*
Poireaux	432	899*
Choux verts	2429	2440
Navets	293	1959*
Salades (romaines)	958	1635*

\* : Teneur significativement supérieure ( $p < 0.05$ ).

Cependant, l'utilisation mal maîtrisée de quantités trop importantes d'engrais organiques à minéralisation rapide peut conduire même en mode biologique à de fortes accumulations de nitrates dans les cultures sensibles. C'est ce qui a été montré par Leclerc (1989) en vérifiant que plus la teneur en azote des engrais organiques est élevée (5.7 à 11.4 %) plus la vitesse de minéralisation est importante ce qui n'est pas observée avec les amendements organiques aux teneurs plus faibles en azote. Ainsi de bonnes pratiques de fertilisation en agriculture biologique sont susceptibles de réduire substantiellement les teneurs en nitrates. Le tableau 7 récapitule l'ensemble des travaux qui ont comparé la teneur en nitrate des légumes biologiques et conventionnels.

**Tableau 7.** Récapitulatif des travaux sur la teneur en nitrate dans la comparaison entre les produits de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle.

Produit	Teneur en nitrate	Auteur
Carotte	<	Rauter & Wolkerstorfer (1982), Pommer & Lepschy (1985)
Endive	<	Rauter & Wolkerstorfer (1982)
Laitue	<	Rauter & Wolkerstorfer (1982), Temperly <i>et al.</i> (1982), Vogtmann (1984)
Betterave rouge	<	Rauter & Wolkerstorfer (1982), Mader <i>et al.</i> (1993)
Radis	<	Rauter & Wolkerstorfer (1982)
Chou	=	Lairon <i>et al.</i> (1982)
Pomme de terre	<	Lairon <i>et al.</i> (1982), Fisher & Richter (1986)
Poireau	<	Lairon <i>et al.</i> (1982, 1984a), Lairon <i>et al.</i> (1985)
Navet	<	Lairon <i>et al.</i> (1982)
Salades romaines	<	Lairon <i>et al.</i> (1982, 1984a, 1984b)
Céleri	<	Leclerc <i>et al.</i> (1991)

< : Diminution significative dans les aliments issus de l'agriculture biologique ;  
 = : Absence de différence significative

Enfin, les teneurs en nitrates des produits issus de l'agriculture biologique sont en général inférieures à celles des produits issus de l'agriculture conventionnelle dans des conditions comparables de culture. Les risques d'accumulation de nitrates, après leur absorption par la plante, résident donc dans leur non-transformation. Ce point est à surveiller en agriculture biologique afin d'obtenir des produits pauvres en nitrates (Ducasse-Cournac & Leclerc, 2000).

#### **7-4-4- La teneur en mycotoxines**

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires secrétés par des moisissures appartenant principalement aux genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium* dont six familles jugées dangereuses en toxicologie alimentaire. Leur toxicité est liée à des propriétés particulières de ces contaminants naturels. En effet, une même moisissure peut produire différentes mycotoxines. Cette moisissure productrice peut disparaître de la denrée alimentaire, alors que les mycotoxines qui sont très stables, peuvent passer dans la chaîne alimentaire. Elles sont particulièrement thermostables et sont peu ou pas détruites lors de l'application de procédés tels que le grillage et la cuisson de la denrée ou de l'aliment (Raiffaud, 2001).

Dans le domaine des céréales, une quinzaine de mycotoxines peuvent être présentes en quantité significative. On distingue la flore du champ de la flore de stockage compte tenu de la différence entre les conditions de développement pour chaque type de flore.

La flore du champ est à base de *Fusarium*, de *Microdochium*, d'*Alteraria* et de *Cladosporium* qui se développent sur l'épi et le grain après floraison dans un contexte relativement humide. Les champignons du groupe *Fusarium roseum* produisent sur les céréales à paille des mycotoxines appelées fusariotoxine notamment de la Zearalénone et des Trichthécènes. Dans ce dernier groupe, on distingue ceux du type A (les plus toxiques) et ceux de type B dont la plus fréquente est le désoxynivalénol (DON). Ces mycotoxines peuvent se développer au champ sous l'influence du climat, du précédent cultural, du non-enfouissement des résidus de récolte, de l'utilisation de variétés sensibles aux champignons, des apports élevés d'azote etc. (Kuhn, 1999). Quant à la flore de stockage, elle est notamment constituée d'*Aspergillus* et de *Penicillium* dont le développement est limité aux faibles humidités. les *Aspergillus* sont susceptibles de produire des aflatoxines (B1, B2, G1, G2) voire de l'ochratoxine A (OTA) alors que les *Penicillium* sont susceptibles de produire l'OTA en cas de mauvaises conditions de stockage (humidité élevée des grains) (Leuillet *et al.*, 2002). Les facteurs qui influencent la formation des mycotoxines lors du stockage sont l'humidité du grain, la température trop élevée et le non-nettoyage des céréales.

La restriction des traitements fongicides en agriculture biologique est parfois associée à un risque accru de contamination des produits biologiques par les mycotoxines. Toutefois, le mode de production biologique privilégie des techniques défavorables à la contamination par les mycotoxines, comme la rotation des cultures, le précédent cultural, le travail du sol, les faibles apports azotés et la non-utilisation de régulateurs de croissance.

Une étude allemande menée sur des blés issus de l'agriculture biologique (Birzele *et al.*, 2000) a décelé la présence de DON dans tous les échantillons testés et d'OTA dans 14 % des échantillons. La concentration en DON augmentait lors du stockage.

L'enquête menée par l'ITCF en 2000 sur le niveau de contamination de différentes variétés de blé utilisées en agriculture biologique montre que DON est détectée sur la plupart des échantillons (75 %) et que la récolte 2000 était considérée comme l'une des plus fusariées même en agriculture conventionnelle.

Une autre étude française (Malmauret *et al.*, 2002) s'est intéressée à la recherche de trichothécènes, de zéaralénone et de fumonisines dans des échantillons de blé, d'orge et de maïs. Les résultats obtenus montrent que les céréales issues de l'agriculture biologique font l'objet de contaminations moins fréquentes que celles issues de l'agriculture conventionnelle. De même Kuhn (1999) montre que les teneurs en DON de blé biologique sont moins importantes (74 ppb) que celles trouvées en blé conventionnel (109 ppb).

Donc, les niveaux de contamination par les mycotoxines des produits biologiques sont variables que ce soit sur les matières premières ou sur les produits transformés. La limitation du nombre d'études comparatives sur la teneur en mycotoxines ne nous permet pas d'en tirer des conclusions nettes.

### **7-5- La qualité écologique**

La protection ou la préservation de l'environnement est un élément aujourd'hui indispensable à prendre en compte dans la dimension qualitative du produit. L'agriculture biologique obéit à un cahier des charges qui constitue une garantie de protection très efficace de l'environnement ce qui représente un critère de durabilité de ce mode de culture. Parmi les indicateurs de cette durabilité agrobiologique, la préservation des ressources abiotiques du sol, de l'eau et de l'air, demeure primordiale (Raiffaud, 2001).

En effet, l'agriculteur biologique cherche à raisonner ses pratiques en fonction des caractéristiques pédologiques et vivantes du sol et dans le but d'améliorer la qualité de l'eau. Ainsi, Leclerc (1995) indique que le respect du cahier des charges biologique conduit à une protection efficace sur le plan de la qualité de l'eau et ceci par l'interdiction de pesticides de synthèse et les non utilisations d'engrais azotés minéraux. Egalement, le non-épandage de pesticides chimiques évite d'augmenter la charge dans l'air de façon évidente. Dans ce cadre, Clark *et al.* (1998) ont montré que les systèmes d'agriculture biologique ont un impact sur l'environnement beaucoup moins nuisible attribué à une utilisation limitée de pesticides. Différentes méthodologies peuvent permettre d'étudier les systèmes agrobiologiques. L'étude comparative des deux modes de culture effectuée par CEMAGREF en 1999, a montré que l'impact du mode biologique est globalement positif particulièrement pour les systèmes polyculture-élevage. Toutefois, certains risques peuvent se présenter tels que la perte de fertilité biologique des sols en viticulture liée à l'accumulation de cuivre dans les sols et le risque de

pollutions ponctuelles par les nitrates dans le cas d'apports excédentaires de matière organique en maraîchage (tableau 8). Cette pollution peut être due également au fait que la minéralisation dépend des facteurs climatiques et de la nature de la matière organique.

**Tableau 8.** Résultats\* pour quelques indicateurs d'impact sur l'environnement de trois systèmes de production en agriculture biologique (AB) et en agriculture conventionnelle (AC) (Brangeon & Chitrit, 1999).

Indicateurs Systèmes /modes production	Protection phytosanitaire		Risque azote		Fertilité biologique du sol		Biodiversité	
	AB	AC	AB	AC	AB	AC	AB	AC
Viticulture	9.0	1.4	9.9	9.3	2.0	5.7	3.3	3.5
Polyculture-élevage	10.0	6.5	9.6	7.0	8.3	5.6	8.6	6.5
Maraîchage	9.5	4.9	9.3	6.7	8.3	3.2	9.0	6.0

\* : notation : de 0 pour un impact potentiel très défavorable sur l'environnement (Indicateurs environnements élevés) à 10 pour un impact potentiel très favorable (indicateurs faibles ou nuls, normes réglementaires issues de travaux de recherche/développement)

Tamis & Van Den Brink (1999) montrent par une enquête de 5 années sur des systèmes culturaux produisant du blé aux Pays-Bas, que les fermes biologiques diffèrent des systèmes conventionnels avec une stabilité des systèmes de production, induisant par là une moindre pression des pesticides sur l'environnement.

La préservation de la faune et de la flore est un autre indicateur de durabilité. En effet, la diversité de la faune et de la flore agricole est souvent appauvrie par les systèmes de productions conventionnels. Certaines espèces traditionnelles sont menacées de disparition, c'est le cas de pomme à la fin du siècle dernier, dont le nombre de variétés avoisinait 2000 variétés en France. En 1970 elles étaient limitées à quelques dizaines par la modernisation des vergers (Raiffaud, 2001).

Par contre, l'agrobiologie tend à augmenter la biodiversité par le biais de la diversité des espèces cultivées et l'interdiction des OGM puisqu'elle cherche à préserver le patrimoine variétal. Van Elsen (2000) rapporte le rôle positif des agriculteurs biologiques dans le maintien de la biodiversité. Cette dernière ne concerne pas uniquement la flore mais aussi la faune macro et micro biologique du sol. En effet, cette faune est un élément clef pour la qualité et la fertilité des sols. Les organismes le constituant, aident à décomposer la matière organique et fabriquent

l'humus qui enrichit et stabilise la structure du sol. Ils contribuent aussi à creuser des galeries qui permettent un bon enracinement en favorisant une bonne aération du sol. L'étude de Clark (1999) sur les populations d'arthropodes et d'insectes montre des niveaux de présence supérieurs dans les systèmes agrobiologiques. Niggli *et al.* (1998) indiquent également que la fertilité et la biodiversité des sols sont nettement supérieures dans les procédés biologiques. Ceci se traduit par les populations d'arthropodes auxiliaires, de ver de terre, ainsi que la biomasse microbienne qui sont de 20 à 40 % plus importantes. Souvent les prédateurs de culture sont en nombre comparable sur les deux systèmes de culture mais une faune auxiliaire importante essentiellement présente dans les systèmes agrobiologiques permet une régulation naturelle des ravageurs de culture.

Donc en termes d'impacts sur l'environnement, de nombreuses données scientifiques concordantes ont montré des différences en faveur des systèmes de culture agrobiologiques. Ces différences s'expriment sur les résidus pesticides, les lessivages des nitrates, l'activité biologique des sols et la biodiversité.

#### **7-6- La qualité organoleptique**

Elle concerne le goût, la couleur, la texture et l'odeur. C'est un facteur très subjectif. Cette qualité constitue le principal motif d'achat pour la clientèle traditionnelle, cependant, les tendances récentes accordent une importance croissante aux autres paramètres de qualités (Guet, 1992). Ainsi, la plupart des consommateurs des produits biologiques semblent prioritairement intéressés par l'avantage sanitaire qu'apporte le mode biologique plus que pour leur plaisir en matière de goût ou d'authenticité des produits qu'ils consomment (AFSSA, 2002).

Quant au blé dur les principaux paramètres de la qualité organoleptique sont le goût, la couleur, la friabilité et l'aspect du grain.

##### **7-6-1- Le goût**

Les critères de la qualité gustative sont en partie subjectifs car ils sont très liés à une perception personnelle. Ils peuvent également être objectifs et quantitatifs pour un certain nombre d'entre eux, par exemple lorsqu'ils sont liés aux taux de sucre, à la fermeté et à l'acidité. Ces critères permettent d'effectuer des études comparatives en termes de qualité gustative (Ducasse-Cournac & Leclerc, 2000).

Généralement, les études comparatives donnent des résultats variables selon les méthodologies et les protocoles utilisés.

Des enquêtes d'opinion montrent que beaucoup de consommateurs font une différence significative en faveur des produits issus de l'agriculture biologique qui peut être expliquée par l'utilisation des variétés à valeur gustative élevée plus généralisée en agriculture biologique. En fait, le goût est influencé essentiellement par la variété, le terroir, le climat et éventuellement le mode de culture (Ducasse-Cournac & Leclerc, 2000).

### **7-6-2- La couleur**

La couleur de la pâte alimentaire est le résultat de la superposition d'une composante jaune recherchée et une composante brune indésirable. La couleur jaune ambrée des produits dérivés de blé dur est le résultat du contenu en pigment caroténoïdes et de leurs oxydations par les lipoxygénases (Borelli *et al.*, 1999).

En effet, l'activité enzymatique du blé dur peut provoquer, au cours de pastification, une altération de l'indice de jaune et une augmentation de l'indice de brun (ITCF & ONIC, 1995).

Borelli *et al.* (1999) ont montré que pour des échantillons issus de la même variété, le brunissement est d'autant plus important que la teneur en protéines du grain soit plus élevée. Or les blés biologiques ont une moindre teneur en protéines par rapport à ceux conduits en conventionnel, ce qui va permettre donc une bonne couleur dont la composante brune est faible.

### **7-6-3- L'aspect du grain**

La longueur du grain est composée entre 5 et 8 mm, sa largeur est entre 2 et 4 mm, son poids est entre 20 et 50 mg et sa densité est entre 1.3 et 1.4.

La taille des grains est considérée comme un facteur important de la valeur semoulière du blé dur. Les variétés à gros grains sont généralement préférées aux variétés à petits grains car ils donnent des rendements semouliers supérieurs à l'exception des grains mitadinés ou échaudés par le froid ou le stress hydrique qui peuvent perturber l'interprétation des résultats.

Une autre caractéristique du grain c'est la friabilité qui est un critère variétal de la texture de l'albumen qui traduit son état de cohésion.

Les blés friables donnent toujours des farines, quelle que soit leur vitrosité. La vitrosité dépend des conditions de développement des grains, elle est d'autant plus élevée que leur teneur en protéines est élevée, ce qui permet donc de dire que la friabilité est corrélée à la teneur en protéines mais c'est un caractère qui est essentiellement variétal.

L'opposé de friabilité est la dureté et les blés non friables dits également durs ne donnent des farines que lorsqu'ils ne sont pas vitreux (Feillet, 2000).

A partir de l'ensemble de ces données sur la qualité organoleptique on note que le mode de culture a peu d'influence sur ce type de qualité et sur ses critères.

### **7-7- Qualité semoulière**

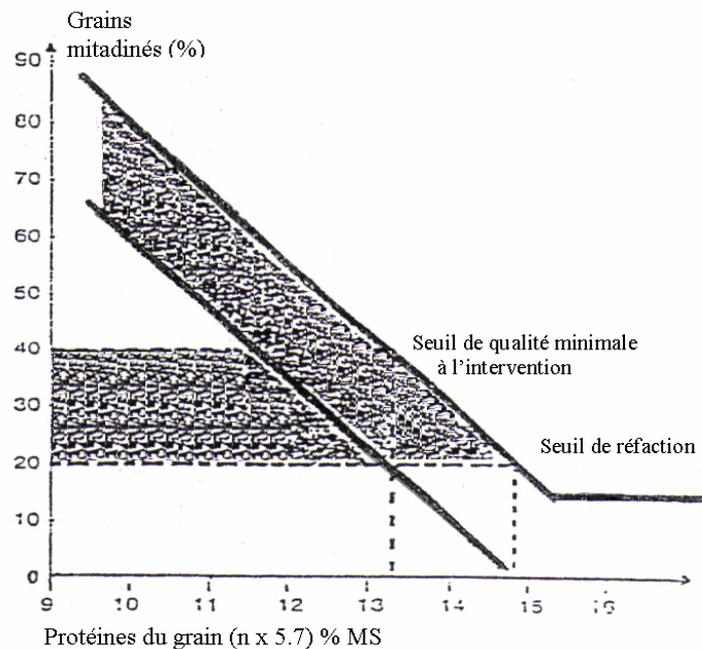
La valeur semoulière d'un blé caractérise le rendement de sa transformation en semoule de pureté déterminée. Elle tient compte des caractéristiques commerciales du lot (teneur en eau, quantité des impuretés...) (Feillet, 2000).

Le rendement en semoule dépend essentiellement du mitadinage qui correspond à la diminution de la vitrosité du grain par l'apparition des zones farineuses blanchâtres dont la taille dépend de l'importance de cet accident (Valdayron *et al.*, 1957).

Chez le blé dur, l'effet de mitadinage se manifeste lorsque les grains atteints ont tendance à s'effriter à la mouture pour donner du gruau au lieu de la semoule d'où la diminution du rendement semoulier (Sombrero & Monneveux, 1989).

Le mitadinage est influencé par les conditions environnementales et les techniques culturales (Mosconi & Bozzini, 1973).

En effet, la disponibilité de l'azote pendant le développement de la plante diminue le pourcentage du mitadinage et augmente la teneur en protéines (Sombrero & Monneveux, 1989) (figure 11).



**Figure 11.** Relation entre le taux de mitadinage et la teneur en protéines du grain (Gate, 1995).

Ce qui n'est pas le cas pour les cultures biologiques vu qu'il y a un faible apport d'azote (Woëse *et al.*, 1997) ayant comme conséquence un faible taux en protéines et par conséquent une augmentation du mitadinage qui va être responsable de la diminution de la qualité semoulière du blé dur.

Le mitadinage est influencé également par le génotype. En effet, on distingue la présence de variétés résistantes au mitadinage et d'autres sensibles (Gate, 1995).

Valdayron *et al.* (1957) ont montré que la fertilisation azotée peut réduire le taux de mitadinage chez le blé dur. Cet effet est d'autant plus net que la variété est plus sensible.

Ainsi on peut dire que la qualité semoulière du blé dur dépend essentiellement de l'apport en azote à la plante car les grains vitreux (non mitadinés) contiennent plus de protéines que ceux mitadinés (Menger, 1973). Donc un taux de mitadinage élevée est fortement corrélé à une faible teneur en protéines (Feillet, 2000) ce qui est le cas pour les blés durs cultivés biologiquement.

En conclusion, on peut dire que la culture en mode biologique peut avoir des effets secondaires sur la qualité semoulière du blé dur par l'augmentation du taux de mitadinage.

# *CHAPITRE 2*

## **Matériel et méthodes**

## CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODES

### 1- Site expérimental

L'essai de comparaison des variétés de blé dur a été réalisé pendant quatre années sur deux sites. Le premier site appartient à la ferme expérimentale de l'ESAK situé dans la région semi-aride et le deuxième site appartient à la station expérimentale « El Kodja » du Centre Technique des Céréales » à Boussalem situé dans la région sub-humide. Il est à signaler que ces deux parcelles n'ont pas été traitées par des produits chimiques de synthèse depuis au moins trois ans ce qui est conforme aux exigences du cahier des charges relatif à l'agriculture biologique.

### 2- Matériel végétal

Quatorze variétés de blé dur ont été testées dans ce travail (tableau 9). Elles se caractérisent par une variation génétique importante et appartiennent aux variétés anciennes (n=9) ou améliorées (n=5). Ces variétés pourraient déceler des comportements différents vis à vis du mode de la production en culture biologique.

**Tableau 9.** Variétés de blé dur utilisées dans l'expérience.

Variétés anciennes		Variétés améliorées
Chili	INRAT69	Karim
Biskri	Badri	Razzak
Hamira	Ben Bechir	Khiar
Swabaa Algia	Maghrebi	Om Rabia
Jnah Khortifa		Nasr

Le semis a été effectué avec de la semence non traitée de provenance du Laboratoire de Production de Semences de l'Ecole Supérieure d'Agriculture du Kef (ESAK).

Il convient de préciser que les 14 variétés de blé dur ont été testées pendant deux années consécutives. Durant la troisième et quatrième année, seulement 9 et 7 variétés ont été testées respectivement puisque elles se sont bien comportées et ont bien réagi lors de la combinaison des années d'essai.

### 3- Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental appliqué pendant les quatre années d'essai, a été du type « split-plot » avec 4 répétitions. Le mode de culture (biologique *vs* conventionnel) est le facteur principal. La variété randomisée au sein de chaque traitement est le facteur secondaire (Schéma 1). Chaque répétition a été divisée en deux parties, une pour la culture de blé en conventionnel et l'autre pour la culture de blé en biologique.

Chaque variété a été semée dans une parcelle élémentaire ayant des dimensions 2m x 1m. Cette dernière a été divisée en 6 lignes espacées de 20 cm les unes des autres. Chaque parcelle élémentaire est réservée pour une seule variété. Ainsi, la surface occupée par l'essai est de  $2 \times 14 \times 4 \times 2 \text{ m}^2 = 224 \text{ m}^2$ .

Répétition 1		Répétition 2		Répétition 3		Répétition 4	
Bio	Conv	Bio	Conv	Bio	Conv	Bio	Conv
13	7	13	3	1	12	7	6
1	8	9	7	11	11	3	11
14	1	6	10	4	4	2	4
7	12	7	11	12	3	1	8
5	13	14	6	6	2	6	13
8	4	12	12	8	6	4	2
3	6	5	2	5	8	11	7
2	3	4	1	14	1	12	1
10	9	1	4	7	13	9	10
4	10	8	9	2	10	13	3
11	2	3	8	13	9	8	9
6	11	10	14	10	7	10	5
9	14	2	5	9	14	5	14
12	5	11	13	3	5	14	12

1	Chili	8	Ben Bechir
2	Biskri	9	Maghrbi
3	Hamira	10	Karim
4	Swabaa Algia	11	Razzak
5	Jnah Khortifa	12	Khlar
6	INRAT69	13	Om Rabia
7	Badri	14	Nasr

**Schéma 1.** Le parcellaire expérimental (biologique et conventionnel).

## **4- Conduite de la culture**

### **4-1- Précédent cultural**

Le blé dur a été précédé d'une jachère pendant les 4 années d'étude. Ce choix réside dans le fait que la comparaison entre les deux modes de culture ne devrait pas être affectée par le précédent cultural. Donc la même condition a été choisie pour les deux sites. Il convient de noter qu'une rotation incluant la jachère a été pratiquée durant toute la période expérimentale..

### **4-2- Préparation du sol**

Les travaux de préparation du sol ont consisté en un labour moyen effectué par un pulvérisateur offset puis un deuxième passage avec le même outil, pratiqué en vue d'enfouir les débris végétaux. Par la suite, le lit de semences a été préparé par des cultivateurs et la herse.

### **4-3- Semis de la culture**

Le semis a été réalisé pendant la deuxième moitié du mois de novembre chaque année. La dose de semis calculée, était de 600 graines par parcelle élémentaire c'est-à-dire en moyenne 120 kg/ha.

### **4-4- Désherbage**

Le développement des adventices a été limité grâce à un déchaumage et un faux semis (passage au pulvérisateur offset) efficaces qui ont été appliqués pour les parcelles biologique et conventionnelle. Pour les adventices apparues ultérieurement la lutte a été réalisée selon plusieurs procédés :

- ✓ Pour la parcelle biologique : un désherbage mécanique des allées par un rotavator accompagné d'un désherbage manuel des parcelles élémentaires à l'aide du râteau et de binette.
- ✓ Pour la parcelle conventionnelle : un désherbage chimique par un pulvérisateur à dos en utilisant Granstar de 20 g/ha.

### **4-5- Fertilisation**

La fertilisation consistait :

✓ Pour la parcelle conventionnelle en un apport d'azote sous forme d'ammonitrite 33,5 % en deux fractions à raison de 100 kg/ha chacune : le premier apport a été réalisé après la levée, le deuxième au début tallage. L'épandage d'ammonitrite a été pratiqué manuellement tout en essayant de répartir cet engrais d'une façon homogène sur toutes les unités expérimentales.

✓ Pour la parcelle biologique en un apport d'un engrais organique liquide azoté composé d'azote organique 5.9 %, de carbone organique 22.2 % et d'acides aminés 36.9 % à raison de 2 l/ha : 5 apports ont été réalisés après la levée, ces apports sont espacés de 10 jours selon la fiche technique du produit. L'apport a été pratiqué en utilisant un pulvérisateur à dos.

#### **4-6- Protection phytosanitaire**

Aucune méthode de lutte n'a été appliquée ni contre les maladies cryptogamiques, ni contre les insectes.

### **5- Paramètres étudiés et méthodes d'analyses**

#### **5-1- Etude de la culture**

Les paramètres mesurés pendant les quatre années d'étude sont de deux types :

- les caractères morphologiques et physiologiques (hauteur de la plante, longueur de l'épi et date d'épiaison) ;

- les composantes de rendement (nombre d'épis par unité de surface, nombre de grains par épi, poids de 1000 grains, rendement biologique, rendement en grains et indice de récolte).

Il est à noter qu'un seul paramètre mesuré de la culture du blé dur a été retenu et analysé par la suite. Ce paramètre est déterminé en pesant les grains relatifs à chaque unité expérimentale puis le rendement en qx/ha, est calculé pour chaque variété.

#### **5-2- Etude de la qualité des produits**

##### ***5-2-1- Matériel végétal***

Le matériel utilisé lors de ces travaux de recherche, est constitué exclusivement par des grains de 14 variétés de blé dur issus des modes biologique et conventionnel de la deuxième année d'essai et provenant de la station de l'ESAK. Les grains ont été moulus à l'aide d'un

moulin « cyclotec 1093 sample mill (tectator) ». Les farines obtenues sont conservées à 5°C pendant toute la durée expérimentale pour procéder ensuite aux analyses de la qualité.

### **5-2-2- Méthodes d'analyses**

#### 5-2-2-1- Mesure de la masse volumique

La masse volumique dite masse à l'hectolitre, appelée communément poids spécifique (PS), est la masse d'un hectolitre de grains exprimée en kilogrammes. Elle est utilisée pour prédire le comportement du blé au cours de la mouture. Sa détermination donne quelques indications sur la teneur en eau et les impuretés des céréales et le rendement en farine (NF V 03-719). Elle est déterminée par l'écoulement d'un échantillon au moyen d'un humidimètre Dickey-John. Cet appareil est utilisé globalement pour mesurer l'humidité, le PS et la température.

#### *Mode opératoire*

- Remplir la trémie de l'humidimètre Dickey-John d'une manière à ce que la cellule photoélectrique soit cachée par les grains du blé ;
- Ouvrir l'obturateur en touchant le bouton « test » ;
- Laisser couler la totalité des grains dans le récipient inférieur ou tiroir ;
- Noter le PS et l'humidité ;
- Vider le tiroir et le remettre à sa place.

#### 5-2-2-2- Dosage de l'humidité

La procédure suivante spécifie la méthode conventionnelle utilisée pour la détermination de la teneur en eau dans les céréales et les produits céréaliers (NF V 03-707 et ISO 712).

La méthode consiste à sécher une prise d'essai à une température de 104°C +/- 0.5°C pendant 4 heures jusqu'à poids constant.

#### 5-2-2-3- Dosage des protéines

Du fait du rôle primordial des protéines au niveau de la qualité rhéologique, la quantité de protéines présente dans les farines est le premier indicateur de la force d'une farine.

La méthode consiste à minéraliser la matière organique de l'échantillon avec l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur. Ensuite le produit de la réaction  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  est alcalinisé par une base forte (NaOH). Après distillation, l'ammoniac libéré est dosé.

Cette méthode permet de déterminer conventionnellement la teneur en protéines brutes des matières végétales à partir de la teneur en azote, dosée selon Kjeldhal (NF V 03-050 et ISO 1871-1975).

#### *Mode opératoire*

- Peser une quantité de 800 mg de farine et l'introduire dans un tube de minéralisation.
- Ajouter 10 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré, 1 à 2 ml d'eau oxygénée et une tablette Kjeltabs.
- Placer les tubes de minéralisation dans le minéralisateur pendant 4 à 5 heures à  $430^\circ$  ;
- Surveiller la minéralisation pendant la première heure, pour éviter la formation de mousse ;
- Après la minéralisation, on retire les tubes et on les laisse refroidir, puis on ajoute 50 ml d'eau distillée à chaque tube ;
- Introduire 50 ml d'acide borique et quelques gouttes d'indicateur coloré ;
- Passer ensuite à la distillation avec la soude concentrée qui sert à neutraliser la quantité d'acide sulfurique mise en œuvre ;
- Titrer l'azote capté à l'aide de la solution d'acide sulfurique 0.2 N.

La teneur en protéine exprimée en pourcentage en masse de produit sec est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$\%MPT = \frac{14 \times T \times V}{P} \times 5,7 \times 100$$

Où

*T* : titre de l'acide sulfurique.

*V* : volume d'acide nécessaire pour la titration moins celui du blanco.

*P* : poids de la prise d'essai en mg.

5.7 : le coefficient de conversion de l'azote en protéine pour la farine.

#### 5-2-2-4- Dosage des acides aminés (AA) par chromatographie échangeuse d'ions

Le dosage des acides aminés totaux sert surtout à l'appréciation de la valeur nutritionnelle des protéines présentes. Ce dosage requiert une hydrolyse préalable.

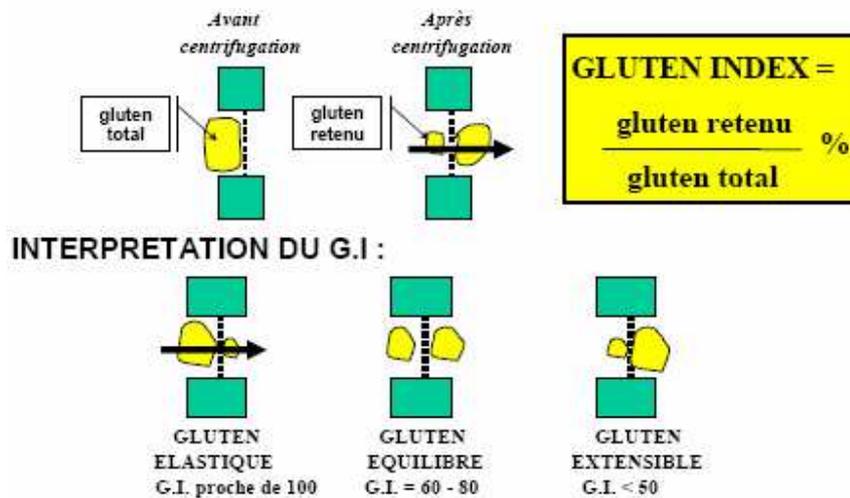
Pour les AA soufrés, le dosage nécessite une oxydation performique préalable à l'hydrolyse acide. 15 ml de la solution d'acide performique (1 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 30 % et 9 ml d'acide formique 98 %) sont ajoutés dans une prise d'essai de 30 mg de protéines. L'ensemble est placé à 4°C pendant 18 h sous agitation. L'oxydation est stoppée par l'ajout sous agitation de 0.3 ml d'HBr 48 % par ml d'acide performique dans l'échantillon placé dans un bain de glace. Le brome est éliminé par évaporation sous vide à l'aide d'un Rotavapor. L'échantillon subit ensuite l'hydrolyse acide. L'hydrolysate est filtré, puis distillé plusieurs fois sous vide à l'aide d'un Rotavapor afin d'éliminer l'HCl. Le résidu est repris dans un tampon (pH 3.37) contenant le standard interne (norleucine), centrifugé à 3500 g pendant 10 min, puis filtré (0.22 µm).

Les opérations de séparation et de dosage des AA (Moore *et al.*, 1958) se déroulent de manière automatisée dans un appareil du type LKB 4400 équipé d'une colonne de résine échangeuse de cations du type Ultropac 8 (Pharmacia). A la sortie de la colonne, les AA séparés réagissent avec la ninhydrine pour former un complexe coloré, dont l'absorbance est mesurée par un photomètre à deux canaux (440 nm pour la proline et 570 nm pour les autres) raccordé à un enregistreur et à un intégrateur. Les AA sont identifiés en fonction du temps de rétention des pics et quantifiés en fonction de la surface des pics. Ces paramètres sont connus lors de l'injection d'une solution standard d'AA.

#### 5-2-2-5- Extraction du gluten

Le gluten humide extrait des farines de blé est une substance viscoélastique constituée principalement par la fraction insoluble des protéines (gliadines et gluténines). Il a des propriétés d'extensibilité, d'élasticité et de ténacité (figure 12) qui peuvent influencer sur le comportement des pâtes en cours de fabrication et sur la qualité du produit fini (pain, biscuit, pâte,...). Ce test peut constituer également un moyen de prédiction de la qualité du blé dans le processus d'amidonnerie.

L'extraction du gluten est obtenue par malaxage mécanique d'une pâte de farine et par lavage par une solution de NaCl tamponnée, puis en essorant et en pesant le résidu (AACC. 38.12, ICC Standard 137).



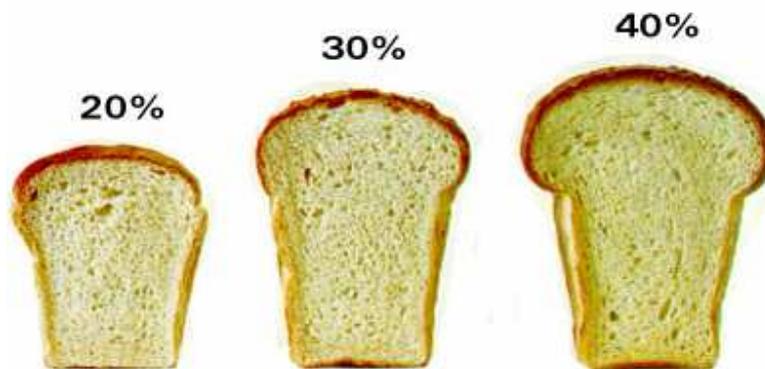
**Figure 12.** Principe du gluten index : mesure de la proportion de gluten retenue sur une grille perforée après centrifugation.

*Mode opératoire*

- Peser 10 g de farine et 5.9 ml d'une solution à 2 % de NaCl ;
- Mélanger à l'aide du Glutomatic pendant 20 secondes ;
- Laisser reposer la pâte formée durant 5 minutes ;
- Démarrer l'extraction mécaniquement, avec la même solution à 2 % de NaCl ;
- Récupérer le gluten obtenu et peser la quantité de gluten essorée.

$$\%GH = P_g \times 10$$

Où *GH* : gluten humide (retenu) et *P<sub>g</sub>* : poids du gluten.



**Figure 13.** Influence de la quantité de gluten humide (en %) sur le volume du pain.

✓ La détermination du gluten index

Centrifuger la masse de gluten obtenue à 6000 Tr/min. La partie du gluten restant sur la filière (gluten résiduel) est ensuite retirée et peser avec la partie ayant traversé la filière de façon à connaître le poids total de gluten.

$$GI = \frac{G_r}{G_t} \times 100$$

Où  $GI$  : gluten index,  $G_r$  : gluten résiduel (g) et  $G_t$  : gluten total (g).

✓ La détermination du gluten sec

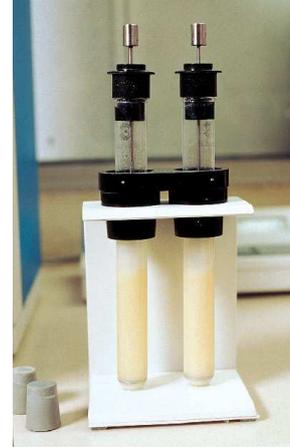
Le gluten total est mis à sécher sur une plaque chauffante pendant 4 minutes, puis pesé.

5-2-2-6- Indice de chute de Hagberg

Cette méthode mesure indirectement l'activité des amylases de la farine (enzymes dégradant l'amidon) (NF V 03-703). Elle consiste à mesurer la consistance d'une suspension de farine dans l'eau placée dans un tube viscosimétrique et plongée dans un bain-marie porté à l'ébullition (figures 14 et 15). La consistance est appréciée en mesurant le temps (en secondes) mis par un plongeur de géométrie parfaitement définie pour s'enfoncer d'une distance fixée à l'avance au sein de la suspension de farine.

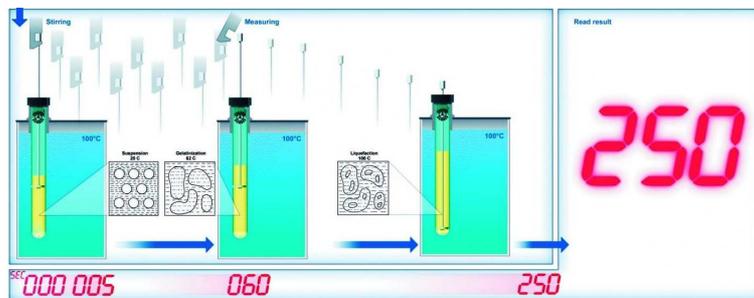


**Figure 14.** Appareil de Hagberg (Paillard *et al.*, 2002).



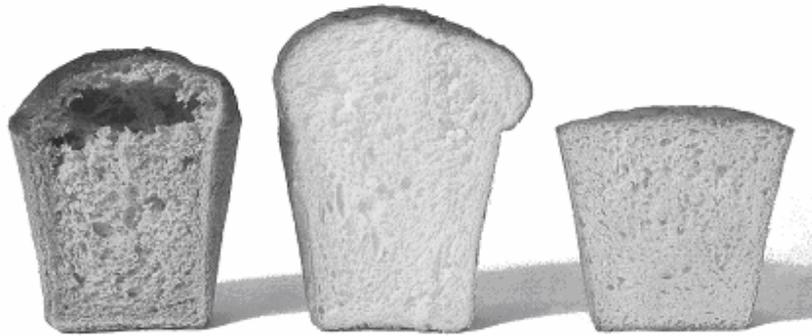
**Figure 15.** Tubes de gélatinisation (Paillard *et al.*, 2002).

Cette méthode détermine l'activité amylasique de la farine. Elle réalise la gélatinisation rapide d'une suspension de farine, dans un bain-marie d'eau bouillante et mesure la liquéfaction de l'empois par l'alpha-amylase. Plus le temps de chute est court (plongeur descend rapidement dans le tube), plus l'activité amylasique est élevée, plus l'amidon est hydrolysé et plus la consistance de l'empois formé lors du chauffage de la suspension est faible (figure 16).



**Figure 16.** Principe de la mesure de l'indice de chute de Hagberg (<http://www.perten.com/>).

Une farine contenant trop d'alpha amylase (par exemple quand le blé a germé) ou trop de grains d'amidons endommagés va donner une pâte collante. Cette activité amylasique va avoir des conséquences sur l'aspect du produit après cuisson (figure 17).



*activité amylasique = 65 (inutilisable)*    
 *activité amylasique = 250 (Bonne activité)*    
 *activité amylasique = 400 (Activité insuffisante)*

**Figure 17.** Conséquences de l'activité amylasique sur l'aspect du produit après cuisson (Chene, 2001).

*Mode opératoire*

- Peser 7 g de farine et les verser dans un tube viscosimétrique ;
- Pipeter 25 ml d'eau distillée et les verser dans le tube avec la farine ;
- Agiter vigoureusement à la main, afin d'obtenir une suspension uniforme ;
- Racler les bords et les parois du tube, de façon à entraîner la mouture adhérente ;
- Placer le tube et l'agitateur à l'intérieur du bain-marie à eau bouillante ;
- Déclencher le mesureur automatique.

5-2-2-7- Dosage des cendres

Le taux de cendres est important pour la meunerie et la semoulerie, car il est lié au taux d'extraction. Les cendres qui se situent dans les couches externes du grain, vont constituer le son après mouture. La part du grain que représentent les couches externes est appréciée indirectement par le taux de cendres. Ce dernier s'obtient par pesée du résidu après calcination au four à 550°C (qui prend en général environ 2 h), et exprimé en pourcentage de la matière sèche (NF V 03-760 et ISO 2171).

*Mode opératoire*

- La prise d'essai de la farine est de 5-6 g, pour les farines contenant plus de 1 % de cendres ;

- L'échantillon doit, sans être comprimé, atteindre partout une hauteur égale dans la capsule. Humecter avec 1-2 ml d'alcool ;
- Placer de l'échantillon dans le four en augmentant la température progressivement par palier de 100°C jusqu'à 550°C ;
- Après incinération complète, laisser refroidir les creusets puis peser les échantillons.

$$\% \text{Cendres} = \frac{C}{P} \times 100$$

Où

$C$  : poids des cendres, en grammes.

$P$  : poids de la prise d'essai en grammes.

#### 5-2-2-8- Dosage des macroéléments

Dans cette analyse deux étapes interviennent pour la détermination de la teneur des variétés étudiées de blé dur en macroéléments :

- Préparation à partir de la matière sèche d'une solution standard contenant les éléments minéraux à doser.
- Dosage de chacun de ces éléments dans la solution minérale par la méthode de flamme ou par spectrophotométrie.

#### *Mode opératoire*

Après le broyage, la matière végétale sèche est calcinée à une température de 550°C. Elle est ainsi transformée en cendre minérale. Cette cendre est ensuite traitée par une solution diluée d'acide contenant trois acides (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HNO<sub>3</sub>). La substance minérale de la cendre est dissoute et les résidus sont éliminés par filtration, on obtient ainsi une solution minérale d'échantillons contenant les éléments minéraux sous forme solubles.

#### × Dosage du phosphore

- Prélèver 50 ml du filtrat obtenu et lui ajouter 10 ml de HNO<sub>3</sub> dilué, 10 ml de métavanadate d'ammonium et 10 ml de molybdate d'ammonium pour développer une coloration jaune.

- Préparer la gamme d'étalonnage en même temps.
- Après un repos de 30 min de la solution, passer au spectrophotomètre. Tracer ainsi la courbe d'étalonnage qui représente la densité optique en fonction de la masse de phosphore qui permet de déterminer la teneur en phosphore des différentes variétés étudiées.

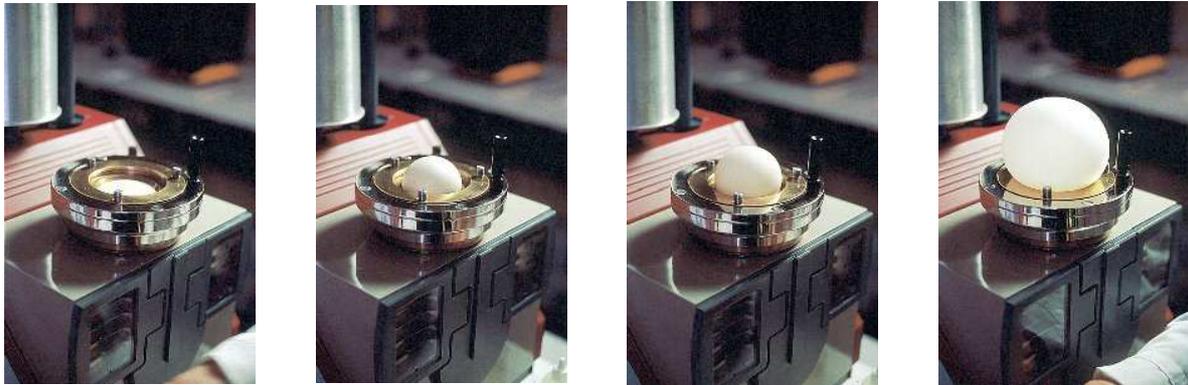
× Dosage du calcium et du potassium

- Prélever 1 ml du filtrat obtenu et lui ajouter 19 ml de la solution diluée.
- Préparer la gamme étalon et passer au photomètre à flamme. Suite à la prise des valeurs de densité optique, tracer la courbe d'étalonnage et déterminer la teneur en calcium ou en potassium par projection des valeurs de la densité optique sur la courbe.
- Principe de la photométrie à flamme :
  - aspiration de la solution
  - pulvérisation
  - mélange de la solution avec le gaz
  - atomisation au niveau de la flamme
  - captage de l'élément minéral par son filtre spécial
  - passage du spectre par la photocellule d'où déviation de l'aiguille du galvanomètre et cette déviation est proportionnelle à la concentration de l'échantillon en l'élément minéral correspondant.

5-2-2-9- Essai à l'alvéographe Chopin

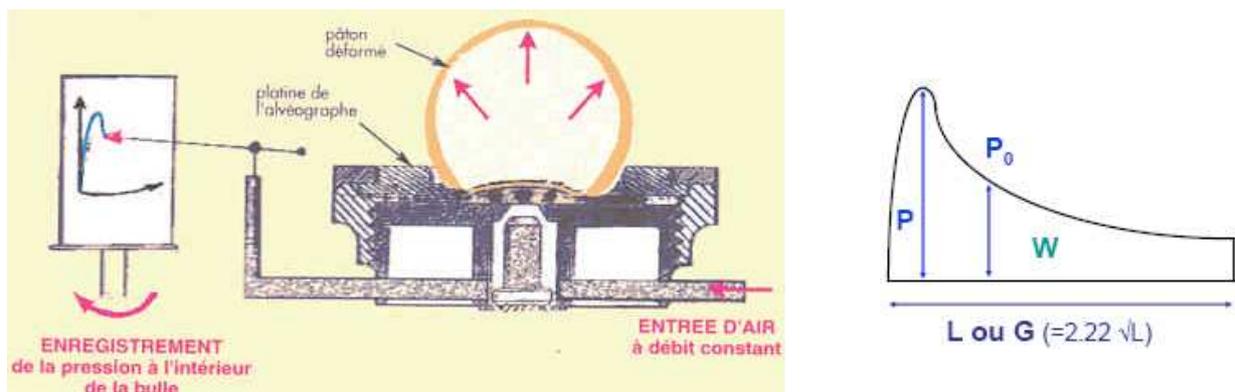
L'alvéographe Chopin permet de prédire l'aptitude d'un blé ou d'une farine à être utilisée dans la fabrication de produits de cuisson (ISO 5530).

L'alvéographe Chopin étudie le comportement d'un échantillon de pâte, formé à partir d'une farine et d'eau salée lors de sa déformation sous l'effet d'un déplacement d'air à débit constant. Dans un premier temps, le disque de pâte résiste à la pression et ne se déforme pas, puis il gonfle sous forme de bulle plus ou moins volumineuse selon son extensibilité et éclate (figure 18).



**Figure 18.** Etapes de développement de la pâte pendant la mesure à l'alvéographe (Paillard *et al.*, 2002)

L'évolution de la pression dans la bulle est mesurée et reportée sous forme de courbe, appelée alvéogramme (figure 19).



**Figure 19.** Principe de l'essai à l'alvéographe (ITCF & ONIC, 1995).

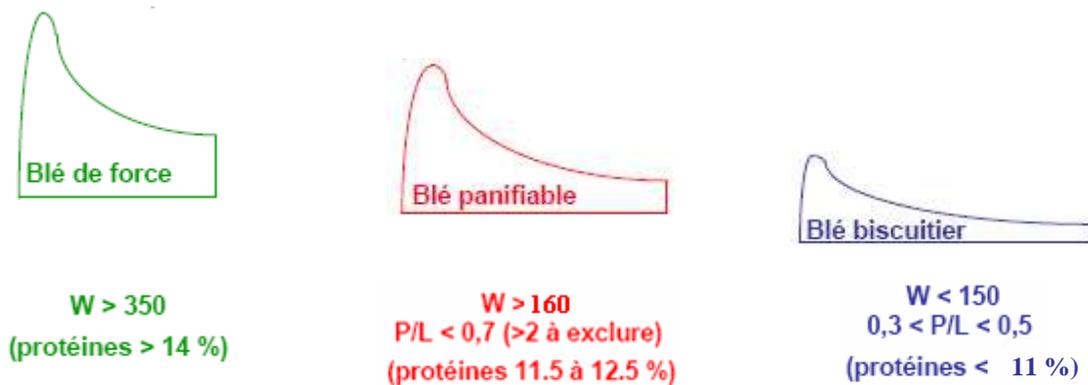
L'alvéogramme est caractérisé par quatre paramètres principaux : P, G ou L, W et le rapport P/L.

La hauteur P correspond à la pression maximale, exprimée en millimètres, enregistrée avant que le disque ne commence à gonfler. P est en relation avec la ténacité de la pâte.

La longueur L, mesurée en millimètres, correspond au gonflement t maximum de la bulle et est en rapport avec l'extensibilité de la pâte. Le gonflement se traduit par le calcul à partir de  $L : G = 2.22 \times \sqrt{L}$ .

Le rapport P/L donne une indication de l'équilibre entre ténacité et extensibilité de la pâte.

La surface de l'alvéogramme W représente le travail de déformation de la pâte jusqu'à la rupture et exprime la force de la farine (force boulangère). W s'exprime en  $10^{-4}$  Joule rapporté à un gramme de pâte (figure 20 et tableau 10)



**Figure 20.** Courbes alvéographiques schématiques des différentes classes de blé (ITCF & ONIC, 1995).

**Tableau 10.** Utilisations potentielles des blés selon leur force boulangère (ITCF & ONIC, 1995).

Force W	Rapport P/L	Utilisations
< 150	0.3-0.5	biscuiterie
160 à 250	0.5-0.7	panification
250-300	0.5-0.9	croissant - brioche
350	0.7-1	Pain de mie ou hamburger

#### *Mode opératoire*

- Verser 250 g de farine dans le pétrin, conditionné à 25°C et placer l'appareil en fonction pétrissage ;
- Ajouter de l'eau à 2.5 % NaCl en fonction du pourcentage d'humidité, durant les vingt premières secondes ;
- Poursuivre le pétrissage jusqu'à huit minutes ;
- Inverser la rotation du phraseur (extraction des pâtons), éliminer le premier pâton ;

- Laminer les cinq pâtons à l'aide du rouleau huilé en faisant six allées et retour ;
- Découper une éprouvette dans chaque pâton à l'aide d'un emporte pièce ;
- Faire glisser l'éprouvette sur une plaque de repos et placer celle-ci dans l'enceinte isotherme de l'alvéographe (25°C) ;
- A la vingt-huitième minute, mettre l'éprouvette sur la platine huilée de l'alvéographe en la centrant ;
- Aplatir l'éprouvette à l'aide du tampon prévu à cet effet ;
- Mise en route du générateur d'air et gonflement de la pâte. L'acquisition des mesures est enregistrée par un calculateur de manière à restituer les valeurs P, L, P/L et W.

## 6- Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SAS (SAS Institute, 2001). Pour chaque année d'essai, une analyse de la variance (ANOVA) a été faite pour chaque site séparément en utilisant la procédure GLM afin de déterminer l'effet du mode de culture (niveau 2 c'est à dire biologique *vs* conventionnel) et l'effet de la variété (n = 14) ainsi que leur interaction. Au terme de cette analyse, les moyennes significativement différentes ont été comparées en utilisant le test de Newman et Keuls (Dagnelie, 1980). Puis une analyse combinée de la variance a été réalisée pour tester la signification des différences entre les variétés, les sites, les modes de cultures et les années ainsi que leurs interactions du premier, second et troisième degré.

Le logiciel SAS a été utilisé également pour analyser les paramètres de stabilité qui sont le coefficient de variation (CV) (Francis & Kannenburg, 1978), le coefficient de régression linéaire ( $b_i$ ) (Finlay & Wilkinson, 1963), les déviations de régression ( $S^2 d_i$ ) (Eberhart & Russell, 1966), l'écovalence de Wricke ( $W_1$ ) (Wricke, 1962), l'écovalence de Shukla ( $W_2$ ) (Shukla, 1972), l'écovalence de Plaisted & Peterson ( $W_3$ ) (Plaisted & Peterson, 1959) et la supériorité de Lin & Binns ( $P_i$ ) (Linn & Binns, 1988).

Finalement pour les paramètres relatifs à la qualité des grains, une ANOVA a été réalisée.

# *CHAPITRE 3*

## **Résultats et discussion**

## CHAPITRE 3. RESULTATS ET DISCUSSION

### 1- Performances des variétés de blé dur en agriculture biologique

#### 1-1- Evaluation du comportement variétal au cours des deux premières années d'essai

Les quatorze variétés de blé dur utilisées dans ce travail ont été dans un premier temps testées dans deux sites différents pendant deux années consécutives. Leurs performances de production ont été évaluées en modes conventionnel et biologique.

Les effets du mode de culture (M), de l'année (A), du site (S), de la variété (V) ainsi que des interactions entre eux sont présentés dans l'annexe 1.

L'expression du rendement en grains semble être contrôlée par les effets conjugués de l'année, le site, la variété et le mode de conduite (annexe 1). En dépit de sa faible contribution à la variance, l'effet de ce dernier facteur sur le rendement en grains est significatif ( $P < 0.001$ ). En effet, sur l'ensemble des variétés (tableau 11), le rendement en grains du blé dur est plus élevé ( $P < 0.001$ ) lorsque les différentes variétés sont conduites en mode conventionnel (25.83 qx/ha) qu'en mode biologique (22.71 qx/ha).

Plusieurs recherches scientifiques menées aux Etats-Unis et en Europe (Offerman & Nieberg, 2000, Halwail, 2006) rapportent que le rendement de l'agriculture biologique est inférieur environ à 20 % du rendement de l'agriculture conventionnelle. Même si la différence est statistiquement significative, elle n'a pas dépassé 12.08 % pour l'ensemble des cultivars utilisés dans cette investigation pour les deux modes de production. Cette bonne performance des variétés de blé en mode biologique peut être attribuée à plusieurs conditions liées aux techniques culturales utilisées (fertilisation, désherbage). En effet, l'apport de l'engrais organique azoté utilisé en mode biologique a été régulier (5 fractions) tout au long du cycle végétatif du blé ce qui permet ainsi à la plante de s'échapper au stress nutritionnel et hydrique. En revanche, les plantes conduites en mode conventionnel n'ont bénéficié que d'apport d'engrais azoté ammoniac-nitrique (ammonitrate : nitrate d'ammonium  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) en deux fractions seulement. Cet engrais comprend deux éléments dont l'un se caractérise par une action rapide en

l'occurrence les nitrates et l'autre présente une action plus lente à savoir l'ammoniaque. Il contient 33 % de son poids en azote mi-nitrique et mi-ammoniacal.

**Tableau 11.** Rendements moyens en grains (qx/ha) de quatorze variétés de blé dur dans deux sites selon deux modes de culture et pendant deux années d'essai.

Variété	Mode conventionnel	Mode biologique
Swabaa Algia	26,17 <sup>a</sup>	23,91 <sup>b</sup>
INRAT69	24,94 <sup>a</sup>	23,98 <sup>b</sup>
Badri	26,29 <sup>a</sup>	22,53 <sup>b</sup>
Ben Bechir	29,53 <sup>a</sup>	26,27 <sup>b</sup>
Maghrebi	26,90 <sup>a</sup>	22,56 <sup>b</sup>
Khiar	30,66 <sup>a</sup>	27,25 <sup>b</sup>
Om Rabia	28,22 <sup>a</sup>	22,48 <sup>b</sup>
Karim	22,42 <sup>a</sup>	20,05 <sup>b</sup>
Nasr	31,02 <sup>a</sup>	26,93 <sup>b</sup>
Hamira	24,40 <sup>a</sup>	20,76 <sup>b</sup>
Jnah Khortifa	18,31 <sup>b</sup>	19,72 <sup>a</sup>
Chili	26,38 <sup>a</sup>	20,91 <sup>b</sup>
Razzak	25,04 <sup>a</sup>	20,46 <sup>b</sup>
Biskri	21,37 <sup>a</sup>	20,15 <sup>b</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>25,83<sup>a</sup></b>	<b>22,71<sup>b</sup></b>
<b>ESM</b>	<b>0,027</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne diffèrent significativement (P < 0,05).*  
*ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

L'utilisation des différentes fractions des deux engrais azotés que ce soit en mode biologique ou conventionnel, influe sur la spécificité des réponses variétales. Le but de ce fractionnement est d'apporter l'azote au moment critique pour assurer une vitesse de croissance importante tout en réduisant le lessivage par les pluies (Hubbard *et al.*, 1991 ; Prunty & Greenland, 1997). L'apport d'azote à une culture dont la capacité d'absorption instantanée est élevée permet de minimiser les pertes et donc de mieux valoriser l'azote du fertilisant (Alley *et al.*, 1996 ; Ryan & Matar, 1992).

En plus, comparativement à l'ammonitrate contenant uniquement de l'azote, l'engrais organique azoté utilisé en culture biologique est constitué d'un mélange équilibré d'acides aminés libres (acides aminés 42.5 %, azote organique 6.8 % et carbone organique 25.7 %). En effet, les acides aminés sont indispensables pour amorcer une activité métabolique intense (synthèse des protéines, chlorophylle, hormones, ATP, etc.). Ils interviennent aussi directement sur le mécanisme enzymatique de la nutrition et la croissance de la plante puisque la photosynthèse est

maintenue pendant plus longtemps. Il s'en suit une production plus élevée des carbohydrates solubles qui favorisent ultérieurement le remplissage des grains (Tejada & Gonzalez, 2003). Cette accumulation en carbohydrates a engendré une augmentation considérable des rendements en mode biologique surtout chez les variétés Khiar, Ben Bechir, INRAT69 et Swabaa Ilgia. Ceci résulte donc de la confrontation entre la demande des grains en biomasse et l'offre en assimilats carbonés au niveau de la culture. La quantité de biomasse disponible pour le remplissage des grains est dans la majorité des cas déterminée à partir de la production de celle-ci par la culture après la floraison (source majoritaire des assimilats carbonés pour les grains) et d'une fraction fixe de la biomasse à floraison, correspondant à la remobilisation des sucres solubles stockés dans les tiges avant ce stade (O'Leary *et al.*, 1985).

Dans le sol, les acides aminés stimulent l'activité microbienne et améliorent l'absorption des éléments nutritifs en stimulant les fonctions de résistance au stress parasitaire et climatique (brusque changement de température,...). Cet engrais organique azoté, utilisé en mode biologique, peut aussi aider à maintenir un feuillage vert en fin de saison, alors qu'en fertilisation conventionnelle les plants peuvent souffrir d'une déficience azotée, due à une sous fertilisation ou à un lessivage important des éléments nutritifs ou à une mauvaise assimilation dans certains cas. D'autant plus que les besoins en azote de la culture sont étroitement liés à l'accumulation de la biomasse (Lemaire & Gastal, 1997), ce qui génère une forte liaison entre la fonction de croissance et la fonction de nutrition azotée. Dans les feuilles par exemple, la limitation en azote assimilé chez certaines variétés conduites en mode conventionnel, a été pratiquement compensée par la réduction de la biomasse qui s'est traduite par un rendement en grains limité. Ceci a été observé surtout chez les variétés Jnah Khortifa, Karim et Biskri qui pourraient avoir des difficultés d'assimilation de l'azote attribuable probablement à la génétique de la plante. D'ailleurs, ces mêmes variétés sont classées les dernières de point de vue rendement même en mode biologique ce qui supporte cette hypothèse.

Le mode d'application de l'engrais influe également sur le comportement des différentes variétés. Il est à signaler que la fertilisation foliaire appliquée en mode biologique apporte une alternative d'alimentation minérale à la plante puisqu'elle améliore la solubilité et la mobilité des différents constituants de l'engrais appliqué à travers le phloème. Cette fertilisation consiste en une pulvérisation de fines gouttelettes sur le feuillage. Elle est basée sur le principe de fournir à la plante, par le feuillage, des éléments qu'elle ne peut puiser dans le sol en quantités suffisantes.

La pénétration à l'intérieur de la plante se fait à travers la cuticule, par les parois cellulaires ou par certaines membranes ce qui engendre un meilleur pouvoir de croissance des plantes (Tejada & Gonzalez, 2003). Par ailleurs, les variétés Khiar, Ben Bechir, INRAT69 ont été caractérisées par un port et un feuillage bien développés. En effet, concernant le feuillage, l'absorption des acides aminés libres est très rapide, ces derniers sont immédiatement utilisés dans les réactions biochimiques responsables du développement végétatif. Ceci procure à la plante une source d'énergie considérable ainsi qu'un rythme régulier de la croissance aboutissant à une meilleure productivité.

Sur les quatorze variétés étudiées, le rendement en grains a diminué en mode biologique par rapport au mode conventionnel pour treize variétés et a augmenté pour la variété Jnah Khortifa qui a enregistré une différence de 1.41 qx/ha en faveur du mode biologique. En effet, comme il a été mentionné, le rendement de la plupart des variétés a été affecté par le mode biologique. D'autre part, certaines d'entre elles se caractérisent par une diminution plus prononcée que d'autres. Ceci a été remarqué surtout chez Chili, Om Rabia, Razzak et Maghrebi avec une diminution du rendement égale à 20.74, 20.34, 18.29 et 16.13 % respectivement. D'autre part, la variété INRAT69 a enregistré un rendement égal à 23.98 qx/ha. Elle est caractérisée par une stabilité relative pour les deux modes de culture pour lesquels un écart de rendement de 3.85 % a été obtenu. Enfin, la variété Jnah Khortifa, connaissant la meilleure performance en mode biologique (19.7 vs 18.3 qx/ha), présente en revanche un rendement réduit quelque soit le mode de culture. Ainsi, les résultats des deux premières années d'essai (tableau 11) montrent que les variétés qui ont donné des performances supérieures en mode biologique sont par ordre décroissant, Khiar, Nasr, Ben Bechir, INRAT69 et Swabaa Algia avec des rendements de 27.25 ; 26.93 ; 26.27 ; 23.98 et 23.91 qx/ha respectivement. En revanche, Chili, Razzak, Biskri, Hamira et Jnah Khortifa ont présenté un rendement moyen faible, notamment en mode biologique, durant les deux années d'étude (tableau 11).

### **1-2- Evaluation du comportement variétal au cours de la première année d'essai**

La performance relative des différentes variétés vis-à-vis du mode de culture dépend de l'année telle qu'elle est décrite par l'effet significatif de l'interaction (mode de culture \* année) (annexe 1). En effet, les deux années d'étude sont caractérisées par des conditions climatiques très différentes. Au cours de la première année d'essai, le rendement était faible compte tenu des

conditions de sécheresse très marquée. L'analyse de la variance du rendement en grains de cette année d'essai 2001 (annexe 2) a révélé l'existence d'une différence significative ( $P < 0.001$ ) entre les deux modes de culture dans les deux sites.

Le rendement moyen des quatorze variétés (tableau 12) dans la station du Kef et de Bousalem est plus élevé en mode biologique qu'en mode conventionnel. Cette différence est de 2.7 et 2.4 qx/ha respectivement.

Il est important de souligner que sur quatorze variétés testées au cours de cette première année sèche (très faible pluviométrie associée à une évaporation forte), le mode biologique a amélioré le rendement par rapport au mode conventionnel des onze ou douze variétés dans les sites du Kef et de Bousalem respectivement (tableau 12). Ceci serait attribué probablement à l'action de l'engrais organique azoté liquide appliqué qui a favorisé l'esquive au stress hydrique des variétés conduites en mode biologique. Cette performance a été enregistrée surtout chez les variétés Khiar, Ben Bechir et INRAT69 avec des écarts les plus importants et ce dans les deux sites de cultures. Cela pourrait dû à leur meilleur absorption et valorisation du fertilisant foliaire appliqué et qui renferme une grande quantité d'acides aminés (42.5 %). Parmi les acides aminés déterminants surtout en période de déficit hydrique, la proline s'accumule dans les cellules racinaires agissant ainsi comme soluté pour l'ajustement osmotique afin de garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible. Elle peut aussi servir de réservoir de composés azotés et de carbone pour une utilisation ultérieure dans la croissance (Stewart & Lee, 1974 ; Bouzoubaa *et al.*, 2001). Ces trois variétés conduites en mode biologique ont eu donc la meilleure réponse vis-à-vis du fertilisant organique et ont édifié probablement de nouveaux mécanismes d'adaptation et de nouvelles compositions cellulaires pour affronter cette année de déficit hydrique et de forte chaleur.

**Tableau 12.** Rendements en grains (qx/ha) de quatorze variétés de blé dur conduites en modes conventionnel (MC) et biologique (MB) dans le site du Kef et Bousalem pendant les années d'essai 2001 et 2002.

Variété	Année d'essai 2001				Année d'essai 2002			
	Kef		Bousalem		Kef		Bousalem	
	MC	MB	MC	MB	MC	MB	MC	MB
Swabaa Algia	8,5 <sup>b</sup>	9,4 <sup>a</sup>	8,2 <sup>b</sup>	11,2 <sup>a</sup>	51,9 <sup>a</sup>	46,0 <sup>b</sup>	36,1 <sup>a</sup>	29,0 <sup>b</sup>
INRAT69	10,1 <sup>b</sup>	14,4 <sup>a</sup>	7,2 <sup>b</sup>	12,9 <sup>a</sup>	42,1 <sup>a</sup>	39,3 <sup>b</sup>	40,4 <sup>a</sup>	29,3 <sup>b</sup>
Badri	10,2 <sup>b</sup>	14,3 <sup>a</sup>	9,8 <sup>a</sup>	10,6 <sup>a</sup>	49,8 <sup>a</sup>	36,6 <sup>b</sup>	35,3 <sup>a</sup>	28,7 <sup>b</sup>
Ben Bechir	8,4 <sup>b</sup>	20,1 <sup>a</sup>	8,7 <sup>b</sup>	12,8 <sup>a</sup>	64,3 <sup>a</sup>	42,6 <sup>b</sup>	36,8 <sup>a</sup>	29,6 <sup>b</sup>
Maghrebi	11,9 <sup>a</sup>	11,1 <sup>a</sup>	10,6 <sup>a</sup>	11,1 <sup>a</sup>	47,1 <sup>a</sup>	36,8 <sup>b</sup>	38,0 <sup>a</sup>	31,3 <sup>b</sup>
Khlar	10,6 <sup>b</sup>	18,9 <sup>a</sup>	9,8 <sup>b</sup>	13,6 <sup>a</sup>	61,6 <sup>a</sup>	47,3 <sup>b</sup>	40,7 <sup>a</sup>	29,2 <sup>b</sup>
Om Rabia	10,0 <sup>b</sup>	14,3 <sup>a</sup>	8,4 <sup>b</sup>	13,5 <sup>a</sup>	57,6 <sup>a</sup>	34,2 <sup>b</sup>	36,8 <sup>a</sup>	27,9 <sup>b</sup>
Karim	7,2 <sup>b</sup>	8,7 <sup>a</sup>	7,9 <sup>a</sup>	8,6 <sup>a</sup>	39,8 <sup>a</sup>	34,7 <sup>b</sup>	34,8 <sup>a</sup>	28,3 <sup>b</sup>
Nasr	9,0 <sup>b</sup>	10,9 <sup>a</sup>	8,0 <sup>a</sup>	8,8 <sup>a</sup>	63,0 <sup>a</sup>	58,2 <sup>b</sup>	44,1 <sup>a</sup>	29,9 <sup>b</sup>
Hamira	8,5 <sup>a</sup>	5,8 <sup>b</sup>	13,4 <sup>a</sup>	10,1 <sup>b</sup>	48,7 <sup>a</sup>	39,0 <sup>b</sup>	27,1 <sup>b</sup>	28,1 <sup>a</sup>
Jnah Khortifa	5,8 <sup>a</sup>	6,4 <sup>a</sup>	6,2 <sup>b</sup>	11,0 <sup>a</sup>	36,1 <sup>a</sup>	35,1 <sup>b</sup>	25,2 <sup>b</sup>	26,4 <sup>a</sup>
Chili	7,9 <sup>a</sup>	7,3 <sup>a</sup>	6,3 <sup>b</sup>	10,2 <sup>a</sup>	52,1 <sup>a</sup>	37,4 <sup>b</sup>	39,2 <sup>a</sup>	28,8 <sup>b</sup>
Razzak	7,4 <sup>b</sup>	9,6 <sup>a</sup>	6,1 <sup>b</sup>	9,1 <sup>a</sup>	52,7 <sup>a</sup>	34,6 <sup>b</sup>	33,9 <sup>a</sup>	28,5 <sup>b</sup>
Biskri	7,7 <sup>b</sup>	9,2 <sup>a</sup>	7,6 <sup>a</sup>	8,3 <sup>a</sup>	43,7 <sup>a</sup>	35,0 <sup>b</sup>	26,6 <sup>b</sup>	28,2 <sup>a</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>8,81<sup>b</sup></b>	<b>11,46<sup>a</sup></b>	<b>8,43<sup>b</sup></b>	<b>10,83<sup>a</sup></b>	<b>50,7<sup>a</sup></b>	<b>39,8<sup>b</sup></b>	<b>35,3<sup>a</sup></b>	<b>28,8<sup>b</sup></b>
<b>ESM</b>	<b>0.058</b>		<b>0.036</b>		<b>0.050</b>		<b>0.070</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne au sein des deux modes de culture de chaque site, diffèrent significativement (P < 0,05).*  
*ESM : Erreur Standard de la Moyenne.*

D'une façon générale, que ce soit en mode biologique ou en mode conventionnel, les rendements en grains de toutes les variétés, sont inférieurs à la moyenne couramment obtenue dans ces régions. En effet, les stress environnementaux, notamment le stress hydrique, limitent sérieusement la croissance des plantes ainsi que la productivité végétale (Wang *et al.*, 2003). Une carence hydrique précoce durant la phase végétative réduit donc le nombre et la taille des talles du blé (Stark & Longley, 1986 ; Blum *et al.*, 1990 ; Davidson & Chevalier, 1990). Panozzo & Eagles (1999) ont rapporté que dans certains cas, le taux de remplissage de grain est inférieur dans les environnements secs par rapport aux environnements humides. En effet, les températures élevées enregistrées pendant l'année 2001 ont réduit la durée de la phase de remplissage des grains et ont limité l'accumulation des réserves dans les grains surtout pour les variétés Karim, Jnah Khortifa et Chili. Les températures élevées modifient également la vitesse potentielle de remplissage des grains en carbone et en azote (Jeuffroy *et al.*, 2000 ; Vos, 1985). En outre, ces températures élevées, accompagnées d'un manque de pluviométrie, provoquent un

stress hydrique qui pourrait réduire la croissance végétative, l'expansion de la surface foliaire, la durée de vie des feuilles (Jamieson *et al.*, 1998), ainsi que l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse (Brisson *et al.*, 1998). Par ailleurs, pour les stress hydrique et azoté, l'occurrence du stress repose sur la confrontation journalière de la demande de la culture avec l'offre du milieu pour l'élément considéré. Si l'offre est supérieure à la demande, le fonctionnement de la culture n'est pas affecté. Si à l'inverse, l'offre est inférieure à la demande, alors le facteur considéré devient limitant et les mécanismes de développement de la culture sont réduits.

### **1-3- Evaluation du comportement variétal au cours de la deuxième année d'essai**

En 2002, l'effet du mode biologique est très différent par rapport à la première année. En effet, lorsque les conditions climatiques sont favorables, le mode conventionnel dans les deux sites de culture donne des rendements plus élevés qu'en mode biologique. Les performances des quatorze variétés de blé dur évaluées sur les deux sites et selon les deux modes de culture sont présentées dans le tableau 14. Dans les deux sites, la différence est hautement significative ( $p < 0.001$ ) entre les deux modes de culture (annexe 2). Au Kef, la pluviométrie enregistrée au cours de l'année d'étude (650 mm) a été supérieure à la moyenne de la région (460 mm). En effet, sur ce même site, le rendement moyen est plus élevé en culture conventionnelle qu'en culture biologique (50.74 et 39.76 qx/ha respectivement) (tableau 12). A Bousalem également, le rendement moyen a enregistré un écart de 6.55 qx/ha en faveur du mode conventionnel par rapport au mode biologique (tableau 12). Contrairement à la première année d'étude, le rendement en grains obtenu en mode biologique a été toujours inférieur à celui obtenu en mode conventionnel sauf pour les variétés Hamira, Jnah Khortifa et Biskri et ce dans le site de Bousalem seulement (tableau 12). Outre son rôle dans la photosynthèse, dans le transport et l'accumulation des éléments nutritifs ainsi que dans la division cellulaire et la régulation thermique, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes cultivées (Riou, 1993). Les pluies régulièrement réparties et suffisantes surtout durant la phase de remplissage des grains, semblent avoir contribué à l'obtention des rendements relativement supérieurs. Au cours de cette phase, la pluie joue un rôle indispensable dans la vitesse de remplissage des grains et l'augmentation de leur taille (Triboi, 1990).

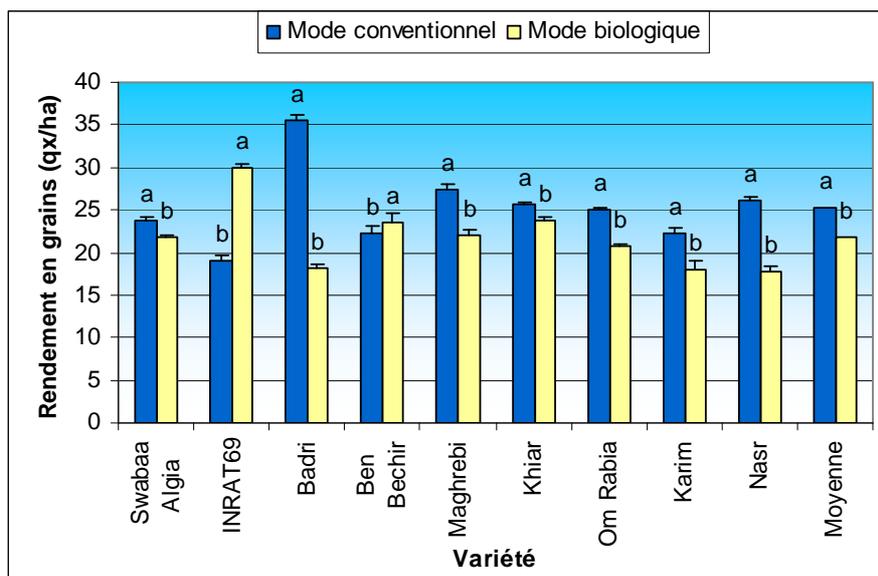
#### **1-4- Evaluation du comportement variétal au cours de la troisième année d'essai**

Les deux premières années d'essai ont été très différentes du point de vue des conditions pluviométriques. Une première année d'essai caractérisée par un fort déficit pluviométrique et une sécheresse très marquée au stade pré-floraison et une deuxième année d'essai qui se distingue par une pluviométrie annuelle exceptionnelle bien répartie. Cette variabilité du climat a permis d'étudier et d'évaluer le comportement des quatorze variétés dans deux situations différentes.

Ainsi, parmi ces quatorze variétés, neuf se sont bien comportées et ont bien réagi face aux contraintes physiques et biologiques rencontrées lors des deux années d'essai. Elles ont montré un intérêt pour être conduites surtout en mode biologique et par conséquent, elles ont été choisies pour entamer la troisième année d'essai. Il s'agit donc des variétés Swabaa Algja, INRAT69, Badri, Ben Bechir, Maghrebi, Khiar, Om Rabia, Karim et Nasr.

La variabilité du comportement des variétés au cours de la troisième année sous les différentes conduites a été confirmée. La comparaison des performances des variétés entre elles et entre les deux modes de culture, dans chaque milieu de production a permis de caractériser l'adaptation spécifique de ces variétés en mode biologique. Pendant cette troisième année d'essai, caractérisée aussi par des conditions climatiques favorables, l'effet du mode biologique est semblable par rapport à la deuxième année avec des rendements inférieurs qu'en mode conventionnel et ce pour les deux sites de culture. En effet, l'analyse de la variance du rendement en grains de cette année d'essai 2002-2003 (annexe 3) a montré une différence hautement significative ( $p < 0.001$ ) entre les deux modes de culture dans les deux sites.

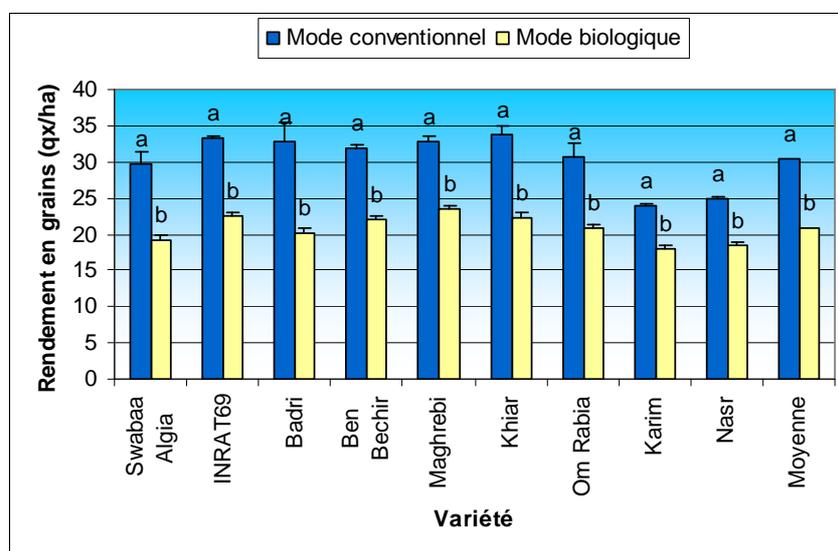
Au Kef, l'écart du rendement en grains entre les deux modes des cultures était de 13.7 % en faveur du mode conventionnel. En effet, les rendements moyens des deux modes étaient de 25.2 et 21.8 qx/ha en cultures conventionnelle et biologique respectivement (figure 21).



Les histogrammes suivis d'une lettre différente, diffèrent statistiquement au seuil de 5 %.

**Figure 21.** Rendements en grains (qx/ha) de neuf variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique dans le site du Kef pendant l'année d'essai 2003.

Tandis qu'à Bousalem le rendement moyen en culture conventionnelle était de 30.4 qx/ha et 20.8 qx/ha en culture biologique enregistrant un écart plus important de 31.7 % (figure 22).



Les histogrammes suivis d'une lettre différente, diffèrent statistiquement au seuil de 5 %.

**Figure 22.** Rendements en grains (qx/ha) de neuf variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique dans le site de Bousalem pendant l'année d'essai 2003.

Il est intéressant de remarquer la supériorité du rendement du mode biologique par rapport au mode conventionnel dans le site du Kef et ce pour deux variétés (figure 21). On constate ainsi que la variété INRAT69 a enregistré le meilleur rendement en mode biologique avec 29.9 qx/ha. Cette même variété est, au contraire, en dernière position en mode conventionnel avec 19 qx/ha enregistrant d'ailleurs l'écart le plus important entre les deux modes de conduite durant cette année. L'amplitude de variation du rendement de cette variété est donc très grande en passant d'un mode de conduite à un autre. Cette variété pourrait ainsi être prometteuse pour le mode biologique suivie par la variété Ben Bechir qui a réalisé aussi un rendement meilleur en mode biologique par rapport au mode conventionnel (23.6 > 22.3 qx/ha) confirmant ainsi leurs performances enregistrées durant les deux premières années d'essai. De plus, la distinction de ces deux variétés dans la conduite biologique pourrait être attribuée à leurs effets génotypiques observés, qui montrent que les fonctions de remobilisation (Lewicki & Chery, 1992) et d'absorption d'azote, étaient plus efficaces qu'aux autres variétés (Le Gouis *et al.*, 2000 ; Przulj & Momcilovic, 2001). Par ailleurs, Cox *et al.* (1986) rapportent que l'efficacité de remobilisation de l'azote est variable selon le génotype. Les variétés INRAT69 et Ben Bechir s'avèrent donc plus efficaces pour le transfert des assimilats de l'ensemble de la plante vers les grains. Pour conclure, cette efficacité de valorisation d'azote est influencée aussi bien par l'effet génotypique, mais également par le niveau de fertilisation (Cox *et al.*, 1986; Papakosta & Garianas, 1991) et les interactions génotype x environnement (Przulj & Momcilovic, 2001).

#### **1-5- Evaluation du comportement variétal au cours de la quatrième année d'essai**

En se basant sur les résultats obtenus pendant la troisième année d'essai et en les combinant avec les deux autres, nous avons pu confirmé d'avantage le comportement des neuf variétés testées. Ainsi, sept variétés sur neuf se sont bien comportées et ont bien réagi face aux différents environnements et à la variabilité climatique rencontrée au cours des trois années d'essai. Ces variétés ont été choisies pour être reconduites durant la quatrième année d'essai puisque leur rendement en grains était satisfaisant. Les deux autres variétés Karim et Nasr n'ont pas montré des performances supérieures.

La quatrième année d'essai a été caractérisée par des conditions climatiques favorables. Les rendements moyens en grains de cette année étaient aussi comparables aux deux années d'essai antérieures avec des rendements moyens plus élevés en mode conventionnel par rapport au mode

biologique et ce pour les deux sites de culture. En effet, l'analyse de la variance du rendement en grains de cette année (2004) (annexe 4) a révélé l'existence d'une différence hautement significative ( $p < 0.001$ ) entre les deux modes de culture dans les deux sites.

Au Kef, le rendement moyen est de 40.53 qx/ha en culture conventionnelle et 24.44 qx/ha en culture biologique (figure 19). Tandis qu'à Bousalem le rendement moyen en culture conventionnelle est de 30.59 qx/ha et 19.87 qx/ha en culture biologique (tableau 13).

**Tableau 13.** Rendements en grains (qx/ha) de sept variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique dans le site du Kef et Bousalem pendant l'année d'essai 2004.

Sites Variété	Kef		Bousalem	
	MC	MB	MC	MB
Swabaa Algia	39,4 <sup>a</sup>	24,3 <sup>b</sup>	28,9 <sup>a</sup>	19,3 <sup>b</sup>
INRAT69	43,3 <sup>a</sup>	25,3 <sup>b</sup>	32,1 <sup>a</sup>	21,7 <sup>b</sup>
Badri	31,7 <sup>a</sup>	23,6 <sup>b</sup>	31,8 <sup>a</sup>	18,7 <sup>b</sup>
Ben Bechir	38,6 <sup>a</sup>	28,6 <sup>b</sup>	21,6 <sup>a</sup>	17,2 <sup>b</sup>
Maghrebi	41,2 <sup>a</sup>	23,2 <sup>b</sup>	33,6 <sup>a</sup>	24,2 <sup>b</sup>
Khlar	45,3 <sup>a</sup>	25,1 <sup>b</sup>	31,5 <sup>a</sup>	17,1 <sup>b</sup>
Om Rabia	44,3 <sup>a</sup>	20,9 <sup>b</sup>	34,6 <sup>a</sup>	20,9 <sup>b</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>40,5<sup>a</sup></b>	<b>24,4<sup>b</sup></b>	<b>30,6<sup>a</sup></b>	<b>19,9<sup>b</sup></b>
<b>ESM</b>	<b>0.068</b>		<b>0.101</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne au sein des deux modes de culture de chaque site, diffèrent significativement ( $P < 0,05$ ).*  
*ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

Le rendement moyen en grains du mode biologique par rapport au mode conventionnel dans le site du Kef a été caractérisé par la distinction des variétés Ben Bechir et INRAT69 avec 28.6 et 25.3 qx/ha respectivement. Ces mêmes variétés semblent avoir un comportement satisfaisant en mode biologique pendant les années antérieures. Elles pourraient donc être considérées comme étant potentielles pour ce mode de culture d'autant plus que ceux sont, anciennes variétés et que l'on pourrait récupérer leur capacité d'adaptation locale aux différents environnements (sol, climat...). En effet, ces variétés sont caractérisées par leur rusticité et constituent un réservoir de gènes de résistance surtout au stress hydrique. Il est important d'élucider les mécanismes par lesquels les variétés locales et anciennes s'adaptent à de telles conditions.

## 2. Synthèse sur le rendement en grains des variétés de blé en mode biologique et en mode conventionnel

Sept variétés distinctives ont été gardées dans le cadre de cette étude sur quatre années d'essai. Il s'agit de Swabaa Algia, INRAT69, Badri, Ben Bechir, Maghrebi, Khiar et Om Rabia. Ces variétés ont été testées, évaluées et classées suivant les valeurs de rendement observées sur l'ensemble des deux sites selon deux modes de culture et au cours de quatre années d'expérimentation. L'analyse de la variance du rendement en grains est résumée à l'annexe 5. Il montre que l'expression du rendement en grains est influencée par plusieurs facteurs tels l'année, le mode de culture et le site avec une contribution de la variance totale estimée à 57.69, 18.44 et 10.02 % respectivement. En mettant en évidence les données recueillies durant les deux premières années, le mode de culture s'avère un des facteurs le plus important qui influence le rendement sa contribution étant passée de 1 à 18.44 %. D'après ce même tableau, son effet sur le rendement en grains est significatif ( $P < 0.001$ ).

En effet, sur l'ensemble des données (tableau 14), le rendement en grains du blé dur est plus élevé ( $P < 0.001$ ) lorsque les différentes variétés sont conduites en mode conventionnel (29.8 qx/ha) plutôt qu'en mode biologique (23.2 qx/ha).

**Tableau 14.** Rendements moyens en grains (qx/ha) de sept variétés de blé dur dans deux sites selon deux modes de culture, pendant quatre années d'essai.

Variété	Mode conventionnel	Mode biologique
Swabaa Algia	28,30 <sup>a</sup>	22,54 <sup>b</sup>
INRAT69	28,43 <sup>a</sup>	24,42 <sup>b</sup>
Badri	29,61 <sup>a</sup>	21,35 <sup>b</sup>
Ben Bechir	29,06 <sup>a</sup>	24,56 <sup>b</sup>
Maghrebi	30,31 <sup>a</sup>	22,89 <sup>b</sup>
Khiar	32,36 <sup>a</sup>	24,67 <sup>b</sup>
Om Rabia	30,77 <sup>a</sup>	21,65 <sup>b</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>29,83<sup>a</sup></b>	<b>23,15<sup>b</sup></b>
<b>ESM</b>	<b>0,18</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne diffèrent significativement ( $P < 0,05$ ).*  
*ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

Parmi les sept variétés testées, cinq sont anciennes et deux seulement sont améliorées en occurrence Khiar et Om Rabia. Ces dernières ont enregistré les meilleurs rendements moyens en mode conventionnel avec 32.4 et 30.9 qx/ha respectivement (tableau 14). En effet, ces variétés

améliorées sont exigeantes en intrants chimiques ce qui leur permet d'escompter des rendements supérieurs.

Concernant le mode biologique, trois variétés se sont distinguées en rendement en grains pendant les quatre années d'essai, à savoir Khiar (variété améliorée), Ben Bechir et INRAT69 (variétés anciennes) avec des rendements moyens en grains de 24.7 ; 24.6 et 24.4 qx/ha respectivement. En fait, la distinction des variétés anciennes en mode biologique est attendue. Ces variétés sont connues par leur adaptation locale, productivité et rusticité.

Lors des quatre années d'essai combinées (annexe 5), les sept variétés ont montré aussi une variation très significative ( $P < 0.001$ ) indiquant qu'elles ont eu un comportement différent dans chaque site (Allard & Bradshaw, 1964 ; Kang & Gorman, 1989) et que leur performance de production a été différente. Donc pour une variété donnée, le rendement peut varier en fonction de l'environnement, c'est-à-dire du climat, du type de sol et de la conduite culturale, notamment biologique ou conventionnelle. En effet, dans le site du Kef par exemple, le rendement moyen à travers les quatre années d'essais, varie de 25.41 à 30.88 qx/ha pour la variété Swabaa Algia pour le mode biologique et conventionnel respectivement. Il varie à Bousalem pour la même variété de 19.67 à 25.72 qx/ha pour le mode biologique et conventionnel respectivement. Cette variabilité du rendement est remarquable sans exception chez toutes les variétés.

Concernant les interactions du premier, du second et du troisième ordre, elles étaient significatives, indiquant que chaque environnement (E) de chaque année était différent et que les variétés ont répondu différemment par rapport à la variation environnementale (tableau 18). Ceci indique que les rendements des cultures ont varié selon le caractère génotypique de la variété, les conditions écologiques, la conduite culturale et la saison de culture. En effet, certaines variétés ont présenté une faible variabilité du rendement entre les différents environnements, alors que d'autres, à l'inverse, ont des rendements beaucoup plus variables. Ces interactions pourraient suggérer que certaines variétés testées stables réagissent d'une manière similaire aux différents environnements. Brancourt-Hulmel et Lecomte (1994) ont ainsi montré que les interactions  $V * E$  étaient principalement dues aux facteurs influençant le rendement du blé pendant la période de remplissage des grains et relativement peu aux facteurs influençant la phase levée-floraison. Un travail similaire sur le blé, mais réalisé dans des conditions environnementales différentes, a mis

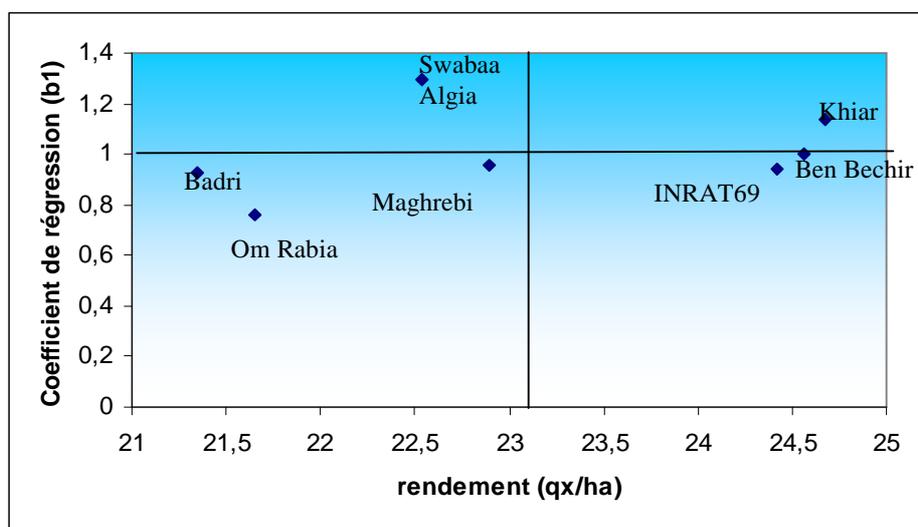
en évidence l'importance du poids de mille grains dans l'explication des variations de rendement (Baril, 1992).

Selon Kang & Gorman (1989), les interactions  $V * E$  réduiraient considérablement la signification de la corrélation entre les valeurs phénotypiques et génotypiques. Quand l'interaction est due à la variation provoquée par des facteurs environnementaux imprévisibles (fortes températures, déficit hydrique, maladies,...), le sélectionneur devrait développer largement des variétés adaptables. Suivant la stratégie envisagée (recherche de l'adaptation générale ou spécifique), nous retiendrons les génotypes les plus performants sur l'ensemble des milieux (adaptation générale) ou sur certains milieux en particulier (recherche de l'adaptation spécifique), individuellement ou par comparaison à des génotypes témoins. Certaines variétés sont donc bien adaptées à de nombreux environnements alors que d'autres sont particulièrement adaptées à des environnements spécifiques. Ces conclusions pourraient être appliquées surtout aux variétés Khiar, Ben Bechir et INRAT69 qui se sont bien comportées avec des performances jugées très satisfaisantes en mode biologique et ce pour les quatre années d'essais combinées (tableau 14).

### **3- Analyse de la stabilité**

L'utilisation des paramètres de stabilité peut être valable pour dégager les génotypes les plus stables. Le coefficient de régression (tableau 15) varie de 0.76 à 1.29 montrant que les sept variétés conduites en mode biologique, réagissent différemment aux effets d'environnement durant les quatre années d'essai. Les variétés Ben Bechir, Maghrebi et INRAT69 ont des pentes de régression proche de l'unité ( $b_i = 1$ ) suggérant qu'ils sont relativement plus stables que les autres variétés. Selon Eberhart & Russel (1966), la moyenne des carrés de la déviation de régression ( $S^2d_i$ ) est la vraie mesure de stabilité. Un génotype stable serait donc celui qui aurait un rendement plus élevé que la moyenne des rendements, un coefficient de régression  $b_i = 1$  et une moyenne des carrés de la déviation de régression,  $S^2d_i$  proche de 0 (Lin *et al.*, 1986 ; Crossa, 1990). Selon cette définition, seules les variétés Ben Bechir et INRAT69 peuvent être considérées comme étant stables en mode biologique pour les quatre années d'évaluation. Les autres variétés ne peuvent plus être stables quand les environnements deviennent défavorables, comme l'ont suggéré Finlay & Wilkinson (1963). L'analyse de la régression a donc une valeur prédictive qui permet ainsi l'estimation de la stabilité des génotypes (Assefa *et al.*, 1995).

Le groupement des géotypes sur la figure 23 a permis aussi d'identifier les mêmes variétés à savoir Ben Bechir et INRAT69 comme étant stables et très performantes à cause de leurs rendements élevés. La variété Khiar a été jugée instable parce que tout en ayant un rendement élevé, elle présente un coefficient de régression supérieur à 1 (1.14) c'est-à-dire qu'il est inférieur à la stabilité moyenne ( $b_i = 1$ ). Les variétés Swabaa Algia, Om Rabia sont cotées très instables tout en ayant des rendements plus faibles que la moyenne. Enfin, les variétés Maghrebi et Badri, sont assez stables bien que leurs rendements soient plus faibles que la moyenne.

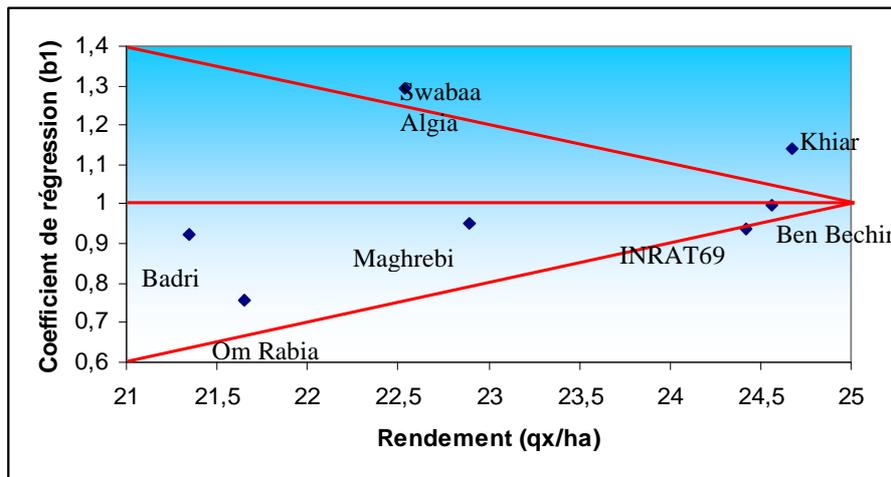


**Figure 23.** Relation entre l'adaptabilité des géotypes de blé dur biologique et leur rendement moyen dans deux environnements et durant quatre années d'essai.

**Tableau 15.** Analyse de stabilité du rendement des génotypes de blé dur biologique pour les années d'essais 2000-2004 en utilisant le rendement (Rdt) en qx/ha, le coefficient de variation (CV), le coefficient de régression linéaire ( $b_i$ ), les déviations de régression ( $S^2d_i$ ), l'écovalence de Wricke ( $W_1$ ), l'écovalence de Shukla ( $W_2$ ), l'écovalence de Plaisted & Peterson ( $W_3$ ), la supériorité de Lin & Binns ( $P_i$ ) ainsi que leur rang (R) et le rang moyen (RM).

<b>Var</b>	<b>R</b>	<b>Rdt</b>	<b>CV</b>	<b>R</b>	<b><math>b_i</math></b>	<b>R</b>	<b><math>S^2d_i</math></b>	<b>R</b>	<b><math>W_1</math></b>	<b>R</b>	<b><math>W_2</math></b>	<b>R</b>	<b><math>W_3</math></b>	<b>R</b>	<b><math>P_i</math></b>	<b>R</b>	<b>RM</b>
6- Khiar	1	24,67	39.96	6	1.14	5	2.58	6	242.04	6	9.45	6	8.26	6	2385.00	6	<b>6</b>
4- Ben Bechir	2	24,56	35.43	3	1.00	1	2.52	5	190.83	4	7.14	4	7.29	4	1739.90	4	<b>4</b>
2- INRAT69	3	24,42	33.52	2	0.94	3	2.42	4	183.84	3	6.82	3	7.16	3	1434.21	2	<b>2</b>
5- Maghrebi	4	22,89	36.81	5	0.95	2	2.79	7	238.83	5	9.30	5	8.20	5	1786.68	5	<b>5</b>
1- Swabaa Algia	5	22,54	48.4	7	1.29	7	1.68	3	268.55	7	10.65	7	8.76	7	2982.44	7	<b>7</b>
7- Om Rabia	6	21,65	29.80	1	0.76	6	1.26	1	175.18	2	6.43	2	7.00	2	1195.15	1	<b>1</b>
3- Badri	7	21,35	36.75	4	0.92	4	1.47	2	78.14	1	2.05	1	5.17	1	1630.03	3	<b>2</b>

En se basant sur le modèle général de stabilité de Finlay & Wilkinson (1963), les mêmes variétés INRAT69 et Ben Bechir s'avèrent les plus stables et sont adaptées à la plupart des environnements (figure 24). Les variétés Khiar et Swabaa Algia sont au-dessous de la stabilité moyenne mais sont spécifiquement adaptées aux environnements favorables. La variété Maghrebi présente une stabilité moyenne. Enfin, les variétés Badri et Om Rabia sont considérées comme adaptées aux environnements défavorables.



**Figure 24.** Relation entre le coefficient de régression et le rendement moyen en grains de 7 géotypes de blé dur biologique sur deux environnements et durant quatre années d'essai selon Finlay & Wilkinson (1963).

Quant à l'écovalence de Wricke, l'analyse combinée des quatre années d'essais (tableau 15) montre que les variétés du mode biologique les plus stables, ayant la plus basse écovalence, sont : Badri et Om Rabia avec cependant des rendements assez faibles 21.35 et 21.65 qx/ha respectivement. Il ressort de ce résultat que ces variétés seraient moins productives à l'environnement de l'essai. En tenant compte de ce paramètre associé avec le rendement en grains des quatre années d'essais, les variétés INRAT69 et Ben Bechir sont considérées comme étant les meilleures (24.42 et 24.56 qx/ha respectivement) enregistrant la troisième et la quatrième plus basse écovalence respectivement. Il est donc important de confirmer la stabilité de ces deux variétés comme il a été discuté précédemment.

Les résultats de la stabilité de la variance de Shukla (tableau 15) des différentes variétés conduites en mode biologique durant les quatre années paraissent être très semblables à la méthode de l'analyse de Wricke. Quelques différences ont été cependant observées quand

l'environnement est employé comme covariable. Encore une fois, les variétés INRAT69 et Ben Bechir sont les plus stables. Ces deux variétés ont donc réagi moins aux conditions environnementales des quatre années combinées durant leur conduite en mode biologique. Elles sont les plus aptes à être choisies en mode biologique.

Concernant l'analyse de Plaisted & Peterson (tableau 15), les variétés les plus stables sont Badri et Om Rabia. Toutefois, les rendements grainiers des ces mêmes variétés ont été classés les derniers. Ceci indique que ces variétés sont mal adaptées à l'environnement de l'essai. En se basant sur ce paramètre et le rendement grainier, les variétés INRAT69 et Ben Bechir se distinguent encore une fois par rapport aux autres variétés conduites en mode biologique.

Finalement, et du point de vue indice de supériorité variétale de Lin & Binns (tableau 15), les variétés INRAT69 et Ben Bechir confirment leur stabilité enregistrée par les autres paramètres. En effet, elles occupent le deuxième et quatrième rang respectivement quant à la supériorité et le troisième et deuxième rang respectivement concernant le rendement grainier. Il est à signaler que le génotype Khiar classé premier en rendement, a enregistré l'avant dernier indice de supériorité indiquant qu'il n'est pas stable.

Le tableau 15 combinant les différents paramètres de stabilité par rapport au rendement moyen enregistré, indique que les variétés Om Rabia, Badri et INRAT69 et Ben Bechir sont considérées les plus stables. Cependant, et pour les deux premières variétés, elles sont classées les dernières de point de vue rendement grainier (21.65 et 21.35 qx/ha respectivement) et par conséquent elles ne peuvent pas être prometteuses pour être conduites en mode biologique. Ainsi donc, le tableau 15 confirme que la variété INRAT69 est stable en moyenne suivie par la variété Ben Bechir. En outre cette dernière a eu le meilleur coefficient de régression avec un rendement classé deuxième (24.56 qx/ha). En revanche, la variété Khiar, classée première de point de vue rendement moyen des quatre années (24.67 qx/ha) ne peut pas être considérée stable puisqu'elle est classée l'avant dernière.

Il est à signaler que la stabilité du rendement de la variété INRAT69 pourrait s'expliquer par ses origines génétiques. En effet, cette variété est issue de parents anciens et locaux qui ont acquis cette adaptation à travers une évolution très longue sous les conditions du milieu tunisien. Quant à la variété Ben Bechir, elle se distingue aussi de sa large stabilité étant donné qu'elle valorise les bonnes années et garantit un rendement minimum aux cours des années sèches. Par ailleurs, le

bon comportement de cette variété vis-à-vis de la contrainte hydrique a été confirmé par Ben Salem (1988).

Afin de comparer les paramètres de stabilité étudiés, le coefficient de corrélation de rang de Spearman (Steel & Torrie, 1980) a été déterminé pour le coefficient de variation, le coefficient de régression, la déviation de régression, l'écovalence de Wricke (1962), la stabilité de la variance de Shukla (1972), l'écovalence de Plaisted & Peterson (1959), et l'indice de supériorité. D'une façon générale, le coefficient de corrélation de rang de Spearman varie de -1 (liaison négative) à +1 (liaison positive). Le tableau 16 montre que la corrélation est significative et positive entre la plupart des paramètres au cours des quatre années d'études. Ceci indique que les différents paramètres de stabilité suivent les mêmes tendances.

**Tableau 16.** Le coefficient de corrélation de rang de Spearman pour tous les paramètres de stabilité à travers les années d'essai.

	CV	$b_i$	$S^2d_i$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
CV						
$b_i$	0.62*					
$S^2d_i$	0.31	-0.06				
$W_1$	0.45	-0.02	0.94***			
$W_2$	0.41	-0.02	0.95***	0.99***		
$W_3$	0.62*	-0.01	0.86***	0.95***	0.92***	
$P_i$	0.94***	0.58*	0.27	0.42	0.38	0.59*

\*, \*\*\* : Différence significative au seuil de probabilité de 5 % et 1 % respectivement.

D'un autre côté, le tableau 17 combinant les différents paramètres de stabilité du mode conventionnel, montre que les variétés considérées les plus stables en mode biologique (INRAT69 et Ben Bechir) sont classées les dernières en mode conventionnel. En considérant aussi le rendement grainier moyen, les variétés Om Rabia et Maghrebi sont les plus stables en mode conventionnel suivies par la variété Khiar. Ceci confirme l'emploi des variétés améliorées en agriculture conventionnelle, qui donnent normalement des rendements supérieurs. Bien entendu, les deux variétés améliorées testées (Om Rabia et Khiar) figurent bien parmi les meilleures variétés tant au point de vue rendement qu'au point de vue stabilité dans ce mode conventionnel. Ce résultat pourrait traduire la forte exigence en intrants chimiques des variétés améliorées qui leurs permet ainsi d'escompter des rendements supérieurs.

D'après Mäder *et al.* (2002) et Lammerts van Bueren *et al.* (2002), le niveau du rendement en grains du blé biologique est habituellement 20 à 30 % plus bas comparé à celui conduit en système conventionnel. Par conséquent, les céréaliculteurs biologiques préfèrent la stabilité du rendement à un rendement important mais fluctuant. Pour cela, ils ont besoin des variétés fiables et stables pouvant faire face aux aléas climatiques, à la pression des maladies et aux systèmes des cultures sans fluctuer le rendement et la qualité des grains. En résumé les variétés INRAT69 et Ben Bechir pourraient répondre à cette exigence et pourraient ainsi être proposées pour être conduites en mode biologique à condition que leur qualité soit acceptable. Cette dernière fera l'objet du prochain chapitre.

**Tableau 17.** Analyse de stabilité du rendement des génotypes de blé dur conventionnel pour les années d'essais 2000-2004 en utilisant le rendement (Rdt) en qx/ha, le coefficient de variation (CV), le coefficient de régression linéaire ( $b_i$ ), les déviations de régression ( $S^2d_i$ ), l'écovalence de Wricke ( $W_1$ ), l'écovalence de Shukla ( $W_2$ ), l'écovalence de Plaisted & Peterson ( $W_3$ ), la supériorité de Lin & Binns ( $P_i$ ) ainsi que leur rang (R) et le rang moyen (RM).

<b>Var</b>	<b>R</b>	<b>Rdt</b>	<b>CV</b>	<b>R</b>	$b_i$	<b>R</b>	$S^2d_i$	<b>R</b>	$W_1$	<b>R</b>	$W_2$	<b>R</b>	$W_3$	<b>R</b>	$P_i$	<b>R</b>	<b>RM</b>
6- Khiar	1	32.36	51.24	6	1.15	5	1.54	2	218.72	3	6.58	3	12.36	3	5381.08	6	<b>4</b>
7- Om Rabia	2	30.90	50.98	5	1.09	2	2.11	4	184.54	2	5.04	2	11.72	2	4552.55	5	<b>2</b>
5- Maghrebi	3	30.31	41.32	1	0.86	4	2.01	3	240.53	4	7.57	4	12.77	4	2541.46	1	<b>2</b>
3- Badri	4	29.61	43.21	2	0.83	6	4.67	5	830.66	6	34.22	6	23.87	6	2879.34	2	<b>5</b>
4- Ben Bechir	5	29.06	59.79	7	1.17	7	4.70	6	844.28	7	34.83	7	24.13	7	6759.75	7	<b>7</b>
2- INRAT69	6	28.43	48.38	3	0.90	3	4.70	7	722.27	5	29.32	5	21.83	5	3056.15	3	<b>5</b>
1- Swabaa Algia	7	28.30	50.14	4	0.99	1	0.90	1	25.32	1	-2.154	1	8.72	1	3844.69	4	<b>1</b>

## **4- Qualité technologique et nutritionnelle des grains**

Dans le cadre de cette étude, la qualité du blé produit en mode biologique par rapport au conventionnel a été aussi évaluée. Les analyses relatives à la qualité ont été effectuées sur des échantillons de grains prélevés à la récolte de la deuxième année d'essai et ce, à partir des quatorze variétés issues de la station expérimentale du Kef. Les critères de qualité des grains récoltés jouent un rôle important dans la comparaison de variétés du blé dur en culture biologique. En effet, les grains pourraient être vendus directement à des boulangeries spécialisées, à des meuneries, à des usines de transformation ou au consommateur. Ainsi, les variétés sont choisies en fonction de la conformation des grains et de leur comportement à la mouture et à la panification. L'objectif principal de cette partie est donc de mettre en place un outil de classement et de sélection des farines biologiques selon leurs aptitudes technologiques. Pour ce faire des analyses physico-chimiques puis rhéologiques ont été réalisées.

### **4-1- Analyses physico-chimiques**

Les méthodes d'analyse physico-chimiques, présentées dans ce chapitre ont été mises au point pour définir la qualité technologique selon différents critères : la composition de la farine (Matière sèche, teneurs en protéines et en acides aminés, teneur en cendres et en macro et micro-éléments), l'activité amylasique et la caractérisation du gluten.

#### ***4-1-1- Poids spécifique (PS)***

Le PS représente un critère de la valeur meunière des grains. Il s'agit souvent d'un facteur qui influence la vente du produit récolté. Des PS trop restreints témoignent d'un taux d'humidité trop élevé, de grains trop allongés, de téguments épais et sales, d'amandes molles et farineuses, de grains atrophiés et ratatinés, de parasites, de graines cassées, de germination sur pied ainsi que d'un petit pourcentage d'impuretés. En effet, d'après les textes réglementaires, le blé dur est considéré non commercialisable s'il a un PS inférieur à 76.5 kg/hl.

Par ailleurs l'analyse de la variance du PS des grains (annexe 6) a montré une différence hautement significative ( $P < 0.001$ ) entre les lots issus des deux modes de culture. L'écart entre les PS moyens des grains issus des deux modes des cultures était de 2.6 % en faveur du mode

biologique. En effet, les PS moyens étaient de 78.3 et 80.3 kg/hl en cultures conventionnelle et biologique respectivement (tableau 18).

Compte tenu de ce qui précède, nous constatons que les PS de la totalité des échantillons issus des variétés biologiques répondent à cette exigence et ce, contrairement à certaines variétés conduites en mode conventionnel (tableau 18).

**Tableau 18.** Poids spécifique moyen (kg/hl) et matière sèche moyenne (%) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur selon deux modes de culture.

Variété	Poids spécifique			Humidité		
	MC	MB	D (%)	MC	MB	D (%)
Swabaa Algia	72.7 <sup>b</sup>	76.4 <sup>a</sup>	+5.1	10.14 <sup>a</sup>	10.15 <sup>a</sup>	+0,10
INRAT69	77.7 <sup>b</sup>	79 <sup>a</sup>	+1.7	10.54 <sup>a</sup>	9.36 <sup>b</sup>	-11.15
Badri	76.9 <sup>b</sup>	79.3 <sup>a</sup>	+3.1	10.62 <sup>a</sup>	10.43 <sup>b</sup>	-1.74
Ben Bechir	77.7 <sup>b</sup>	80.9 <sup>a</sup>	+4.1	10.74 <sup>a</sup>	9.95 <sup>b</sup>	-7.36
Maghrebi	75.5 <sup>b</sup>	77.7 <sup>a</sup>	+2.9	9.49 <sup>a</sup>	9.31 <sup>b</sup>	-1.90
Khlar	79.7 <sup>b</sup>	80.9 <sup>a</sup>	+1.5	9.40 <sup>b</sup>	10.45 <sup>a</sup>	+11.18
Om Rabia	79 <sup>b</sup>	82.1 <sup>a</sup>	+3.9	9.39 <sup>b</sup>	10.07 <sup>a</sup>	+7.19
Karim	79.7 <sup>a</sup>	80.1 <sup>a</sup>	+0.5	10.68 <sup>a</sup>	10.65 <sup>a</sup>	-0.33
Nasr	79.3 <sup>b</sup>	81.9 <sup>a</sup>	+3.3	10.38 <sup>a</sup>	10.21 <sup>b</sup>	-1.59
Hamira	80.5 <sup>a</sup>	80.3 <sup>a</sup>	-0.2	10.34 <sup>a</sup>	10.33 <sup>a</sup>	-0.15
Jnah Khortifa	79.5 <sup>b</sup>	80.7 <sup>a</sup>	+1.5	10.20 <sup>b</sup>	11.01 <sup>a</sup>	+7.94
Chili	81.3 <sup>a</sup>	80.9 <sup>a</sup>	-0.5	10.43 <sup>b</sup>	10.73 <sup>a</sup>	+2.88
Razzak	78.4 <sup>b</sup>	81 <sup>a</sup>	+3.3	10.19 <sup>b</sup>	10.42 <sup>a</sup>	+2.26
Biskri	77.7 <sup>b</sup>	82.6 <sup>a</sup>	+6.3	9.89 <sup>a</sup>	9.74 <sup>b</sup>	-1.57
<b>Moyenne</b>	<b>78.3<sup>b</sup></b>	<b>80.3<sup>a</sup></b>	<b>+2.6</b>	<b>10.17<sup>a</sup></b>	<b>10.20<sup>a</sup></b>	<b>+0,26</b>
<b>ESM</b>		<b>0.03</b>			<b>0.008</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne au sein de chaque paramètre, diffèrent significativement (P < 0.05)*  
*ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

Il est à signaler que le PS moyen a été supérieur pour le mode biologique plutôt que le mode conventionnel et ce, pour douze variétés (tableau 18). La variété Biskri s'est distinguée puisqu'elle est associée à une augmentation de PS la plus élevée de l'ordre de 6.3 % avec 77.7 à 82.6 kg/hl sous les modes conventionnel et biologique respectivement. Par ailleurs, nous constatons que les grains issus de cette variété sont lourds et vitreux indiquant un remplissage satisfaisant. Cette variété pourrait donc donner un rendement meunier supérieur (Godon & Loisel, 1984) pour le mode biologique. Elle a été suivie par les variétés Om Rabia et Nasr qui ont produit les grains les plus denses en biologique par rapport au conventionnel (82.1 et 81.9 kg/hl respectivement). Le PS dépend donc de la variété mais aussi des conditions de remplissage du grain, de maturation et de récolte.

#### **4-1-2- Humidité**

Dans le cas des farines étudiées, les valeurs en humidité donnent des informations sur la stabilité de la décomposition de la semoule entre le moment de la récolte des grains et celui de son utilisation expérimentale. Plus une semoule est humide, plus les éléments constitutifs se dégradent rapidement. D'après le tableau 18, la teneur moyenne en eau des grains issus des deux modes de culture est très similaire de l'ordre de 10.17 pour le mode conventionnel et 10.2 pour le mode biologique. Par ailleurs, l'annexe 6 indique qu'il n'y a pas de différence significative ( $P > 0.05$ ) entre ces deux modes. Néanmoins, il faut signaler les valeurs obtenues avec les variétés INRAT69 et Ben Bechir en mode biologique par rapport au conventionnel. En effet, ces deux variétés ont enregistré les écarts les plus importants (11.15 et 7.36 % respectivement) et sont classées parmi les variétés qui ont la plus faible teneur en eau en mode biologique (9.36 et 9.95 % respectivement). D'après le même tableau, on remarque aussi que huit variétés sur quatorze se caractérisent par une teneur en eau plus basse en mode biologique par rapport au mode conventionnel. Ceci est conforme avec les travaux de Lairon *et al.* (1982) obtenus sur la pomme de terre, le poireau et la laitue. Ces variétés sont par conséquent aptes à une bonne conservation. Selon Gélinas *et al.* (1998), une semoule commence à se dégrader après une période de stockage d'un mois, pour une teneur en humidité de 15 %. Ceci se traduit ainsi par une mauvaise répartition du gaz lors de la fermentation et un déséquilibre de l'oxydation des groupements thiols qui conduit normalement à la formation de ponts disulfure. Le même tableau 24 montre une différence très significative ( $P < 0.001$ ) entre les variétés puisque les valeurs moyennes d'humidité s'échelonne entre 9.31 et 11.01 % en mode biologique pour les variétés Maghrebi et Jnah Khortifa respectivement. Quant au mode conventionnel, l'échelonnement de l'humidité varie de 9.39 à 10.74 chez les variétés Om Rabia et Ben Bechir respectivement.

La mesure de l'humidité du blé présente donc un double intérêt économique et sanitaire. Du point de vue économique, le prix de la semoule est défini pour une teneur en eau bien déterminée. Côté sanitaire, la bonne conservation de la semoule dépend de la teneur en eau.

#### **4-1-3- Teneur en protéines**

Dans le cadre de notre travail, la teneur en protéine est affectée par le mode de conduite. En effet, l'annexe 6 montre qu'il y a une différence significative entre les deux modes de conduite ( $P < 0.001$ ), 13.91 et 13.51 %/MF pour les modes conventionnel et biologique respectivement. Ce résultat peut être attribué à la fertilisation azotée qui est différente tant sur le plan quantité que le mode de son application.

Woëse *et al.* (1997) et Hemingway (1999) ont rapporté des résultats comparables en indiquant que la faible teneur en protéines brutes devrait être obtenue chez les variétés conduites en mode biologique. Ces auteurs attribuent cette faible teneur en protéines à la diminution de l'apport azoté par suite du changement du mode de conduite des céréales mais aussi à la remobilisation réduite des protéines foliaires vers les grains. La faible assimilation de l'azote minéral pendant la formation du grain en raison d'une faible disponibilité de cet élément dans les conditions biologiques pourrait être aussi une raison parmi d'autres de la plus faible teneur en protéines dans les grains.

Contrairement à ce que ces auteurs ont suggéré, nous avons enregistré des valeurs de protéines brutes élevées en mode biologique par rapport au conventionnel chez six variétés. C'est le cas surtout des variétés Chili et Razzak avec un écart de 20.54 et 5.51 % respectivement en faveur de la conduite biologique (tableau 19). Ceci pourrait être expliqué par la meilleure valorisation de ces variétés des apports réguliers de l'engrais organique azoté (5 fractions) depuis le stade levée ce qui leur permet ainsi de s'échapper au stress nutritionnel. Autrement dit, et du point de vue génotypique, ces variétés se caractérisent par une meilleure absorption et remobilisation de l'azote. En revanche, les plantes conduites en mode conventionnel n'ont bénéficié que d'apport d'engrais azoté ammoniacal-nitrique en deux fractions seulement. Par ailleurs, Gate (1995) a indiqué que le fractionnement de la fertilisation au cours du cycle du blé dur agit sur la teneur en protéines. En effet, l'absorption de l'azote varie en fonction du stade de croissance et c'est pendant la période de montaison que les besoins azotés de la culture sont les plus importants et doivent être satisfaits pour ne pas pénaliser le rendement.

**Tableau 19.** Teneur en protéines des semoules entières issues des 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique (%/MF).

Variété	MC	MB	D (%)
Swabaa Algia	13.48 <sup>a</sup>	13.53 <sup>a</sup>	+0,37
INRAT69	14.51 <sup>a</sup>	14.19 <sup>b</sup>	-2,21
Badri	17.69 <sup>a</sup>	16.52 <sup>b</sup>	-6,61
Ben Bechir	12.46 <sup>a</sup>	10.67 <sup>b</sup>	-14,37
Maghrebi	14.32 <sup>a</sup>	13.95 <sup>b</sup>	-2,58
Khiair	15.08 <sup>a</sup>	11.06 <sup>b</sup>	-26,66
Om Rabia	12.97 <sup>a</sup>	12.41 <sup>b</sup>	-4,32
Karim	11.46 <sup>b</sup>	11.88 <sup>a</sup>	+3,66
Nasr	12.02 <sup>b</sup>	12.48 <sup>a</sup>	+3,83
Hamira	16.15 <sup>b</sup>	16.51 <sup>a</sup>	+2,23
Jnah Khortifa	16.28 <sup>b</sup>	16.75 <sup>a</sup>	+2,89
Chili	12.51 <sup>b</sup>	15.08 <sup>a</sup>	+20,54
Razzak	11.61 <sup>b</sup>	12.25 <sup>a</sup>	+5,51
Biskri	14.21 <sup>a</sup>	11.88 <sup>b</sup>	-16,40
<b>Moyenne</b>	<b>13.91<sup>a</sup></b>	<b>13.51<sup>b</sup></b>	<b>-2.88</b>
<b>ESM</b>		<b>0.008</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne diffèrent significativement (P < 0.05).  
ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

Wang *et al.* (1998) ont montré que les fortes applications d'azote entraînent une augmentation de la concentration des protéines brutes.

L'examen de l'annexe 6 révèle une différence significative de la teneur en protéines entre les variétés du blé dur ( $P < 0.001$ ). Ceci est remarquable surtout chez les variétés Badri et Karim avec une teneur en protéines de 17.69 et 11.46 %/MF respectivement (tableau 19). En effet, la variété est considérée comme la source de variation de la qualité et du rendement en grains (Luo *et al.*, 1999). Cette différence de la teneur en protéines chez les 14 variétés de blé dur étudiées nous permet de prédire que chacune d'elles va avoir des propriétés technologiques et nutritionnelles différentes de celles des autres. Par ailleurs, Feillet (2000) a expliqué cette différence par le fait que les protéines résultent de l'expression de nombreux gènes et que chaque variété présente une très large variabilité allélique existant à chacun de ses loci. Ainsi, plusieurs travaux (Loffer & Bush 1982, Diehl *et al.*, 1978) ont indiqué que la teneur en protéines des grains de blé est hautement héréditaire et est déterminée par plusieurs gènes. Dans ce même cadre, Gate (1995) a attribué les différences variétales en teneur en protéines à des aptitudes variables entre les génotypes tant pour l'absorption que pour la remobilisation de l'azote. En plus, l'existence de certains gènes (gène *Rht1*) chez certaines variétés de blé dur contribue à améliorer la teneur en protéines des grains sans affecter le rendement. Ainsi,

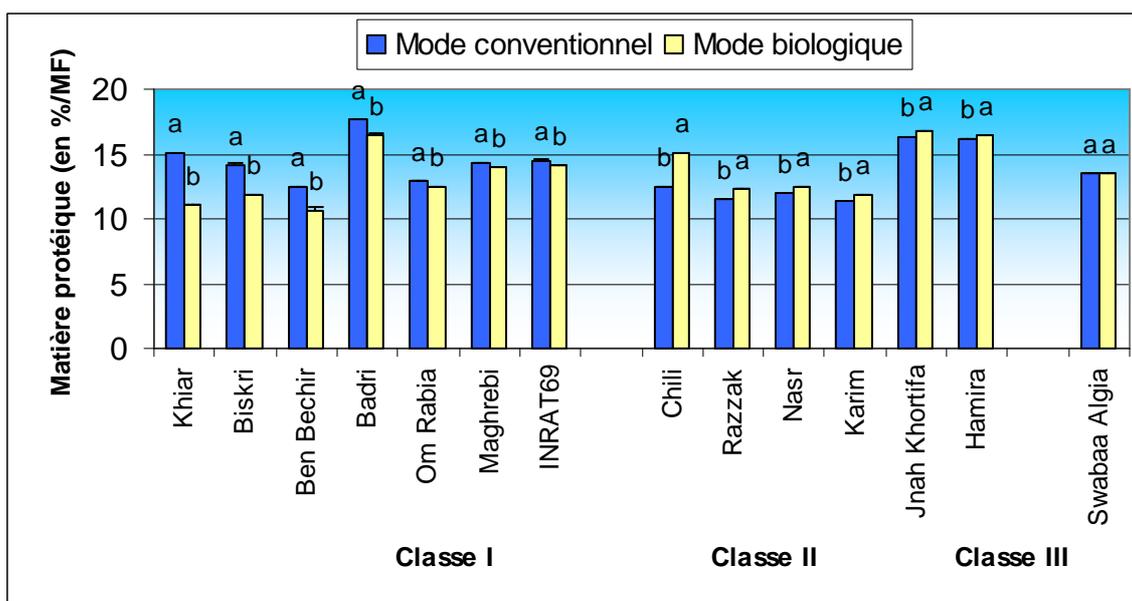
l'aptitude à accumuler certains types de réserves comme les protéines est d'ordre génétique (Boyeldieu, 1980). Par ailleurs, Carrillo *et al.* (1990 a, 2000) rapportent que pour le blé dur, les différences de qualité entre les variétés sont fortement tributaires de leur composition allélique pour les protéines stockées au niveau de l'endosperme. En effet, une des catégories les plus importantes des protéines est *Glu-3* codé par les sous unités de gluténine LMW. Elle a montré ainsi, un effet plus prononcé que *Glu-1*, codé par HMW, sur la variation protéique de plusieurs variétés de blé dur (Carrillo *et al.*, 1990 a; Ruiz & Carrillo, 1995).

D'après Quaglia (1988), le blé dur est appréciable lorsque le taux de protéines dépasse 13 %. Nos résultats (tableau 19) montrent que la teneur moyenne en protéines dépasse cette norme tant en mode conventionnel qu'en mode biologique (13.91 et 13.51 %/MF respectivement). En effet, la richesse en protéines est un indice de bonne qualité culinaire (Dexter *et al.*, 1980), bien que cela n'explique qu'environ 1/3 de la variabilité de cette qualité (Damidaux & Feillet, 1978 ; Dexter *et al.*, 1980). Par ailleurs, les valeurs enregistrées surtout des variétés Jnah Khortifa, Badri, Hamira et INRAT69 prévoient une qualité supérieure des pâtes ou du couscous et ce, pour les deux modes de culture.

La différence de la teneur en protéines totales chez les différentes variétés de blé dur et dans les deux modes de culture conventionnel et biologique est confirmée par l'interaction mode x variété qui est significative ( $P < 0.001$ ) (annexe 6). Baker & Kosmolak (1977), ont notamment montré que l'interaction entre le génotype et l'environnement est significative vu que le génotype a un large effet sur la qualité du gluten et l'environnement a un effet sur la teneur en protéines.

La figure 25 nous permet de distinguer trois classes de variétés :

- Une première classe renfermant les variétés qui présentent des teneurs en protéines plus importantes avec le mode conventionnel qu'avec le mode biologique.
- Une deuxième classe où les variétés se caractérisent par un comportement inverse c'est à dire qu'elles contiennent plus de protéines lorsqu'elles sont cultivées en mode biologique en comparaison au mode conventionnel.
- Une troisième classe composée par des variétés dont la teneur en protéines ne semble pas être affectée par le mode de culture dans la mesure où on ne note aucune variation.



*Les histogrammes suivis d'une lettre différente, diffèrent statistiquement au seuil de 5 %.*

**Figure 25.** Teneur en matières protéiques des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur selon les modes de culture conventionnel et biologique.

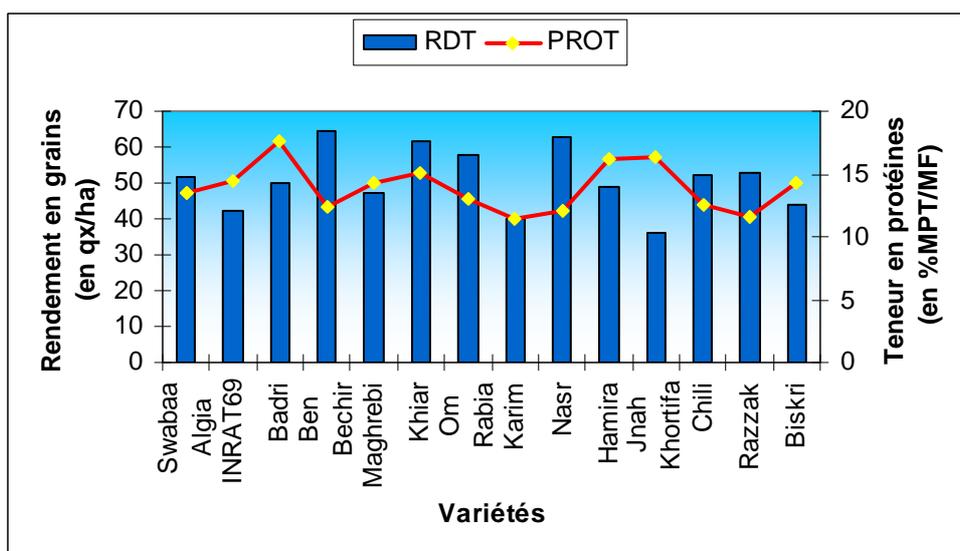
La première classe est représentée par ordre décroissant d'écart entre les deux modes de culture. Cette classe comporte les variétés Khيار, Biskri, Ben Bechir, Badri, Om Rabia, Maghrebi et INRAT69. La diminution des teneurs en protéines dans ces variétés lorsqu'elles sont cultivées en mode biologique peut être attribuée à plusieurs facteurs. Tout d'abord, la diminution d'apports azotés suite au changement de mode d'application de fertilisants, pourrait influencer directement cette baisse des teneurs en protéines. Puis, les premiers apports d'azote ont été donnés précocement (stade levée). Enfin, suite à la faible disponibilité d'azote, la remobilisation des protéines foliaires vers le grain et l'assimilation de l'azote minéral au cours de la formation du grain, pourraient être faibles.

La deuxième classe est représentée aussi par ordre décroissant d'écart entre les deux modes de culture. Cette classe comporte les variété Chili, Razzak, Nasr, Karim, Jnah Khortifa et Hamira. Ce résultat peut être expliqué par les hypothèses formulées par Gate (1995) correspondant à une bonne capacité de remobilisation d'azote chez certaines variétés lorsque sa quantité disponible dans le milieu est faible et une variabilité de l'aptitude d'absorption d'azote, ce qui nous encourage à pratiquer le mode biologique pour ces variétés de blé dur. De ce fait, on peut suggérer le recours à ces variétés comme améliorants pour corriger l'insuffisance en protéines des variétés de blé dur biologique citées à la première classe.

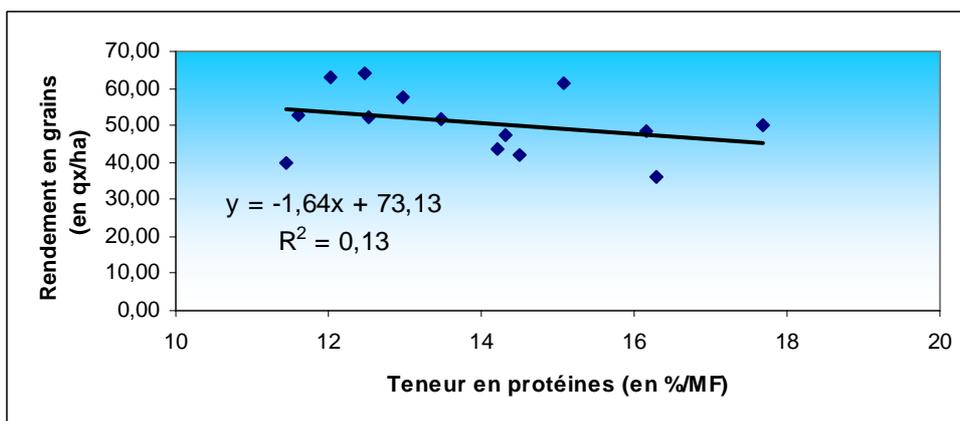
Ces deux classes affirment les conclusions de Fowler et De la Roche (1975) et celles de Porceddu *et al.* (1983) qui considèrent que la richesse protéique du grain est un caractère plurifactoriel dépendant non seulement du génotype mais aussi des disponibilités d'azote et des conditions du milieu.

Quant à la dernière classe, elle est représentée uniquement par la variété Swabaa Algia chez laquelle la teneur en protéines est similaire dans les deux modes de culture. Ceci s'accorde avec les travaux de Boyeldieu (1980) qui a montré que la constitution des protéines semble être sous la seule dépendance des facteurs génétiques vu que le nombre et la mobilité des fractions constitutives des protéines restent sans changement pour une même variété quelque soit le traitement agronomique auquel elle est soumise. Ces résultats peuvent être également expliqués par le métabolisme de l'azote dans la plante de blé dur. En effet, lorsque les besoins en azote de la plante sont peu importants, les étapes de réduction et de constitution de la forme organique de l'azote (les acides aminés et les protéines) n'auront pas lieu et l'azote sera stocké dans les vacuoles sous forme nitrique pour constituer des réserves. Autrement dit, lorsque l'azote ne limite pas la croissance, une nouvelle absorption se traduit par une mise en réserve des nitrates s'effectue à la base de la tige (Gate, 1995).

Finalement, plusieurs auteurs (Payne *et al.*, 1987 ; Brunori *et al.*, 1989 ; Carrillo *et al.*, 1990 b) considèrent qu'il existe une relation négative entre le rendement et la teneur en protéines, même si cette relation n'est pas toujours forte. Dans notre cas, cette relation est confirmée par la corrélation négative entre les deux variables (Figures 26 et 27) et ce pour les deux modes de culture.



**Figure 26.** Relation entre teneur en protéines et rendement en grains pour quatorze variétés de blé dur conventionnel issues de l'année d'essai 2002.



**Figure 27.** Répartition des valeurs du rendement en grains en fonction de la teneur en protéines des quatorze variétés de blé dur conventionnel issues de l'année d'essai 2002.

Ainsi, les variétés Badri et Jnah Khortifa se distinguent de leur capacité à atteindre un taux de protéines élevé (17.69 et 16.28 %/MF respectivement) mais avec un rendement relativement réduit. A l'inverse, Ben Bechir et Nasr ont un fort potentiel de rendement mais présentent une faible teneur en protéines (12.46 et 12.02 %/MF respectivement). Enfin, le comportement de la variété Swabaa Algja est intermédiaire (13.48 %/MF).

Les tentatives pour améliorer simultanément le rendement et la teneur en protéines n'ont pas été couronnées de succès, en partie parce qu'on ne connaît pas les causes physiologiques et génétiques de cette corrélation négative. Mais pour pouvoir atteindre les teneurs en protéines beaucoup plus élevées, il est nécessaire d'accepter des rendements parfois moins importants. Ceci est tout particulièrement vrai avec les blés à haute teneur en protéines ou blés de force.

Pour envisager leur production, le prix de vente de ces variétés doit pouvoir compenser la réduction notable du rendement. Il serait ainsi intéressant de garantir aux agriculteurs un prix plus attractif pour leurs productions. Pour ce faire, l'application d'un cahier des charges rigoureux imposant l'utilisation de certaines variétés avec un contrat au préalable, devrait se développer. Une classe « blé dur protéines » devrait ainsi être créée. De ce fait, la productivité est absolument à pondérer par la qualité protéique.

#### 4-1-3- Teneur en acides aminés totaux

La composition en acides aminés des 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique est donnée dans les tableaux 20 et 21.

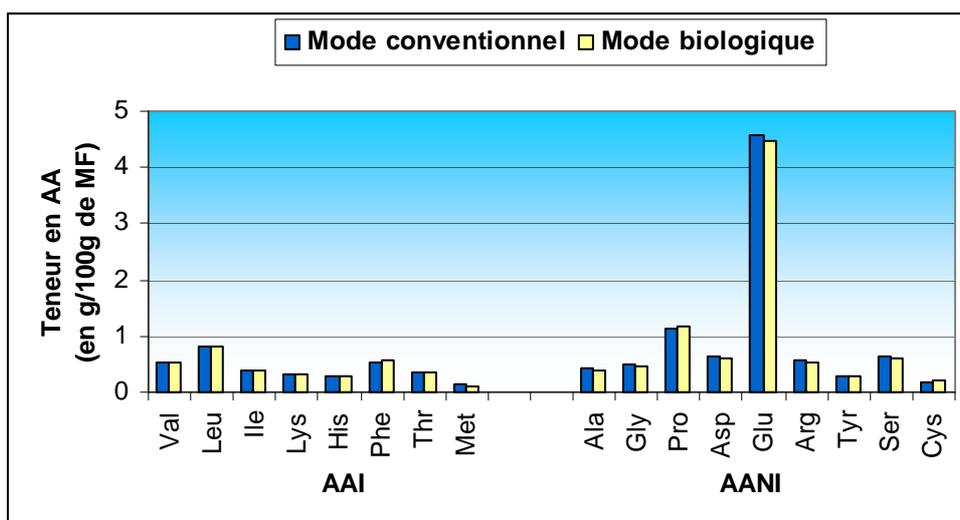
**Tableau 20.** Composition en acides aminés indispensables (en g/100g MF) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

Variété	Mode	Val	Leu	Ile	Lys	His	Phe	Thr	Met	Total
Swabaa Algia	MC	0,528	0,786	0,365	0,324	0,297	0,517	0,342	0,109	<b>3,269</b>
	MB	0,518	0,811	0,388	0,323	0,304	0,550	0,351	0,111	<b>3,358</b>
INRAT69	MC	0,565	0,822	0,398	0,350	0,312	0,555	0,374	0,149	<b>3,526</b>
	MB	0,543	0,845	0,411	0,344	0,320	0,592	0,383	0,074	<b>3,510</b>
Badri	MC	0,661	1,006	0,498	0,383	0,375	0,677	0,425	0,169	<b>4,194</b>
	MB	0,618	0,966	0,490	0,360	0,361	0,697	0,407	0,159	<b>4,057</b>
Ben Bechir	MC	0,464	0,729	0,348	0,288	0,257	0,491	0,324	0,146	<b>3,048</b>
	MB	0,437	0,686	0,325	0,285	0,256	0,452	0,303	0,086	<b>2,829</b>
Maghrebi	MC	0,524	0,840	0,416	0,334	0,299	0,608	0,374	0,166	<b>3,561</b>
	MB	0,538	0,850	0,424	0,341	0,315	0,585	0,370	0,112	<b>3,534</b>
Khiar	MC	0,560	0,901	0,438	0,331	0,318	0,652	0,392	0,189	<b>3,782</b>
	MB	0,424	0,666	0,307	0,279	0,246	0,434	0,291	0,060	<b>2,708</b>
Om Rabia	MC	0,506	0,792	0,382	0,309	0,279	0,530	0,350	0,159	<b>3,307</b>
	MB	0,491	0,764	0,369	0,299	0,281	0,505	0,334	0,110	<b>3,153</b>
Karim	MC	0,432	0,657	0,322	0,301	0,238	0,459	0,310	0,120	<b>2,839</b>
	MB	0,441	0,689	0,333	0,297	0,257	0,466	0,301	0,115	<b>2,900</b>
Nasr	MC	0,461	0,715	0,338	0,293	0,252	0,488	0,319	0,128	<b>2,994</b>
	MB	0,490	0,753	0,365	0,296	0,275	0,501	0,315	0,110	<b>3,106</b>
Hamira	MC	0,616	0,930	0,453	0,363	0,350	0,626	0,408	0,160	<b>3,906</b>
	MB	0,604	0,955	0,461	0,366	0,360	0,670	0,422	0,119	<b>3,958</b>
Jnah Khortifa	MC	0,624	0,933	0,447	0,357	0,359	0,603	0,403	0,154	<b>3,880</b>
	MB	0,609	0,966	0,471	0,359	0,367	0,654	0,416	0,124	<b>3,965</b>
Chili	MC	0,481	0,725	0,343	0,298	0,273	0,450	0,320	0,126	<b>3,016</b>
	MB	0,584	0,878	0,429	0,320	0,327	0,608	0,366	0,149	<b>3,661</b>
Razzak	MC	0,446	0,684	0,332	0,280	0,243	0,454	0,306	0,152	<b>2,898</b>
	MB	0,462	0,730	0,341	0,302	0,271	0,491	0,316	0,103	<b>3,017</b>
Biskri	MC	0,566	0,844	0,420	0,351	0,313	0,547	0,372	0,164	<b>3,576</b>
	MB	0,475	0,720	0,354	0,288	0,266	0,493	0,314	0,097	<b>3,007</b>

**Tableau 21.** Composition des acides aminés non indispensables « AANI » (en g/100g MF) des semoules entières issues des 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

Variété	Mode	Ala	Gly	Pro	Asp	Glu	Arg	Tyr	Ser	Cys	Total
Swabaa	MC	0,416	0,474	1,067	0,616	4,297	0,538	0,280	0,593	0,180	<b>8,461</b>
Algia	MB	0,418	0,472	1,149	0,619	4,426	0,544	0,288	0,611	0,230	<b>8,758</b>
INRAT69	MC	0,461	0,506	1,105	0,648	4,646	0,586	0,281	0,647	0,199	<b>9,078</b>
	MB	0,433	0,490	1,237	0,625	4,773	0,583	0,275	0,670	0,262	<b>9,348</b>
Badri	MC	0,499	0,568	1,473	0,731	5,904	0,687	0,366	0,763	0,234	<b>11,227</b>
	MB	0,467	0,537	1,357	0,726	5,619	0,629	0,346	0,705	0,210	<b>10,595</b>
Ben Bechir	MC	0,405	0,441	1,017	0,578	4,057	0,502	0,263	0,575	0,161	<b>7,998</b>
	MB	0,359	0,401	1,000	0,536	3,652	0,447	0,204	0,523	0,192	<b>7,314</b>
Maghrebi	MC	0,468	0,511	1,216	0,691	4,754	0,600	0,354	0,663	0,195	<b>9,453</b>
	MB	0,444	0,498	1,263	0,664	4,761	0,580	0,293	0,639	0,258	<b>9,402</b>
Khiar	MC	0,452	0,505	1,354	0,660	5,129	0,611	0,347	0,720	0,198	<b>9,976</b>
	MB	0,342	0,386	0,915	0,527	3,507	0,441	0,203	0,503	0,176	<b>7,000</b>
Om Rabia	MC	0,413	0,449	1,116	0,622	4,356	0,533	0,279	0,617	0,172	<b>8,556</b>
	MB	0,384	0,420	1,068	0,578	4,064	0,492	0,237	0,577	0,215	<b>8,036</b>
Karim	MC	0,400	0,420	0,910	0,581	3,596	0,475	0,271	0,515	0,141	<b>7,309</b>
	MB	0,382	0,412	0,969	0,550	3,769	0,477	0,233	0,518	0,195	<b>7,504</b>
Nasr	MC	0,390	0,431	0,963	0,573	3,903	0,478	0,263	0,569	0,151	<b>7,720</b>
	MB	0,360	0,418	1,000	0,574	4,089	0,479	0,233	0,540	0,156	<b>7,850</b>
Hamira	MC	0,477	0,558	1,357	0,699	5,485	0,630	0,337	0,724	0,222	<b>10,488</b>
	MB	0,485	0,546	1,474	0,725	5,560	0,650	0,359	0,738	0,291	<b>10,829</b>
Jnah	MC	0,500	0,557	1,319	0,739	5,409	0,650	0,340	0,713	0,242	<b>10,469</b>
Khortifa	MB	0,481	0,541	1,475	0,740	5,538	0,670	0,347	0,741	0,305	<b>10,838</b>
Chili	MC	0,357	0,421	1,010	0,561	4,042	0,494	0,237	0,567	0,167	<b>7,856</b>
	MB	0,417	0,487	1,245	0,635	5,009	0,572	0,266	0,641	0,184	<b>9,455</b>
Razzak	MC	0,381	0,417	0,972	0,538	3,754	0,479	0,242	0,542	0,153	<b>7,476</b>
	MB	0,381	0,422	1,052	0,561	3,931	0,489	0,262	0,551	0,209	<b>7,857</b>
Biskri	MC	0,465	0,505	1,168	0,671	4,647	0,573	0,285	0,636	0,199	<b>9,149</b>
	MB	0,354	0,411	0,951	0,552	3,913	0,491	0,241	0,533	0,149	<b>7,594</b>

La plupart des acides aminés analysés (76.47 %) sont plus fréquents en mode conventionnel qu'en mode biologique à l'exception de histidine (0.300 vs 0.297 g/100g de MF), phénylalanine (0.549 vs 0.546 g/100g de MF), proline (1.154 vs 1.146 g/100g de MF) et la cystéine (0.216 vs 0.186 g/100g de MF) (figure 28). Ce dernier acide aminé est en effet plus important dans la plupart des variétés conduites en mode biologique.

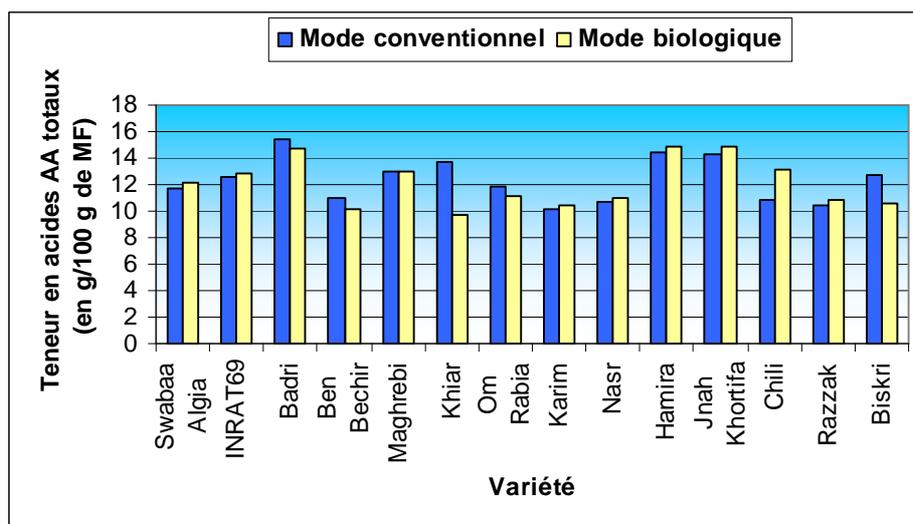


**Figure 28.** Teneur moyenne en acides aminés (en g/100g MF) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur selon le mode de culture.

Les résultats des acides aminés indispensables (tableau 20) montrent que les variétés Badri, Hamira et Jnah Khortifa disposent des valeurs moyennes des deux modes de conduites particulièrement importantes par rapport aux autres variétés avec 4.125, 3.932 et 3.922 g/100 g de MF respectivement. L'ensemble des résultats du même tableau montre aussi que les acides aminés indispensables ne se trouvent pas en quantités élevées ce qui affecte la valeur nutritionnelle du blé. En général, les protéines du blé présentent une carence en lysine (Pogna *et al.*, 1994 ; Kent & Evers, 1994 ; Jood *et al.*, 1995). Selon Boila *et al.* (1996), le blé contient 0.405 g/100 g de MF. Dans le même ordre d'idées, Anjum *et al.* (2005) ont rapporté que la teneur en lysine varie de 0.255 à 0.392 g/100g de MF en testant 44 variétés de blé. Dans cette investigation et indépendamment du mode de conduite, les variétés les plus riches en lysine sont: Badri, Hamira et Jnah Khortifa avec des valeurs respectives de 0.383, 0.366 et 0.359 g/100 g de MF. Ces mêmes variétés sont aussi assez riches en thréonine (0.425, 0.422 et 0.416 g/100 g de MF respectivement) et méthionine (0.169, 0.160 et 0.154 g/100 g de MF respectivement) qui sont souvent les plus déficients avec la lysine chez le blé (Wrigley & Bietz, 1988 ; Matuz *et al.*, 2000). Cette richesse, notée dans notre travail, pourrait être attribuée à des facteurs génétiques (Boyeldieu, 1980 ; Abdel-Aal & Hucl, 2002). Ces anciennes variétés de blé dur devraient attirer l'attention des sélectionneurs afin d'ajuster les programmes de sélection dans le but d'améliorer la qualité nutritionnelle de nouvelles variétés de blé. Les niveaux de lysine, de thréonine et de méthionine doivent constituer les bases de cette sélection.

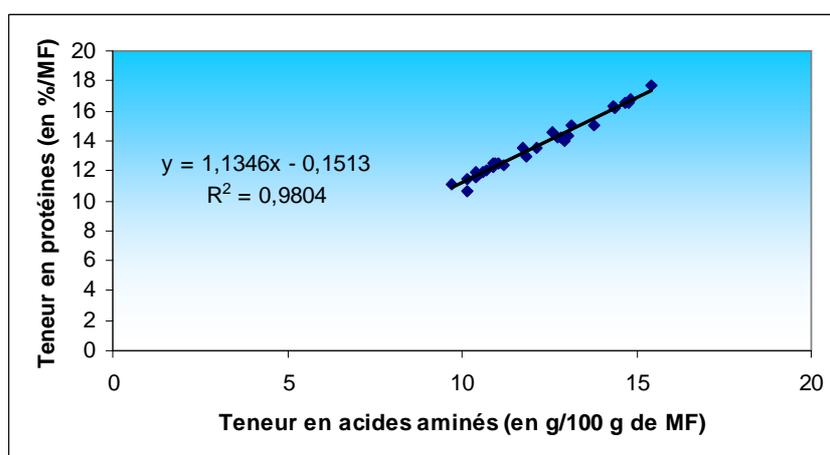
Par ailleurs, parmi les quatorze variétés étudiées, huit ont enregistré une composition en acides aminés totaux plus élevée en mode biologique qu'en mode conventionnel (figure 29). Ces

variétés par ordre décroissant sont : Jnah Khortifa, Hamira, Chili, INRAT69, Swabaa Ilgia, Nasr, Razzak et Karim avec 14.803, 14.787, 13.116, 12.858, 12.115, 10.956, 10.874 et 10.404 g/100g de MF respectivement. Rappelons que les cinq premières variétés sont anciennes et se caractérisent par une qualité protéique remarquable en mode biologique (voir IV-1-3) étayée aussi par leur constitution en acides aminés. D'une façon générale, les céréales et les produits céréaliers contiennent des quantités variables de acides aminés libres, dépendant en grande partie des espèces, des variétés et des conditions de croissance (Abdel-Aal & Hucl, 2002).



**Figure 29.** Teneur en acides aminés totaux (en g/100g MF) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur selon le mode de culture.

Ces résultats, associés avec ceux relatifs aux teneurs en protéines, montrent que la teneur en acides aminés totaux est proportionnelle à celle des protéines (figure 30).



**Figure 30.** Répartition des valeurs de la teneur en protéines en fonction de la teneur en acides aminés des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.

En conséquence, l'accroissement de la teneur en protéines sous l'effet de la fumure azotée n'est pas forcément accompagné d'une baisse de teneur en acides aminés comme il est parfois suggéré dans la littérature (Finesilver *et al.*, 1989). Nous pouvons donc dire que la teneur du grain en ces acides aminés est elle-même fonction de la teneur en azote total, bien qu'une élévation de cette dernière puisse diminuer certains de ces acides aminés indispensables (lysine, thréonine, méthionine...). Certains acides aminés non indispensables (acide glutamique et proline, en particulier) se trouvent, de ce fait, en quantité relativement importante (figure 28) surtout chez les variétés Badri, Jnah Khortifa et Hamira comme le montre le tableau 21. Finalement, les acides aminés jouent un rôle fondamental dans la qualité des produits céréaliers. En effet, ils servent de substrats importants aux micro-organismes de la pâte et sont déterminants du point de vue sensoriel. Ils contribuent également à la saveur de pain (Benedito De Barber *et al.*, 1989 ; Collar *et al.*, 1992). En outre ces acides aminés qui constituent la farine, soumises à un traitement thermique participent à la réaction de Maillard qui est, par ailleurs, très importante pour la qualité des produits alimentaires de céréale (Mottram *et al.*, 2002 ; Stadler *et al.*, 2002 ; Taeymans *et al.*, 2004).

#### ***4-1-4- Extraction et caractérisation du gluten***

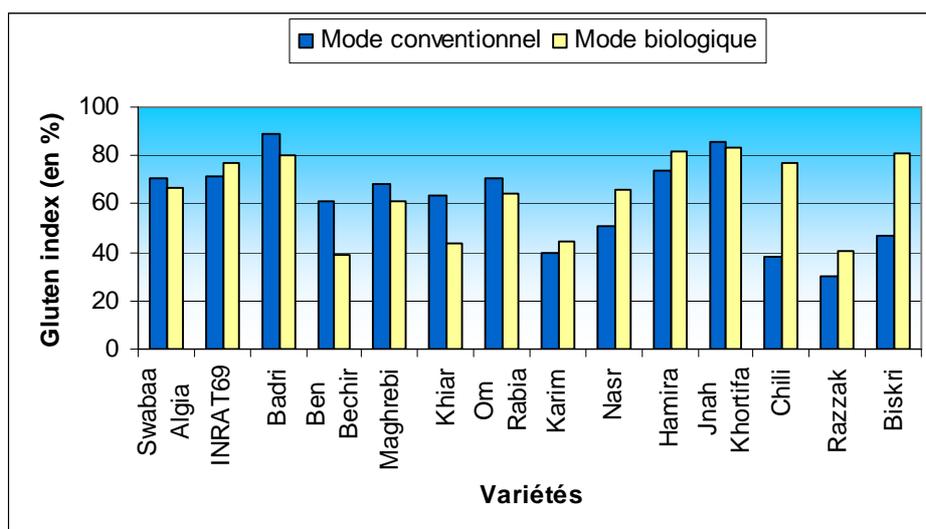
Le gluten, qui rassemble les protéines intervenant dans le processus de panification, est responsable des propriétés rhéologiques de la pâte. Le gluten est composé principalement de deux groupes protéiques de réserve : les gliadines (prolamines du blé) et les gluténines (glutélines du blé) (Bushuk, 1986). Perten (1989) considère généralement que l'élasticité de la pâte est due aux gliadines et que sa ténacité dépend plutôt des gluténines.

Les résultats d'extraction du gluten présentés dans le tableau 22 montrent que le taux de gluten index, tous mode et variétés confondus, varient entre 30 et 88.82 % avec une valeur moyenne de 63.09 %. Dans le cas des modes conventionnel et biologique, le gluten index moyen de toutes les variétés enregistre une légère différence en faveur du mode biologique par rapport au mode conventionnel avec 64.73 et 61.46 % respectivement. De manière générale et selon Perten (1990), il s'agit d'un gluten équilibré. Garrido-Lestache *et al.* (2005) rapportent que le gluten index du blé dur réagit positivement aux températures pendant la période de remplissage des grains. En effet, durant l'année d'essai 2002, toutes les variétés ont bénéficié de ce facteur pendant cette période. Le gluten index pourrait être influencé aussi par la fertilisation azotée bien que le degré d'influence soit régi par l'azote résiduel du sol et par les conditions climatiques annuelles (Lopez-Bellido *et al.*, 2001).

En se référant toujours aux travaux de Perten (1989, 1990), nous pouvons affirmer que pour le mode biologique, et par ordre décroissant, les variétés Jnah Khortifa, Hamira, Biskri, Badri, INRAT69, Chili, Swabaa Algia, Nasr, Om Rabia, et Maghrebi présentent un gluten équilibré traduisant une bonne valeur technologique (figure 31). En effet, les protéines du gluten (les prolamines), grâce à leurs structures spiralées et élastiques, apportent aux produits de boulangerie du moelleux et une excellente cuisson. Il est bien connu qu'une semoule déficiente en gluten a des conséquences négatives sur les propriétés rhéologiques et d'hydratation des pâtes obtenues. Pour les variétés Ben Bechir, Khiar, Karim, et Razzak, le gluten est mou, extensible et peu élastique traduisant une faible valeur technologique. En effet, et comme il a été prévu et annoncé auparavant, les variétés à forte teneur en protéines (Jnah Khortifa, Badri, Hamira, Chili et INRAT69) se prêtent à un bon comportement à la fabrication des pâtes ou des couscous. Ceci est confirmé par leur gluten équilibré. Par ailleurs, He & Hosney (1992) rapportent que l'élasticité et l'extensibilité du gluten de la semoule de blé sont déterminées par la quantité et la qualité des protéines en semoule. Les résultats relatifs aux teneurs en protéines et en gluten prouvent que ces cinq anciennes variétés du blé conduites en mode biologique ont eu un apport satisfaisant en azote organique. L'inverse est observé dans le cas des forts déficits azotés, les blés biologiques se caractérisent dans de telles situations par de faibles teneurs en protéines et gluten (Gooding *et al.*, 1993 ; Poutala *et al.*, 1994 ; Wöese *et al.*, 1997).

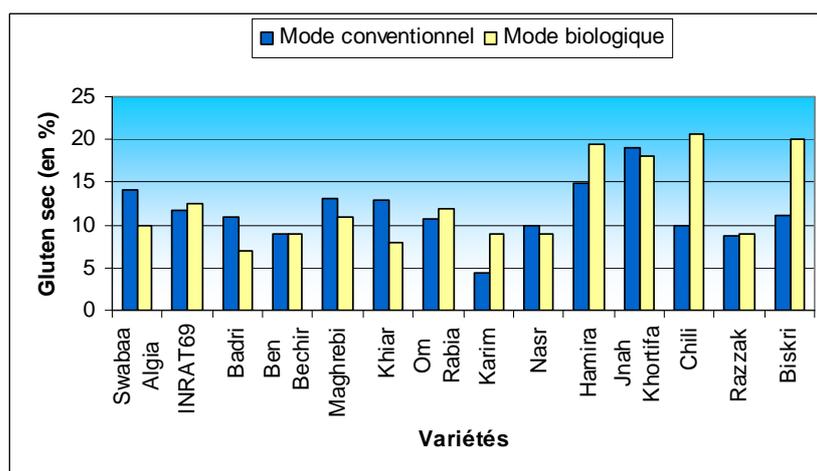
**Tableau 22.** Teneur en gluten (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

Variété	Mode de conduite	Gluten humide (%)	Gluten index (%)	Gluten sec (%)
Swabaa Algia	MC	42	70.47	14
	MB	30	66.66	10
INRAT69	MC	41	71.7	11.7
	MB	33.5	77.32	12.5
Badri	MC	34	88.82	11
	MB	20	80	7
Ben Bechir	MC	33	60.9	9
	MB	26	38.86	9
Maghrebi	MC	39	68.2	13
	MB	33	61.21	11
Khiar	MC	36.5	63.2	12.9
	MB	23	43.48	8
Om Rabia	MC	30	71	10.8
	MB	31	64.35	12
Karim	MC	11.8	40	4.4
	MB	24	44.5	9
Nasr	MC	30	51	10
	MB	26.7	66	9
Hamira	MC	41.2	74	14.9
	MB	60	82	19.5
Jnah Khortifa	MC	52	85.7	19
	MB	48.5	83.5	18
Chili	MC	28.9	38.4	10
	MB	56.8	77	20.6
Razzak	MC	31	30	8.7
	MB	27	40.41	9
Biskri	MC	31.9	47.02	11.1
	MB	53.3	81	20
<b>Moyenne</b>		<b>34.82</b>	<b>63.09</b>	<b>11.96</b>



**Figure 31.** Teneur en gluten index (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

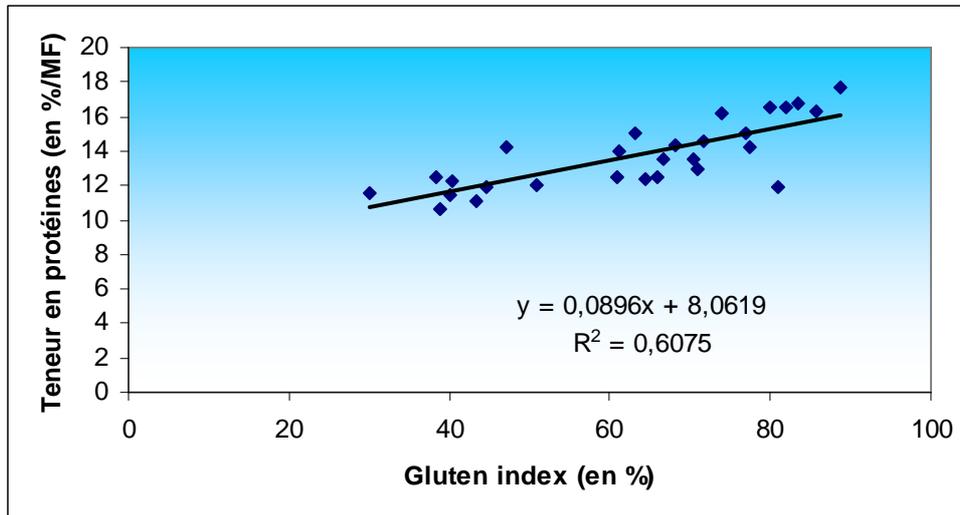
Pour le gluten sec, il se situe entre 4.4 à 14.9 % pour les variétés conduites en mode conventionnel avec une moyenne de 11.46 % (figure 32). Quant au mode biologique, la variation est entre 7 et 20.6 % avec une moyenne de 12.47 %. D’après Landi (1993), le blé ayant une teneur en gluten sec supérieure à 12 % serait d’une bonne qualité. Ainsi, pour le mode biologique on enregistre des valeurs du gluten sec très importantes surtout pour les variétés Chili, Biskri, Hamira et Jnah Khortifa avec 20.6, 20, 19.5 et 18 % respectivement. D’après Landi (1993), ces variétés conviennent parfaitement pour les pâtes et semblent avoir une meilleure qualité culinaire.



**Figure 32.** Teneur en gluten sec (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

En outre, les propriétés rhéologiques des pâtes sont principalement sous la dépendance de la teneur en protéines et de la viscoélasticité du gluten ; plus celles-ci sont élevées, plus les pâtes

sont fermes (Feillet, 1984). Dans notre cas, la teneur en protéine est corrélée positivement avec le gluten index (figure 33). En effet, la force élevée du gluten associée à la teneur en protéines du blé est désirée dans la confection des pâtes alimentaires pour palier aux problèmes de distension durant le séchage et cassure au cours de l’emballage et du transport (Dick & Matsuo, 1988).



**Figure 33.** Répartition des valeurs de la teneur en protéines en fonction du gluten index des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.

Finalement, il est à noter que le gluten n’est pas l’unique responsable des propriétés rhéologiques remarquables de la pâte. En effet, Buré (1997) a montré que le gluten purifié présente des propriétés différentes de celles qu’il affiche au sein de la pâte. Les propriétés de la semoule de blé sont influencées par les interactions des protéines du gluten avec l’amidon, les autres polysaccharides et les lipides (Dacosta, 1986)

#### ***4-1-5- Activité amylasique***

Les valeurs de l’activité amylasique sont déterminées suivant le test classique de Hagberg (temps de chute). Elles indiquent le degré de germination du grain et le taux de décomposition de l’amidon en sucres. Le tableau 23, résume l’ensemble des valeurs correspondant à l’activité amylasique des échantillons issus des 14 variétés de blé dur et conduites selon les modes conventionnel et biologique.

**Tableau 23.** Activité amylasique (en secondes) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

Variété	MC	MB	D (%)
Swabaa Algia	388.41 <sup>a</sup>	412.34 <sup>a</sup>	+6,16
INRAT69	469.80 <sup>a</sup>	443.97 <sup>a</sup>	-5,50
Badri	499.55 <sup>a</sup>	408.31 <sup>b</sup>	-18,26
Ben Bechir	439.37 <sup>a</sup>	405.63 <sup>b</sup>	-7,68
Maghrebi	389.25 <sup>a</sup>	382.54 <sup>a</sup>	-1,72
Kh iar	463.12 <sup>a</sup>	383.39 <sup>b</sup>	-17,22
Om Rabia	450.95 <sup>a</sup>	422.08 <sup>b</sup>	-6,40
Karim	479.43 <sup>a</sup>	395.28 <sup>b</sup>	-17,55
Nasr	402.10 <sup>a</sup>	389.96 <sup>a</sup>	-3,02
Hamira	421.31 <sup>a</sup>	438.89 <sup>a</sup>	+4,17
Jnah Khortifa	419.38 <sup>a</sup>	383.76 <sup>b</sup>	-8,49
Chili	505.57 <sup>a</sup>	416.45 <sup>b</sup>	-17,63
Razzak	384.09 <sup>a</sup>	380.30 <sup>a</sup>	-0,99
Biskri	485.00 <sup>a</sup>	430.30 <sup>b</sup>	-11,28
<b>Moyenne</b>	<b>442.67<sup>a</sup></b>	<b>406.66<sup>b</sup></b>	<b>-8,13</b>
<b>ESM</b>		<b>1.78</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne diffèrent significativement.*  
*ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

L'ensemble des résultats du tableau 23, indique que l'activité amylasique est restreinte dans toutes les variétés quelque soit le mode de culture malgré l'existence d'une baisse significative de 8.13 % dans le cas de la pratique de l'agriculture biologique. Selon Bard (1997), l'activité  $\alpha$ -amylasique doit être optimum pour la panification :

- indice < 180 secondes : l'activité est hyper-diastatique, farine impropre à la panification ;
- indice > 300 secondes : l'activité est hypo-diastatique, une correction nécessaire par addition d'amylase ;
- indice = 260 seconde est l'optimum.

Dans notre cas, elle varie de 380 à 505 secondes dépassant ainsi la norme (260 secondes). Ces farines possèdent donc une activité hypo-diastatique et il est nécessaire par conséquent d'effectuer une correction par addition d'amylase. La synthèse de l' $\alpha$ -amylase semble être limitée à certaines cellules ou à petits groupes de cellules dispersées aléatoirement dans toute la couche d'aleurone (Mrva *et al.*, 2006). Bollen & Sinnaeve (1994) montrent pour un temps de chute trop élevé, la production de CO<sub>2</sub> sera plus faible pour obtenir un pain de bonne qualité durant la panification ce qui entraîne un ralentissement de la fermentation. Ces résultats sont influencés par le génotype et les conditions environnementales sous lesquels les grains se sont

développés et ont mûri (Mares & Mrva, 2007). Par ailleurs et d'après l'annexe 6, on distingue une différence significative ( $P < 0.001$ ) entre les différents génotypes étudiés.

En effet, en mode conventionnel, l'indice de chute de Hagberg oscille de 384 à 505 secondes chez les variétés Razzak et Chili respectivement. Pour le mode biologique, il varie de 380 à 444 chez les variétés Razzak et INRAT69 respectivement. Comme il a été précédemment mentionné, bien que l'indice de chute de Hagberg soit considéré comme une propriété variétale, les conditions environnementales ont aussi un effet marqué sur cette caractéristique de la qualité du grain. Mares *et al.* (1994) rapportent qu'une fois mûries dans les environnements très chauds et secs, les variétés excèdent les normes. Il est vraisemblable que les résultats rapportés dans notre travail soient expliqués par les mêmes causes étant donné que les températures de la période de maturité pendant l'année d'essai 2002, étaient élevées. En plus de la température, l'application de l'engrais azoté (Svensson, 1990 ; Kettlewell, 1999 ; Kindred *et al.*, 2005), l'application en retard d'un fongicide (Svensson, 1990) et la taille de grain (Evers *et al.*, 1995) contribuent à la variation des niveaux d' $\alpha$ -amylase de grain et l'indice de chute de Hagberg.

Finalement, le temps de chute élevé ( $> 300$  secondes), enregistré dans toutes les variétés du blé dur et au niveau de deux modes de culture, influence les caractéristiques de la pâte et les propriétés de pain. Par conséquent, les propriétés viscoélastiques de la pâte, sa capacité de tenir le gaz pendant la fermentation et la forme du pain seront affectées. Ce dernier sera ainsi dense avec une uniformité dure (Tohver *et al.*, 2004). Ce temps de chute de Hagberg semble être un critère très important pour estimer l'aptitude d'un lot de blé à la panification. Il serait donc judicieux de prendre en considération ce critère lors de la valorisation des lots destinés à la meunerie.

#### ***4-1-6- Teneur en cendres***

Pour avoir une idée générale sur la qualité nutritionnelle et surtout en éléments minéraux que constitue une semoule complète issue d'un grain entier de blé dur, la teneur en cendres a été déterminée. Les valeurs doivent se situer entre 1.7 et 2.1 % de l'extrait sec (MSDA, 1994). Cette spécificité est respectée dans le cas de nos semoules. Dans le tableau 24, le mode conventionnel atteint 1.85 % et le mode biologique est très proche de la limite inférieure avec 1.68 %. En effet, il existe une différence significative au seuil de probabilité de 1‰ (annexe 6) entre les taux des cendres obtenus à partir des deux modes de culture. Ce

résultat peut être attribué au type de fertilisant azoté donné pour chaque mode de culture ainsi qu'à la quantité et à son mode d'application.

**Tableau 24.** Teneur en cendres (en %) des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

Variété	MC	MB	D (%)
Swabaa Algia	1.70 <sup>a</sup>	1.61 <sup>b</sup>	-5.29
INRAT69	2.01 <sup>a</sup>	1.73 <sup>b</sup>	-13.93
Badri	1.91 <sup>a</sup>	1.70 <sup>b</sup>	-10.99
Ben Bechir	1.73 <sup>a</sup>	1.62 <sup>b</sup>	-6.36
Maghrebi	1.90 <sup>a</sup>	1.78 <sup>b</sup>	-6.32
Khiaar	1.94 <sup>a</sup>	1.67 <sup>b</sup>	-13.92
Om Rabia	1.90 <sup>a</sup>	1.60 <sup>b</sup>	-15.79
Karim	1.77 <sup>a</sup>	1.65 <sup>b</sup>	-6.78
Nasr	1.74 <sup>a</sup>	1.58 <sup>b</sup>	-9.20
Hamira	1.76 <sup>b</sup>	1.80 <sup>a</sup>	+2.27
Jnah Khortifa	1.90 <sup>a</sup>	1.79 <sup>b</sup>	-5.79
Chili	1.85 <sup>a</sup>	1.75 <sup>b</sup>	-5.41
Razzak	1.67 <sup>a</sup>	1.60 <sup>b</sup>	-4.19
Biskri	2.16 <sup>a</sup>	1.66 <sup>b</sup>	-23.15
<b>Moyenne</b>	<b>1.85<sup>a</sup></b>	<b>1.68<sup>b</sup></b>	<b>-8.91</b>
<b>ESM</b>		<b>0.001</b>	

*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne diffèrent significativement.*  
*ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

En mode biologique, la variété Hamira présente une bonne composition minérale puisqu'elle a enregistré la meilleure teneur en cendres (1.80 %) c'est d'ailleurs le seul cas qui dépasse le mode conventionnel avec un écart significatif de 2.27 %. Les variétés Jnah Khortifa, Maghrebi, Chili et INRAT69 se sont distinguées aussi par une teneur importante en cendres et ce pour le même mode de culture (1.79, 1.78, 1.75 et 1.73 % respectivement). Ces variétés semblent ainsi relativement comparables quant à leur teneur en minéraux totaux (cendres).

L'annexe 6 montre également une différence significative ( $P < 0.001$ ) de la teneur en cendres des différentes variétés. En effet, elle varie de 1.70 à 2.16 % en mode conventionnel chez les variétés Swabaa Algia et Biskri respectivement et de 1.58 à 1.80 % en mode biologique chez les variétés Nasr et Hamira respectivement. Selon Willm & Fourre (1998), cette variabilité de la teneur en cendres est influencée par des facteurs d'ordre génétique, climatique, agronomique et technologique.

La combinaison de ces facteurs a contribué sans doute à la distinction en mode conventionnel de la variété Biskri, qui a dépassé, par ailleurs, la norme (2.16 > 2.1 %). D'après Miskelly

(1984), Boudreau (1992) et Bard (1997), un taux aussi important de cendres pourrait en affecter la couleur en donnant une teinte grise ou une moins grande brillance de la mie.

#### **4-1-7- Teneur en macroéléments**

Les minéraux présents dans la farine de blé sont des matières inertes, leurs effets sur les qualités boulangères de la farine sont négligeables bien qu'ils puissent avoir un effet sur la couleur. Les principaux minéraux de la farine sont le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium (Matz, 1987).

Le tableau 25 regroupe les concentrations en macroéléments dans les grains des quatorze variétés de blé dur en conditions biologique et conventionnelle.

**Tableau 25.** Teneur en macroéléments (en g/100g de MS) des farines entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

Variétés	Phosphore (P)		Potassium (K)		Calcium (Ca)	
	MC	MB	MC	MB	MC	MB
Swabaa Algia	0.30 <sup>b</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.56 <sup>b</sup>	0.76 <sup>a</sup>	0.031 <sup>b</sup>	0.076 <sup>a</sup>
INRAT69	0.36 <sup>a</sup>	0.35 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	0.65 <sup>b</sup>	0.085 <sup>a</sup>	0.032 <sup>b</sup>
Badri	0.37 <sup>a</sup>	0.49 <sup>a</sup>	0.69 <sup>a</sup>	0.67 <sup>a</sup>	0.053 <sup>b</sup>	0.063 <sup>a</sup>
Ben Bechir	0.14 <sup>a</sup>	0.20 <sup>a</sup>	0.35 <sup>b</sup>	0.46 <sup>a</sup>	0.053 <sup>b</sup>	0.083 <sup>a</sup>
Maghrebi	0.26 <sup>b</sup>	0.50 <sup>a</sup>	0.43 <sup>b</sup>	0.58 <sup>a</sup>	0.053 <sup>a</sup>	0.056 <sup>a</sup>
Khlar	0.18 <sup>a</sup>	0.26 <sup>a</sup>	0.61 <sup>a</sup>	0.50 <sup>b</sup>	0.092 <sup>a</sup>	0.039 <sup>b</sup>
Om Rabia	0.41 <sup>b</sup>	0.59 <sup>a</sup>	0.36 <sup>b</sup>	0.70 <sup>a</sup>	0.063 <sup>a</sup>	0.063 <sup>a</sup>
Karim	0.19 <sup>b</sup>	0.58 <sup>a</sup>	0.75 <sup>a</sup>	0.39 <sup>b</sup>	0.061 <sup>a</sup>	0.034 <sup>b</sup>
Nasr	0.16 <sup>a</sup>	0.23 <sup>a</sup>	0.49 <sup>a</sup>	0.42 <sup>b</sup>	0.033 <sup>a</sup>	0.036 <sup>a</sup>
Hamira	0.19 <sup>a</sup>	0.25 <sup>a</sup>	0.37 <sup>b</sup>	0.76 <sup>a</sup>	0.090 <sup>a</sup>	0.076 <sup>b</sup>
Jnah Khortifa	0.40 <sup>b</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.56 <sup>b</sup>	0.76 <sup>a</sup>	0.047 <sup>a</sup>	0.045 <sup>a</sup>
Chili	0.27 <sup>b</sup>	0.51 <sup>a</sup>	0.37 <sup>b</sup>	0.60 <sup>a</sup>	0.053 <sup>b</sup>	0.063 <sup>a</sup>
Razzak	0.40 <sup>a</sup>	0.49 <sup>a</sup>	0.39 <sup>b</sup>	0.94 <sup>a</sup>	0.063 <sup>a</sup>	0.034 <sup>b</sup>
Biskri	0.15 <sup>b</sup>	0.31 <sup>a</sup>	0.41 <sup>b</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.030 <sup>b</sup>	0.096 <sup>a</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>0.27<sup>b</sup></b>	<b>0.42<sup>a</sup></b>	<b>0.50<sup>b</sup></b>	<b>0.62<sup>a</sup></b>	<b>0.058<sup>a</sup></b>	<b>0.057<sup>a</sup></b>
<b>ESM</b>	<b>0.008</b>		<b>0.002</b>		<b>2.65</b>	

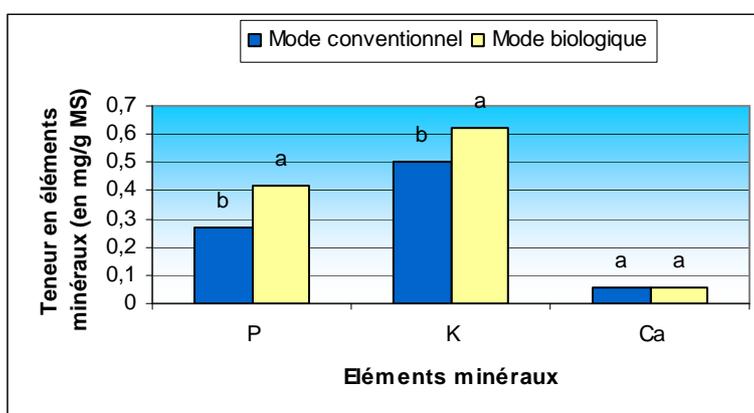
*a-b : Les moyennes affectées d'une lettre différente dans une même ligne au sein de chaque macroélément, diffèrent significativement.*

*ESM : Erreur Standard de la moyenne.*

Les analyses statistiques ont montré des différences significatives entre les deux modes de culture pour leurs concentrations moyennes en P et K au niveau du grain (annexe 7 et figure 34). En outre, le mode biologique dispose des meilleures concentrations en ces deux éléments. En effet, sur quatorze variétés étudiées, pour treize d'entre elles le P est présent en concentration plus élevée en mode biologique qu'en mode conventionnel. Pour la K, neuf d'entre elles se distinguent par leur supériorité en ce mode. La fertilisation et le mode de fractionnement sembleraient être les facteurs principaux de variation des teneurs minérales

entre les deux systèmes de production. Par ailleurs, Warman & Havard (1997, 1998) trouvent des corrélations entre certains éléments minéraux contenus dans les parties analysées de la plante et les mêmes éléments extractibles des sols.

Cependant il est intéressant de noter que, pour les deux modes de culture, la teneur en potassium des grains des quatorze variétés étudiées est faible malgré la richesse du sol en cet élément (202 ppm). Ce résultat peut être expliqué par les conclusions émises par Boyeldieu (1980) qui a montré, suite à l'analyse de plusieurs types de céréales, que le phosphore absorbé est surtout contenu dans les grains alors que le potassium est en majeure partie situé dans les organes végétatifs (feuilles et tiges). D'après tableau 25, parmi les variétés les plus riches en P, K et Ca en mode biologique, nous distinguons la variété Jnah Khortifa (0.64 g de phosphore /100 g de MS, 0.76 g de potassium/100 g de MS et 0.045 g de calcium /100 g de MS). Par ailleurs, cette variété détenant une teneur en cendre importante (1.79 %), confirme sa richesse en macroéléments. En mode conventionnel, cette même variété est considérée aussi riche en macroéléments (0.4 g de phosphore /100 g de MS, 0.56 g de potassium/100 g de MS et 0.047 g de calcium /100 g de MS). Boyeldieu (1980) a montré que l'aptitude à accumuler certains types de réserves, y compris les éléments minéraux, est d'ordre génétique.



*Les histogrammes suivis d'une lettre différente, diffèrent statistiquement au seuil de 5 %.*

**Figure 34.** Teneur moyenne en macroéléments (en %) des farines entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

L'effet de la variété est aussi significatif pour P, K et Ca. La variété Ben Bechir réalise le plus faible prélèvement en ces macroéléments avec 0.64 g/100 g de MS alors que le prélèvement moyen pour tous les génotypes est de 0.96 g/100 g de MS). D'un autre côté, la variété Jnah Khortifa a prélevé la plus importante quantité en macroéléments avec 1.22 g/100 g de MS comparativement aux autres génotypes. Cette différence entre les variétés peut être également expliquée par le comportement différent des variétés vis à vis du mode de culture puisque

l'interaction mode x variété est significative pour les trois macroéléments. On peut classer ainsi les variétés en trois classes selon chaque macroélément dosé :

- des variétés gardant la même teneur quelque soit le mode de culture telles la variété Badri pour le phosphore et le potassium et la variété Maghrebi pour le calcium.
- des variétés présentant des teneurs plus importantes lorsqu'elles sont cultivées en conventionnel telle la variété INRAT69 pour le potassium et le calcium.
- des variétés présentant des teneurs plus importantes lorsqu'elles sont cultivées en biologique telle la variété Swabaa Algia pour le phosphore, le potassium et le calcium.

#### **4-2- Analyse rhéologique**

L'examen du tableau 26 montre que les variétés étudiées du blé dur se répartissent en deux groupes selon la valeur de leur force boulangère (W) :

- des variétés de faible force boulangère ( $W < 160$  J) qui vont être utilisées dans le domaine de la biscuiterie.
- d'autres à blés améliorants ( $160 < W < 250$  J) pouvant être utilisées dans la panification.

Ainsi, on note que, pour la plupart des variétés, le rapport P/L est supérieur à 0.5 ce qui montre que les qualités de la farine ne sont pas équilibrées et qu'il s'agit de farine à forte hydratation (Boyeldieu, 1980).

**Tableau 26.** Utilisations potentielles des différentes variétés de blé dur suivant la valeur de la force boulangère.

Variétés	Mode	P/L	W (J)	Utilisation
Swabaa Algia	MC	0,7	180	panification
	MB	0,6	155	biscuiterie
INRAT69	MC	1,0	210	panification
	MB	0,8	180	panification
Badri	MC	0,8	240	panification
	MB	0,9	240	panification
Ben Bechir	MC	0,9	110	biscuiterie
	MB	0,6	80	biscuiterie
Maghrebi	MC	0,9	200	panification
	MB	0,4	170	panification
Khiar	MC	1,0	220	panification
	MB	0,6	100	biscuiterie
Om Rabia	MC	1,0	150	biscuiterie
	MB	0,5	140	biscuiterie
Karim	MC	0,9	55	biscuiterie
	MB	1,0	105	biscuiterie
Nasr	MC	1,3	95	biscuiterie
	MB	1,0	150	biscuiterie
Hamira	MC	0,5	220	panification
	MB	1,1	220	panification
Jnah Khortifa	MC	1,1	230	panification
	MB	0,6	250	panification
Chili	MC	0,8	135	biscuiterie
	MB	0,5	210	panification
Razzak	MC	1,6	85	biscuiterie
	MB	0,8	115	biscuiterie
Biskri	MC	0,6	195	panification
	MB	0,9	105	biscuiterie
<b>Moyenne</b>	<b>MC</b>	<b>0.9</b>	<b>166</b>	<b>panification</b>
	<b>MB</b>	<b>0.7</b>	<b>159</b>	<b>panification</b>

Quant à l'effet mode de culture sur la force boulangère, les résultats obtenus montrent que dix variétés sur quatorze n'ont pas changé de classe relative à la force boulangère. C'est à dire qu'elles ont gardé les mêmes propriétés rhéologiques de leurs pâtes quelque soit le mode de culture. La variété Badri, par exemple, est à bonne force boulangère quelque soit le mode de culture (240 J pour les deux modes de culture biologique et conventionnel). Toutefois, les variétés Swabaa Algia, Chili et Biskri se caractérisent par des propriétés rhéologiques différentes dès qu'elles changent le mode de conduite. Ainsi, la valeur de la force boulangère

peut être en faveur de l'un ou de l'autre des deux modes de culture permettant ainsi de classer les variétés en trois classes :

- des variétés présentant des forces boulangères plus importantes avec le mode conventionnel qu'avec le mode biologique.
- des variétés se caractérisant par des forces boulangères plus importantes avec le mode biologique.
- d'autres variétés dont la force boulangère ne semble pas être affectée par le mode de culture.

La première classe est représentée par les variétés Swabaa Algia, INRAT69, Ben Bechir, Maghrebi, Khiar et Biskri.

La deuxième classe comprend les variétés Karim, Nasr, Jnah Khortifa, Chili et Razzak.

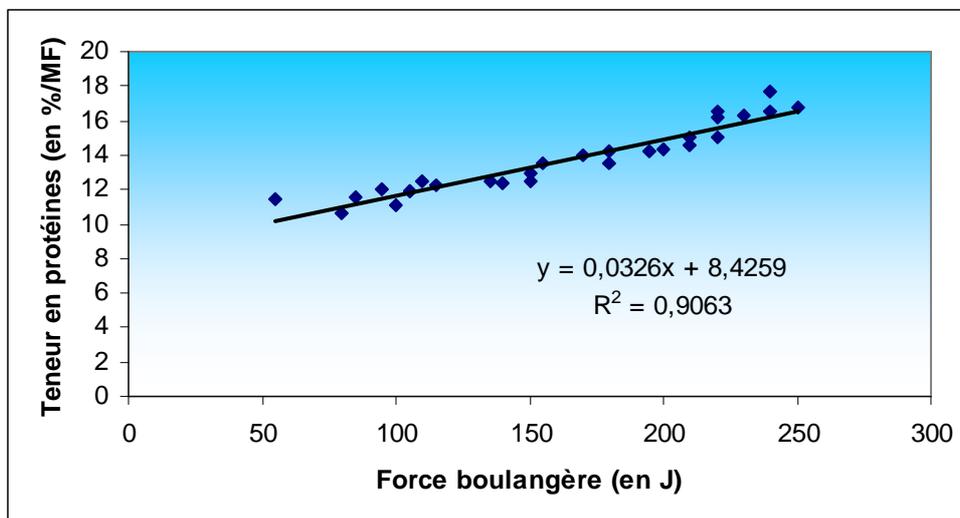
La dernière est représentée par les variétés Badri, Om Rabia et Hamira.

Ces résultats peuvent être expliqués par les conclusions émises par Woëse *et al.* (1997) qui ont indiqué que les propriétés viscoélastiques de la pâte dépendent surtout de la teneur en protéines totales des grains et que tout taux faible de protéines aura des effets négatifs sur les qualités sensorielles du pain y compris l'alvéogramme Chopin.

Dans ce même contexte, Feillet (2000) a montré que l'accroissement de la teneur en protéines se traduit par une augmentation de la pression P et du gonflement G des alvéogrammes mais certaines variétés réagissent plus que d'autres. En effet, les gliadines et les gluténines sont les principaux constituants des farines dont dépendent l'extensibilité et l'élasticité des pâtes, leur faible solubilité dans l'eau est un élément essentiel du caractère panifiable des farines. De même, les farines sont d'autant plus fortes que le rapport gluténines/gliadines est élevé. Ces deux composants ont ainsi la capacité unique de former un réseau visco-élastique lors de l'hydratation et jouent un rôle très important sur les caractéristiques rhéologiques de la pâte (Kleijer, 2002). Kitissou (1995) rapporte que ces caractéristiques sont liées à la quantité de protéines, à la qualité de son réseau et à la capacité de fixation des différents constituants, protéines, amidon et pentosanes. Selon le même auteur, un excès d'endommagement de l'amidon a une influence notable sur les résultats alvéographiques. Une augmentation du degré d'endommagement accroît le potentiel d'hydratation de la farine.

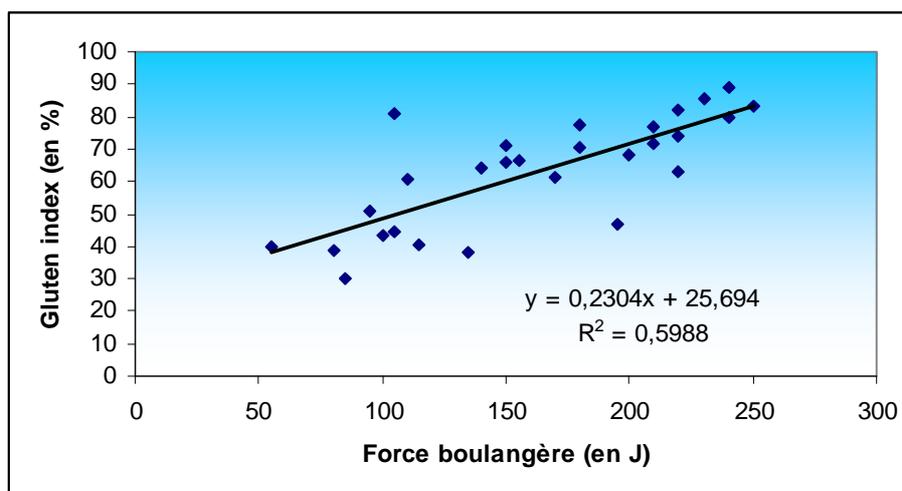
En effet, les résultats obtenus corrélaient positivement avec les teneurs en protéines chez les différentes variétés (figure 35), celles constituant la première classe présentent une teneur plus

importante au mode conventionnel qu'au mode biologique, celles de la deuxième classe présentent des teneurs plus importantes en masse protéique avec le mode biologique et la dernière classe présente des teneurs presque égales procurant ainsi les mêmes valeurs de force boulangère. Cette corrélation a déjà été par ailleurs, signalée par Branlard & Dardevet (1985).



**Figure 35.** Répartition des valeurs de la teneur en protéines en fonction de la force boulangère des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.

Le fait que les variétés gardent le même domaine d'utilisation en maintenant la même propriété de la force boulangère peut être dû à des facteurs génétiques responsables de la synthèse protéique et surtout de la synthèse des gluténines et des gliadines. A titre de rappel, le gluten est composé essentiellement en ces deux composants qui représentent environ 80 % des protéines totales du grain (Lasztity, 1984). Par ailleurs, la corrélation entre le gluten index et la force boulangère s'avère positive (figure 36).



**Figure 36.** Répartition des valeurs de gluten index en fonction de la force boulangère des quatorze variétés de blé dur biologique et conventionnel.

Indrani & Rao (2000) ont également rapporté que le gluten et les protéines sont les paramètres les plus importants de prévision de la qualité boulangère. La teneur en protéines et ses qualités contrôlent donc l'essentiel des propriétés rhéologiques et paraissent être les meilleurs facteurs aptes à être utilisés comme marqueurs génétiques de la qualité des blés durs.

*CONCLUSION*  
*GENERALE*

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche s'est intéressé à l'évaluation du potentiel de quatorze variétés de blé dur en conditions biologiques comparées à celles conventionnelles. La production du blé biologique reste encore très peu répandue en Tunisie en raison de nombreux facteurs qui limitent son développement. Le but de cette investigation est donc d'identifier et de sélectionner des variétés de blé potentiellement productives en agriculture biologique et qui se caractérisent, aussi par une bonne adaptation, stabilité de rendement et produisant des grains de bonne qualité technologique et nutritionnelle.

Une première étape d'analyse de performances des quatorze variétés de blé dur biologique pendant les quatre années d'essai et dans les deux sites du Kef et Bousalem a permis de retenir trois variétés qui se sont distinguées par leur rendement en grains. Ces variétés sont : Khiar (variété améliorée), Ben Bechir et INRAT69 (variétés anciennes) qui ont enregistré des rendements moyens satisfaisants en agriculture biologique (24.7 ; 24.6 et 24.4 qx/ha respectivement).

Ensuite, l'étude de la stabilité du rendement en grains a permis de révéler par ordre décroissant de stabilité les variétés INRAT69 et Ben Bechir. Cette stabilité associée au rendement en grains montre que ces deux variétés peuvent être prometteuses pour être conduites en mode biologique du fait qu'elles ont montré une grande aptitude à s'accommoder dans des terroirs et des conditions climatiques très variées. Il est intéressant à noter aussi que ces anciennes variétés ont été classées les dernières en mode conventionnel ce qui prouve qu'elles ne sont pas adéquates à la conduite chimique.

Finalement, la qualité des grains des quatorze variétés issues de la production biologique et conventionnelle a été aussi déterminée. L'analyse a révélé que la variété INRAT69 présente une meilleure qualité par rapport à Ben Bechir surtout en matière protéique (14.19 et 10.67 %/MF respectivement), en acides aminés (12.86 et 10.14 g/100g MF respectivement) et en gluten index (77.32 et 38.86 % respectivement). Ces caractéristiques constituent ainsi un appui aux agriculteurs biologiques pour choisir et conduire la variété INRAT69 puisqu'elle garantit à la fois un rendement satisfaisant associé à une qualité jugée bonne. Cette variété pourrait être ainsi préconisée pour la fabrication des pâtes et couscous biologiques et même du pain puisqu'elle a montré une bonne qualité boulangère.

Les variétés anciennes Jnah Khortifa, Hamira, Badri et Chili sont caractérisées par des teneurs en protéines (16.75 ; 16.51 ; 16.52 et 15.08 %/MS respectivement), en acides aminés (14.80 ; 14.79 ; 14.65 et 13.12 g/100g MF respectivement), en gluten index (83.5 ; 82 ; 80 et 77 % respectivement) et en cendres (1.79 ; 1.80 ; 1.70 et 1.75 % respectivement) qui leur confèrent des qualités technologiques supérieures.

Plusieurs pistes de travail, pouvant être proposées comme perspectives et compléments à ce travail, permettraient de préciser plusieurs points qui n'ont pas pu être entrepris dans ce travail.

La sélection de variétés adaptées aux besoins de l'agriculture biologique implique des savoir-faire précis et fiables qui reposent sur une compréhension globale de la plante, sur le système de culture dans lequel elle s'insère et sur les influences subtiles agissantes. L'effort de sélection futur devrait donc porter sur l'efficacité de l'azote et la capacité à le prélever afin d'atteindre des teneurs protéiques acceptables en situations fortement carencées en azote par exemple. Un travail approfondi devra donc être accompli en matière de sélection variétale pour disposer de blé dur à haut rendement en grains et de haute qualité technologique et nutritionnelle (à la fois riche en protéines, acides aminés, minéraux ...). Pour ce faire, et après l'identification des cibles génétiques issues de notre travail à savoir les variétés Jnah Khortifa, Hamira, Badri et Chili du point de vue qualité et les variétés Khiar, Ben Bechir et INRAT69 de point de vue productivité, nous proposons la création d'une variété spécifique à l'agriculture biologique à partir des variétés INRAT69 ou Badri qui sont les plus stables afin d'améliorer leur performance quant à la qualité et le rendement en grains sans perdre toutefois leur stabilité. Pour cela, il serait possible de réaliser des croisements multiples (polycross) pour combiner les caractères répartis sur plusieurs variétés : INRAT69 x Khiar et l'hybride issu des ces deux variétés serait combiné avec Jnah Khortifa par exemple.

L'opportunité d'une sélection spécifique en agriculture biologique sera d'avantage accélérée en employant par exemple les techniques d'haplodiploïdisation ou de sauvetage d'embryons immatures afin de fixer les caractères intéressants et complémentaires en peu de temps.

De même, l'amélioration de la qualité technologique et nutritionnelle du blé biologique, qui seule justifiera, pour une grande partie des consommateurs le maintien de l'écart de prix payé, nécessite le développement de recherches complémentaires dans les domaines de la sélection variétale, afin de créer des variétés à semoule fonctionnelle parfaitement adaptée à des utilisations ciblées. La sélection par exemple de la qualité et la quantité des protéines pourrait

assurer cette exigence. Il semblerait ainsi intéressant d'étudier plus en détails le rapport gliadines/gluténines, notamment pour la qualité des protéines du blé dur biologique.

Plus globalement, il serait nécessaire d'aider les professionnels de la filière blé dur biologique à élaborer un catalogue des variétés de blé en prenant compte à chaque variété les plages de teneurs en protéines qui garantissent une aptitude à la fabrication des pâtes et des couscous.

Enfin, certains résultats sont à confirmer, la qualité technologique et nutritionnelle sur les échantillons du blé dur issus d'une seule campagne est loin d'être entièrement explorée, la détermination de la stabilité de cette qualité est un aspect particulièrement important à étudier.

*RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel-Aal E.-S. M. & Hucl P., 2002.** Amino acid composition and in vitro protein digestibility of selected ancient wheats and their end products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15 : 737–747.
- Abele U., 1987. **Product fertilisation and quality – mineral, organic, biodynamic.** *Angewandte Wissenschaft*, 345 p.
- AFNOR, 1991** (Association Française de Normalisation). Contrôle de la qualité des produits alimentaire : céréales et produits céréaliers. *Ed. AFNOR*.
- AFSSA, 2002** (Agence française de sécurité sanitaire des aliments). Journée d'échange sur l'agriculture biologique. Comment évaluer la valeur nutritionnelle, les bénéfices et les risques des aliments issus de l'agriculture biologique ? Quelques exemples en France et en Europe. [www.afssa.fr](http://www.afssa.fr)
- AFSSA, 2003** (Agence française de sécurité sanitaire des aliments). Evaluation des risques et bénéfices nutritionnels et sanitaires issus de l'agriculture biologique, 186 p.
- Alföldi T., Bickel R. & Weibel F., 2001.** Vergleichende Qualitätsuntersuchung; Neue Ansätze et Impulse täten gut. *Ökologie & Landbau* 117, 11-13. Extraits- Traduction afssa et c/o Blaise Leclerc.
- Alföldi T., Mader P., Niggli U., Spiess E., Dubois D. & Besson J. M., 1996.** Quality investigation in the long term DOC trial, Quality of plant products growth with manure fertilization. Proceeding of the fourth meeting (Juva Finland, 6-9 july 1996 Darmstat Germanie), Institut for Biodynamic research, 34-43.
- Allard, R.W. & Bradshaw, A.D. 1964.** Implications of genotype-environment interactions. *Crop Science* 4 : 503-507.
- Alley M. M., Scharf P. C., Brann D. E., Baethgen W. E. & Hammons J. L., 1996.** Nitrogen management for winter wheat : Principles and recommendations. Publ. 424-026. *Virginia Coop. Ext., Blacksburg*.
- Anjum F. M., Ahmad I., Butt M. S., Sheikh M. A. & Pasha I., 2005.** Amino acid composition of spring wheats and losses of lysine during chapati baking. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18 : 523–532.
- Assefa S., Geleta B. & Tanner, D.G. 1995.** Yield stability analysis of nine spring bread (Wheat) genotypes on the Central Highlands of Ethiopia. *African Crop Science Journal* 3 : 35-40.
- Autran J. C., 1981.** Sélection et qualité du blé dur. *Cultivar*, 145 : 23-25.

- Bailleux P. & Scharpe A., 1994.** L'agriculture biologique, Commission Européenne, Europe Verte, N°2, Luxembourg..
- Baker B. P., Benbrook C. M., Groth E., Lutz K. & Benbrook L., 2002.** Pesticide residues in conventional, integrated pest management (IPM)-grown and organic foods : insights from three US data sets. *Food Additives and Contaminants*, 19 : 427-446.
- Baker R. J., 1988.** Test for crossover genotype-environment interactions. *Can. J. Plant Sci.* 68: 405-410.
- Baker R. J. & Kosmolak F. G., 1977.** Effects of genotype environment interaction on bread wheat quality in western Canada. *Can. J. Plant Sci.*, 57 : 185-191.
- Barbier H., 2004.** Recherche de Marqueurs associés à la Contrainte en Azote et en Carbone chez la Vigne (*Vitis vinifera* var. Cabernet Sauvignon). Thèse, Université Victor Segalen Bordeaux 2, 204pp.
- Bard M., 1997.** Le cahier des charges farine : signification, interprétation, limites des mesures analytiques. Information apportée par les analyses physico-chimiques sur les farines. *Industrie des céréales*, 103.
- Baril C. P., 1992.** Factor regression for interpreting genotype-environment interaction in bread-wheat trials. *Theory and Applied Genetics* 83 : 1022-1026.
- Barneix A. J., 2006.** Physiology and biochemistry of source-regulated protein accumulation in the wheat grain. *Journal of Plant Physiology*, 164 : 581-590.
- Becker H. C., 1981.** Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30 : 835-840.
- Becker H.C. & Léon J., 1988.** Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101 : 1-23.
- Benedito De Barber C., Prieto J. A. & Collar A., 1989.** Reversed-phase high-performance liquid chromatography analysis of changes in free amino acids during wheat dough fermentation. *Cereal Chemistry*, 66(4) : 283-288.
- Ben Khedher M., 2000.** Bases principes et réglementation de l'agriculture biologique. Centre Technique de l'Agriculture Biologique.
- Ben Salem M., 1988.** Etude comparative de la résistance à la sécheresse de quelques variétés de blé. Thèse de Doctorat d'Etat. Univ. Paris VII, Centre de Jussieu. 379p.
- Ben Salem M., Daaloul, A. & Ayadi A., 1995.** Le blé dur en Tunisie. *CIHEAM - Options Méditerranéennes* : 81-91.
- Beopoulos N., 1997.** Environnement et développement économique de l'espace rural : La contribution de l'agriculture biologique. *The Greek Review of Social Research*, N°92-93, Athens :. 183-205.

- Berry P., Sylvester-Bradley, R., Philipps R., Hatch D. J., Cuttle S. P., Rayns F. W. & Gosling P., 2002.** Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen ? *Soil Use Management*. 18 : 248-255.
- Birzele B., Prage A. & Kramer J., 2000.** Deoxynivalenol and ochratoxin A in German wheat and changes of level in relation to storage parameters. *Food Add. Cont.*, 17 : 1027-1035.
- Blum A., Ramaiah S., Kanemasu E. T. & Paulsen G. M., 1990.** Recovery of wheat from drought stress at the tillering developmental stage. *Field Crop Res.* ; 24 : 67-85.
- Boila R. J., Stothers S. C. & Campbell L. D., 1996.** The relationship between the concentrations of individual amino acids and protein in wheat and barley grown at selected locations throughout Manitoba. *Canadian Journal of Animal Science*, 76 (2) : 163-169.
- Bonnemort C., 2000.** Tournesol biologique: avancées techniques dans le domaine de la production agricole. CETIOM. France.
- Borelli G. M., Troccoli A., Di Fonzo N. & Fares C., 1999.** Durum wheat lipoxygenase activity and other quality parameters that affect pasta color. *Cereal chem.*, (76), P335-340.
- Bollen L., & Sinnaeve G., 1994.** Méthodes d'appréciation de la qualité boulangère d'un blé ou d'une farine. *C.R.A. Gembloux Station de Haute Belgique*.
- Borghi B., Cobellini M., Minoia C., Palumbo M., Di Fonzo N. & Perenzi M., 1997.** Effects of Mediterranean climate on wheat bread-making quality. *Eur.J-Agron* (6), P147-154.
- Boudreau. A., 1992.** Le grain de blé. *Dans Le blé. Éléments fondamentaux et transformation.* Éditeur : A. Boudreau et G. Ménard. *Les Presses de l'Université Laval, Sainte-Foy*. pp. 25-50.
- Bourgeois C. F., 2003.** Les vitamines dans les industries agroalimentaires. Edition *TEC et DOC*, Paris. 708 pp.
- Bourn D. & Prescott J., 2002.** A comparison of the nutritional value, sensory qualities and food safety of organically and conventionally produced foods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 42 : 1-34.
- Bouzoubaa Z., El Mourid M., Karrou M. & El Gharous M., 2001.** Manuel d'analyse chimique et biochimique des plantes. *Ed. INRA Maroc*.
- Boyeldieu J., 1980.** Les cultures céréalières. *Nouvelles encyclopédie des connaissances agricoles*.
- Brancourt-Hulmel M., 2000.** Sélection pour l'adaptation au milieu et prise en compte des interactions génotype/milieu. *OCL* 7 : 504-511.

- Brancourt-Hulmel M. & Lecomte C., 1994.** Sélection et stabilité du rendement chez le blé tendre d'hiver. *Agronomie* 14 : 611-625.
- Brancourt-Hulmel M., Biarnès-Dumoulin V., & Denis J. B., 1997.** Points de repères dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes. *Agronomie* 17 : 219-246.
- Brandt D. A., Brand T. S. & Cruywagen C. W. 2000.** The use of crude protein content to predict concentrations of lysine and methionine in grain harvested from selected cultivars of wheat, barley and triticale grown in the western cape region of South Africa. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 30 : 22-25.
- Brangeon J.-L. & Chitrit J.-J., 1999.** Les éléments de durabilité de l'agriculture biologique. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, N°38, 53-66.
- Branlard G. & Dardevet M., 1985.** Diversity of grain proteins and bread wheat quality. I. Correlation between gliadin bands and flour quality characteristics. *J. Cereal Sci.*, 3 : 329-343.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Mchet J. M., Meynard J. M. & Delécolle R., 1998.** STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomy* 18 : 311-346.
- Brunori A., Galterio G., Zanntino C. & Pogna N. E., 1989.** Break-making quality indices in *Triticum aestivum* progenies. Implications in breeding for better bread wheat. *Plant Breeding*, 102 : 222-231.
- Buré J., 1997.** La pâte de farine de froment, la chimie du blé. Collection réalisée par PROMO-ENSIA.
- Bushuk W., 1986.** Wheat : chemistry and uses. *Cereal Foods World*, 31, (3) : 218-226.
- Caplat G. & Giraudel C., 1996.** L'agriculture biologique et la santé. In «L'agriculture biologique, une agriculture durable ?». Droit comparé de l'environnement. Ed. *PULIM* : 15.39.
- Carrillo J. M., Vazquez J. F. & Orellana J., 1990 a.** Relationship between gluten strength and glutenin proteins in durum wheat cultivars. *Plant Breeding*, 104 : 325-333.
- Carrillo J. M., Rousset M., Qualset C. O. & Kassarda D. D., 1990 b.** Use of recombinant inbred lines of wheat for study of associations of high-molecular weight glutenin subunit alleles to quantitative traits : 1/ grain yield and quality prediction tests. *Theor. Appl. Genet.*, 79 : 321-330.
- Carrillo J. M., Martinez, M. C., Moita C., Brites M. T., Nieto Taladriz M. T. & Vazquez, J. F., 2000.** Relationship between endosperm proteins and quality in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Options Mediterranees*, 40 : 463-467.

- Ceccarelli S., 1989.** Wide adaptation : How wide ? *Euphytica*. 40 : 197-205.
- CEMAGREF, 1999.** Agrobiologie et environnement 1999-2003, *Ed. Cemagref*, 20p.
- Chene C., 2001.** La farine (2<sup>ème</sup> partie). *Journal de l'ADRIANOR*, 12 p.
- Chene C., 2004.** Les amidons. Dossier technique Agro-Jonction N°34. *Journal de l'ADRIANOR*, 8 p.
- Clark M. S., 1999.** Ground beetle abundance and community composition in conventional and organic tomato systems of California's Central Valley. *Applied Soil Ecology*, 11 : (2-3) 199-206.
- Clark M. S., Ferris H., Klonsky K., Lanini. W. T., Van Bruggen A. H. C. & Zalom F. G., 1998.** Agronomic, economic and environmental comparison of pest management in conventional and alternative tomato and corn systems in northern California. *Agriculture ecosystems and environment*, 68, P 51-71.
- Collar C., Mascarods A. F. & Benedito De Barber C., 1992.** Amino acid metabolism by yeast and lactic acid bacteria during bread dough fermentation. *Journal of Food Science*, 57(6) : 1423-4126.
- Cooper M. & DeLacy I. H., 1994.** Relationships among analytical methods used to study genotypic variation and genotype-by-environment interaction in plant breeding multi-environment experiments. *Theoretical Applied Genetics* 88: 561 - 572.
- Cox M. C., Qualset C. O. & Rains D. W., 1986.** Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in Wheat. III. Nitrogen translocation in relation to grain yield and protein. *Crop Science* 26 : 737 - 740.
- Crossa J., 1990.** Statistical analysis of multilocation trials. *Advances in Agronomy* 44:55-86.
- Damidaux R. & Feillet P., 1978.** Relation entre les propriétés visco-élastiques du gluten cuit, la teneur en protéines et la qualité culinaire des blés durs. *Ann. Technol. Agric.*, 28 : 799-808.
- Dacosta Y. 1986.** Le gluten de blé et ses applications. A.P.R.I.A., *ed. Techniques et Documentation Lavoisier*, 129 p.
- Dagnelie P., 1980.** Théories et méthodes statistiques. Vol. 2. *Presses Agronomiques, Gembloux*, 463 p.
- David C., 1996.** Influence of cropping systems and mechanical weed control on weed population in winter wheat. Research on stockless systems in conversion to organic farming. *Barcelona workshop ENOF*.
- Davidson D. J. & Chevalier P. M., 1990.** Pre-anthesis tiller mortality in spring wheat. *Crop Sci* ; 30 : 832-6.

- DeLind L., 2000.** Transforming organic agriculture into industrial organic products : Reconsidering national organic standards. *Human Organization* 59 : 198-208.
- Demirbas A., 2005.**  $\beta$ -Glucan and mineral nutrient contents of cereals grown in Turkey. *Food Chemistry*, 90 : 773-777.
- Denis J. B., 1980.** Analyse de régression factorielle. *Biom. Praxim* 20 : 1-34.
- Denis J. B. & Vincourt P., 1982.** Panorama des méthodes statistiques d'analyse des interaction génotype\*milieu. *Agronomie* 2 : 219-230.
- De Silguy C., 1994.** L'agriculture biologique : Des techniques efficaces et non polluantes. Ed. *Terre vivante*, France / Patino, Suisse. pp. 183.
- Dexter J. E., Matsuo R. R., Kosmolak F. G., Leisle D. & Marchylo B. A., 1980.** The suitability of the SDS-sedimentation test for assessing gluten strength in durum wheat. *Can. J. Plant Sci.*, 60 : 25-29.
- DGPA, 2007.** Base des données service des statistiques de la Direction Générale de la Production Agricole. Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques (Tunisie)
- Dick J. W. & Matsuo R. R., 1988.** Durum wheats and pasta products. P.507-547, *In* : Wheat : Chemistry and Technology. Vol.II, 3<sup>rd</sup>. edition. Pomeranz Y. (ED). *Amer. Assoc. Cereal Chem.*, St. Paul, MN, U.S.A.
- Dlouhy J., 1981.** Alternative forms of agriculture - quality of plant products from conventional and biodynamic growing. Report #91. Department of Plant Husbandry, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Dlouhy J., 1989.** Product quality in alternative agriculture. *In* : food quality - Concepts and methodology - Proceedings of the Colloquium organized by Elm Farm Research Center in association with the University of Kassel. U. K. : Elm Farm Research Center, 30-35.
- Ducasse-Cournac A. M. & Leclerc B., 2000.** La qualité des produits de l'agriculture biologique. ITAB, Paris, 62 p.
- Durant O., 1998.** Les grandes cultures en agriculture biologique. Techniques de base. Chambre d'Agriculture de la Drome. France.
- Eberhart S.A. & Russell W.A., 1966.** Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36-40.
- Eliasson A. C., Cudmundsson M. & Svenson G., 1995.** Thermal behaviour of wheat starch in flour-relation to flour quality, *Lebensm.-wiss. U. -Technol.*, 28, 227-235.
- Ellis F., 2000.** Rural livelihoods and diversity in developing countries. Oxford University Press : Oxford and New York, 296 p.

- Evers A. D., Flintham J. & Kotecha K., 1995.** Alpha-amylase and grain size in wheat. *Journal of Cereal Science*, 21, 1–3.
- Eyhorn F., Heeb M. & Weidmann G., 2002.** Manuel de formation de l'IFOAM sur l'agriculture biologique dans les pays tropicaux. 216 pp.
- FAO, 2000.** Influence de l'agriculture biologique sur l'innocuité et la qualité des aliments. 22<sup>ème</sup> conférence régionale de la FAO pour l'Europe. Porto (Portugal).
- Favier J. C., Feinberg M. & Ireland-Ripert J., 1995.** Répertoire Générale des Aliments - Table de composition. *Lavoisier, coll. Tec et Doc*. Paris
- Feil B. & Stamp P., 1993.** Sustainable agriculture and product quality : a case study for selected crops. *Food Rev. Int.* 9 : 361-388.
- Feillet P., 1984.** The biochemical basis of pasta cooking quality. Its consequences for durum wheat breeders. *Science des Aliments* 4 : 551–566.
- Feillet P., 2000.** Le grain de blé (composition et utilisation), Ed *INRA*, P57-281.
- Feillet P., Ait-Mouh O., Koberehel K. & Autran J. C., 1989.** The role of low molecular weight glutenin proteins in the determination of cooking quality of pasta products: an over view. *Cereal chem.* (66), P26-30.
- Fischer A. & Richter C., 1986.** Influence of organic and mineral fertilizers on yield and quality of potatoes. In : The importance of biological agriculture in a world of diminishing resources-Proceedings of the 5<sup>th</sup>.
- Finesilver T., Johns T. & Hill S. B., 1989.** Comparison of food quality of organically versus conventionally grown plant foods, a review. Ecological Agriculture Projects, Mc Gill University (Mandonald Campus), Quebec, Canada. Report, 45p.
- Finlay K. W. & Wilkinson G. N., 1963.** The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.* 14: 742-754.
- Finnois K. F., Yamazaki W. T, Youngs V. L. & Rubenthaler G. L., 1987.** Quality of hard, soft and durum wheats. In: *Heynes E.G*(Ed), Wheat and wheat improvement 677-748. 26 edition, *American society of agronomy Inc.*, crop science society of America and soil science society of America Inc., Madison, W.I.
- Folke C., Berkes F. & Colding J., 1998.** Ecological practices and social mechanisms for building resilience and sustainability. Cambridge University Press : Cambridge.
- Fontaine L., 2004.** « Qui fait quoi en grandes cultures biologiques ». *Alter Agri* - novembre/décembre 2004 N°68.
- Foucteau V., 2001.** Méta-analyse statistique: intégration de trois réseaux d'expérimentation pour améliorer l'efficacité de la sélection des variétés de tournesol. Thèse, Institut National Agronomique Paris-Grignon 156pp.

- Fowler D. B. & De la Roche I. A., 1975.** Wheat quality evaluation. 3. Influence of genotype and environment. *Can. J. Plant Sci.*, 55 : 263-269.
- Francis T.R. & Kannenburg L. W., 1978.** Yield stability studies in short-season maize. I. A descriptive method for grouping genotypes. *Can. J. Plant Sci.* 58: 1029-1034.
- Freeman G. H., 1973.** Statistical methods for the analysis of genotype-environment interactions. *Heredity* 31(3): 339 - 354.
- Gail M. & Simon R., 1985.** Testing for qualitative interactions between treatment effects and patient subsets. *Biometrics* 41: 361-372.
- Gallais A., 1992.** Adaptation et Adaptabilité en Amélioration des Plantes. Le Sélectionneur Français 42 : 55-57.
- Garrido-Lestache E., Lopez-Bellido R. J. & Lopez-Bellido L., 2005.** Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *Europ. J. Agronomy*, 23 : 265–278
- Gate P., 1995.** Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture. *Lavoisier Tec and Doc.* , Paris, 430 p.
- Gautronneau Y., 1997.** Les agriculteurs et l'agriculture biologique, une situation paradoxale. Cas de la production céréalière. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, N°30, 53-57.
- Gautronneau Y., David C., Nocquet J., Gaillard C. & Godet J., 1997.** Conversion to organic stockless systems, on Farm Research in South East of France. *Final Report. Contrat AIR3 CT 93-0852, CEF DG VI/ISARA-CEREF.*
- Gautronneau Y., Godard D., Le Pape Y., Sebillotte M., Bardet C., Bellon S. & Hocde H., 1981.** Une nouvelle approche de l'agriculture biologique. *Economie Rurale*, n°142.
- Gélinas Y., Krushevskaja A. & Barnes R. M., 1998.** Determination of total iodine in nutritional and biological samples by ICP-MS following their combustion within an oxygen stream. *Analytical Chemistry* 70 : 1021–1025.
- Gooding M. J., Davies W. P., Thompson A. J. & Smith S. P., 1993.** The challenge of achieving breadmaking quality in organic and low input wheat in the UK. A review. *Aspects Appl. Biol.* 36 : 189-198.
- Granstedt A. G. & Kjellenberg L., 1997.** Long-term field experiment in Sweden : effects of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and crop quality. *Agricultural Production and Nutrition, Proceeding of an International conference (Boston, 19-21 mars 1997)*, 79-90.
- Gregorius H. R. & Namkoong G., 1986.** Joint analysis of genotypic and environmental effects. *Theor. Appl. Genet.* 72: 413-422.
- Guét G., 1992.** Agriculture biologique méditerranéenne. Guides pratique à usage professionnel. 518 p.

- Guet G., 1999.** Mémento d'agriculture biologique. Editions *Agridécisions*, France. 346 p.
- Gyory Z., Triboi E., Szilagyi S., Triboi A. M., Branlard G. & Borbely M. 2002.** Diatery fiber and element content of winter wheat cultivated in different climatic conditions. *Proceeding ICC Conference, Budapest 26-29 May 2002, Hungary.*
- Halberg N. & Kristensen I. S., 1997.** Expected crop yield loss when converting to organic dairy farming in Denmark. *Biol. Agric. Hortic.* 14 : 25-41.
- Halweil B., 2006.** L'agriculture biologique peut-elle nous nourrir tous ? *L'état de la planète*, n°27, 9p : [www.delaplanete.org](http://www.delaplanete.org)
- Hamm U., Gronefeld F. & Halpin D., 2002.** Analysis of the European market for organic food. Organic market initiatives and rural development, vol.1, school of management and business, University of Wales, 129p.
- He H. & Hoseney R. C., 1992.** Effect of the quality of wheat flour protein on bread loaf volume. *Cereal Chemistry*, 69 : 17–19.
- Hemingway R. G., 1999.** The effect of changing patterns of fertilizer application on the major mineral composition of herbage in relation to the requirements of cattle: a 50-year review. *Animal Science*. 69: 1, 1-18.
- Hogstad S., Risvik E. & Steinsholt K., 1997.** Sensory quality and chemical composition of carrots: a multivariate study. *Acta Agricultura Scandinavica*, 47 : 253-264.
- Hubbard R. K., Leonard R. A. & Johnson A. W., 1991.** Nitrate transport on a sandy coastal plain soil underlain by plinthite. *Trans. ASAE* 34 : 802-808.
- Hühn M., 1996.** Non-parametric analysis of genotype x environment interactions by ranks. *In: Genotype by Environment Interaction*. Kang & Gauch. (eds). CRC Press, Boca Raton, New York. pp 213-228.
- IFOAM, 2001.** Basic standards for organic production and processing 2002. 2<sup>nd</sup> Draft, status October 2001. Available from : [www.ifoam.org](http://www.ifoam.org).
- IFOAM, 2007.** The World of organic agriculture. Statistics and emerging trends. 250 p.
- Indrani D. & Rao G. V., 2000.** Effect of chemical composition of wheat flour and functional properties of dough on the quality of south Indian parotta. *Food Research International*, 33 : 875–881.
- ITCF & ONIC, 1995.** Contrôle de la qualité des céréales et protéagineux, guide pratique, 268 p.
- Jamieson P. D., Porter J., Goudriaan J., Ritchie J.T., Van Keulen H. & Stol W., 1998.** A comparison of the model AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Research* 55 : 23 - 44.

- Jeuffroy, M. H., Barré C., Bouchard C., Desmotes-Mainard S., Devienne-Barret F., Girard M. L. & Recous S., 2000.** Fonctionnement d'un peuplement de blé en condition de nutrition azotée sub-optimale. *In: Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales. INRA, Paris.*
- Jood S., Kapoor A. C. & Singh R., 1995.** Amino acid composition and chemical evaluation of protein quality of cereals as affected by insect infection. *Plant Foods for Human Nutrition*, 48 (2) : 159–167.
- Joyeux H., 2000.** Le bio plus nutritif, c'est prouvé. Magazine Avantages. France.
- Kang, M.S. & Gorman, D.P. 1989.** Genotype x environment interaction in maize. *Agronomy Journal* 81: 662-664.
- Kent N. L. & Evers A. D., 1994.** Technology of Cereals, 4th Edition. *Pergamon Press, Oxford.*
- Kettlewell P. S., 1999.** The response of alpha-amylase activity during wheat grain development to nitrogen fertilizer. *Annals of Applied Biology*, 134, 241–249.
- Kilcher L., 1996.** Agriculture biologique. IRAB et FiBL/srva. Suisse.
- Kilcher L., Weidmann G. & Freyer B., 1996.** Agriculture biologique : la reconversion. IRAB. Suisse.
- Kindred D. R., Gooding M. J. & Ellis R. H., 2005.** Nitrogen fertilizer and seed rate effects on Hagberg falling number of hybrid wheats and their parents are associated with  $\alpha$ -amylase activity, grain cavity size and dormancy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 727–742.
- Kleijer G., 2002.** Sélection des variétés de blé pour la qualité boulangère. *Revue suisse Agric.*, 34(6) : 253-259.
- Kolbe H., Meineke S. & Zhang W. L., 1995.** Institute for Plant Nutrition, Germany : Differences in organic and mineral fertilisation on potato tuber yield and chemical composition compared to model calculations, *Agribiol. Res.*, 48(1) : 63-73.
- Köpke U., 1995.** Nutrient management in organic farming systems : the case of nitrogen. Nitrogen leaching in organic agriculture. *Biol. Agr. Hort.* 14 : 15-29.
- Kuhn F., 1999.** Bestimmung von Trichotheceinen in Weizen aus verschiedenen Anbausystemen mittels HPLC-MS. Diplomarbeit, Universität Basel, 60 p.
- Lairon D., Lafont H., Léonardi J., Hauton J. C. & Ribaud P., 1982.** Comparaison de l'intérêt nutritif de légumes produits par l'agriculture conventionnelle ou biologique. *Sci. Aliments*, 2 (HS II) : 203-205.

- Lairon D., Termine E., Gauthier S. & Lafont H., 1985.** Teneurs en nitrates des productions maraîchères obtenues par des méthodes de l'agriculture biologique. *Sci. Aliments*, 5 (HS V) : 337-343.
- Lairon D., Termine E., Gauthier S., Trouilland M., Lafont H. & Hauton J., 1984b.** Effects of organic and mineral fertilizations on the contents of vegetables in mineral, vitamine C and nitrates. Proceedings of the 5<sup>th</sup> IFOAM *int.* scientific conference. H. vogtman ed. P249- 260.
- Lairon D., Termine E. & Lafont H., 1984a.** Valeur nutritionnelle comparée des légumes obtenus par les méthodes de l'agriculture biologique ou de l'agriculture conventionnelle. *Cah. Nut. Diet.* XIX. 6 : 331-339.
- Lammers Van Bueren E. T., Struik P. C. & Jacobsen E., 2002.** Ecological concepts in organic farming and their consequences for an organic crop ideotype: *Neth. J. Agri. Sc.* (50), P1-26.
- Landi A., 1993.** Durum wheat, semolina and pasta quality characteristics for an Italian food compagny. Séminaire Méditerranéen, Paris, 22 : 33-39.
- Largo S., 2001.** Identification des variétés de blé tendre panifiables les mieux adaptées à l'agriculture biologique. *ISARA-ITCF*. 63 p.
- Lasztity R., 1984.** The chemistry of cereal proteins. CRS Press, Inc., *Boca Raton*, Florida, USA, p131-151.
- Latouche K., Rainelli P. & Vermersch D., 1998.** Quel prix pour la sécurité alimentaire ? Une évaluation contingente suite à la crise européenne de la « vache folle ». Doc INRA , 19p.
- Le Clech B. & Hachler B., 2003.** (Eds) Agriculture Biologique. Synthèse agricole Ed. *Lavoisier*. 312 p.
- Leclerc B., 1989.** Cinétique de minéralisation de l'azote des fertilisants organiques et teneurs en nitrates chez *Lactuca sativa* et *Daucus carota*. Thèse de doctorat, ENSA, Toulouse, 237p.
- Leclerc B., 1995.** Agriculture biologique et qualité des eaux, ITAB n°6, 25p.
- Leclerc J., Miller M. L., Joliet E. & Rocquelin G., 1991.** Vitamin and mineral contents of carrot and celeriac grown under mineral or organic fertilization. *Biol-Agric-Hort.*, 7 : 339-348.
- Le Gouis J., Béghin D., Heumez E. & Pluchard P., 2000.** Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiency in winter wheat. *European Journal of Agronomy* 12:163-173.
- Leibl M., 2000.** Ecological agriculture in protected areas in Czech Republic. In Alföldi *et al.* (Proceedings 13<sup>th</sup> International IFOAM Scientific Conference, IFOAM. Germany).

- Lemaire G. & Gastal F., 1997.** N uptake and distribution in plant canopies. In: Diagnosis of the nitrogen status in the crop. *Springer-Verlag*.
- Lemiegre F., Lebeau Y. & Lemaitre G., 2001.** Premier importateur mondial de blé dur : Le Maghreb peut être un marché pour la France. *Perspectives agricoles*, 266 : 6-12.
- Leuillet M., Grosjean F. & Gatel F., 2002.** Flore fongique et mycotoxines, céréales à paille française : qualité sanitaire satisfaisante. *Perspectives agricoles* n° 278, p24-42.
- Lewicki S. & Chery J., 1992.** Etude de l'accumulation et de la remobilisation de l'azote chez l'orge (*Hordeum vulgare* L) : comparaison de variétés possédant ou non le gène de semi-nanisme (*sdw*). *Agronomie* 12 : 235 - 245.
- Lii C.-Y. & Lineback D. R., 1977.** Characterization and comparison of cereal starches. *Cereal chem.* 54 ; 138-149.
- Lin C. S. & Binns M. R., 1988.** A superiority measure of cultivar performance for cultivar X location data. *Canadian Journal of Plant Science* 68: 193-198.
- Lin C. S., Binns M. R. & Lefkovitch L. P., 1986.** Stability Analysis: Where do we stand? *Crop Science* 26: 894-899
- Lintas C., 1988.** Carbohydrates of durum wheat, in: *Durum, chemistry and technology*, Fabriani G., Lintas C. (Eds), American Association of Cereal Chemists: St. Paul, Minnesota, p.121-138.
- Lockeretz W., Schearer G. & Kohl D. H., 1981.** Organic farming in the corn belt. *Science*, 211 : 540-547.
- Lopez-Bellido L., Lopez-Bellido R.-J., Castillo J. E. & Lopez-Bellido F. J. 2001.** Effects of long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on bread-making quality of hard red spring wheat. *Field Crop Res.* 72 : 197–210.
- Luo C., Branlard G., Griffin W. B. & McNeil D. L., 2000.** The effect of nitrogen and sulphur fertilisation and their interaction with genotype on wheat glutenins and quality parameters. *Journal of Cereal Science*, 31 : 185-194.
- Luo M., Bilodeau P., Koltunow A., Dennis, E. S., Peacock, W. J. & Chaudhury A. M. 1999.** Genes controlling fertilization-independent seed development in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96 : 296-301.
- Mader L., Pfiffner, Niggli U., Balzer U., Balzer F., Plochberger A., Velimirov, Boltzmann L. & Besson J. M., 1993.** Effect of three farming systems (bio-dynamic, bio-organic, conventional) on yield and quality of beetroot (*Beta vulgaris* L. var. *esculenta*) in a seven year crop rotation. *Acta Horticulturae*, 339 : 11-31.
- Mäder P., Fließbach A., Dubois D., Gunst L., Fried U. & Niggli U., 2002.** Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296, 1694-1697.

- Malmauret L., Parent-Massin D., Hardy J. L. & Verger P., 2002.** Contaminants in organic and conventional foodstuffs in France. *Food Additives and contaminants*, 19(6) : 524-532.
- Mansvelt v., J. D. & Lubbe v. d., M.J., 1999.** Checklist for sustainable landscape management. Final report of the EU concerted action AIR3-CT93-1210 : *The landscape and nature production capacity of organic/sustainable types of agriculture*. Amsterdam: Elsevier.
- Mares D. & Mrva K., 2007.** Late-maturity  $\alpha$ -amylase: Low falling number in wheat in the absence of preharvest sprouting. *Journal of Cereal Science*, 1-12.
- Mares D., Mrva K. & Panozzo J. F., 1994.** Characterization of the high  $\alpha$ -amylase in grain of the wheat cultivar, BD159. *Australian Journal of Agricultural Research*, 45, 1003–1011.
- Martin A., 2001.** Apports nutritionnels conseillés pour la population française, 3<sup>ème</sup> ed, Cnerna-Afssa. *Lavoisier, Tec et Doc*, Paris, 605 p.
- Martin G., 1994.** Comment mieux appréhender la qualité des variétés. *Industrie des céréales* 59 :15-18.
- Maruejols B. & Vidal A., 1999.** Comparaison agricultures conventionnelle et biologique, résidus de pesticides sur salades. Rapport, 12 p.
- Matuz J., Bartok T., Morocz-Salamon K. & Bona, L., 2000.** Structure and potential allergenic character of cereal proteins -I. Protein content and amino acid composition. *Cereal Research Communications*, 28 (3) : 263–270.
- Matz, S.A. 1987.** Ingredients for bakers. *Pan-Tech International*, Mc Allen, Texas.
- Medcalf D. G. & Gilles K. A., 1965.** Wheat starches. I. Comparison of physicochemical properties. *Cereal Chem*, 42 : 558-568.
- Menger, A., 1973.** Problems concerning vitreousness and hardness of kernels as quality factors and durum wheat. Proceeding of a symposium on genetics and breeding durum wheat, Bari, Italy (G.T.Scarascia Mugnozza, ed.), P563-571.
- Metho L. A., Hammes P. S. & Randall P. G. 1999.** Effects of cultivar and soil fertility on grain protein yield, protein content, flour yield and breadmaking quality of wheat. *J. Sci. Food Agric.* 79 : 1823-1831.
- Michelsen J., 2001.** Organic Farming in Regulatory Perspective. The Danish case. *Sociologia Ruralis* 41: 62-84.
- Millard P., 1986.** The nitrogen content of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers in relation to nitrogen application - the effect on amino acid composition and yields. *J. Sci. Food Agri.*, 37 : 1107-1143.
- Minnar C., 1995.** Qualités... en quantité! *Alter Agri* n°13 : 28-29.

- Minnar C., Lizot J. F., Julien R. & Taupier-Letage, B., 1996.** Carotte biologique: quels critères de différenciation. *Alter Agri*, 19. GARAB. Belgique.
- Miskelly, D. M., 1984.** Flou components affecting paste and noodle colour. *J. Sci. Food Agric.*, 35 : 363-471.
- Moore R., Spackman D. & Syein W., 1958.** Chromatography of amino acids on polystyrene sulfonated resins. *Anal. Chem.* 30 : 1185-1206.
- Morel R., Lasnier T. & Bourgeois S., 1984.** Les essais de fertilisation de longue durée de la station agronomique de Grignon. Ed. *INRA*, Paris, 335 p.
- Mosconi G. & Bozzini A., 1973.** Effect of application of late nitrogen fertilizer to durum wheat. *Revista di agronomia* (7), P75-82.
- Mottram D. S., Wedzicha B. L. & Dodson A. T., 2002.** Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*, 419(6906) : 448–449.
- Mrva K., Wallwork M. & Mares D. J., 2006.**  $\alpha$ -Amylase and programmed cell death in aleurone of ripening wheat grains. *Journal of Experimental Botany*, 57, 877–885.
- MSDA, 1994.** Céréales, produits de l'industrie meunière, prémélanges pour four, mélanges de farine, farines instantanées, 124p.
- Nassar R. & Hühn M., 1987.** Studies on estimation of phenotypic stability: Test of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics* 43: 45-53.
- Nelson J. M., 1982.** Modification of starch and its effect on pasta quality. Ph. D. dissertation, North Dakota State University, Fargo, North Dakota.
- Niggli U., Alföldi T. & Mäder P. 1998.** Systèmes de culture : La suisse compare depuis 20 ans. *Alter Agri* n°28 : 22-26.
- Offerman F. & Nieberg H., 2000.** Economic performance of organic farms in Europe in organic farming in Europe: economics and policy. University of Hohenheim Eds., 198p.
- O'Leary G., Connor D. & White D., 1985.** A simulation Model of the Development, Growth and Yield of the Wheat Crop. *Agricultural Systems* 17 : 1-26.
- ONIC, 2000.** Collecte de céréales bio campagne 1999-2000. 4 p.
- Paillard G., Roussel P. & Chiron H., 2002.** Les Pains Français. *Maé-Erti éditeurs. J Abécassis, INRA.* 433p.
- Panozzo J. F. & Eagles M. A., 1999.** Rate and duration of grain filling and grain nitrogen accumulation of wheat cultivars grown in different environments. *Australian Journal of Agricultural Research* 50 : 1007 - 1015.

- Papakosta D. K. & Garianas A. A., 1991.** Nitrogen and Dry Matter Accumulation, Remobilization, and Losses for Mediterranean Wheat during Grain Filling. *Agronomy Journal* 83 : 864 - 870.
- Payne P. I., Nightingale M. A., Krattiger A F. & Holt L. M., 1987.** The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties. *J. Sci. Food Agric.*, 40 : 51-65.
- Perkins J. M. & Jinks J. L., 1968.** Environmental and genotype-environmental components of variability. III. Multiple lines and crosses. *Heredity* 23, 339-356.
- Perten H., 1989.** Gluten index : une méthode rapide pour la mesure des caractéristiques du gluten humide. *Industrie des Céréales*, 61 : 25-29.
- Perten H., 1990.** Rapid measurement of wet gluten quality by the gluten index, *Cereal Foods World* 35 (4) : 401-402.
- Peto R., 1982.** Statistical aspects of cancer trials. In: *Treatment of Cancer*, Eds. E.E Halnan, pp. 867-871. Chapman and Hall, London.
- Pither R. & Hall M. N., 1990.** Extrait du Memorandum n°597. Analytical survey of the nutritional composition of organically grown fruit and vegetables, Campden.
- Plaisted R. L. & Peterson L. C., 1959.** A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations or seasons. *Am. Potato J.* 36: 381-385.
- Pogna N. E., Redaelli R., Dachkevitch T., Curioni A. & Dal Belin Peruffo A., 1994.** Genetics of wheat quality and its improvement by conventional and biotechnological breeding. In: Bushuk, W., Rasper, V.F. (Eds.), *Wheat Production, Properties and Quality*. Chapman Hall, London.
- Pommer G. & Lepschy J., 1985.** Investigation of the contents of winter wheat and carrots from different sources of production and marketing. *Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch*, 62 : 549-563.
- Potier de Courcy G. & les membres du group de travail de la CEDAP sur les substances nutritives, 1999.** Estimation du statut en vitamines et minéraux de la population française, d'après des enquêtes récentes. *Cah. Nutr. Diét.*, 34(2) : 77-87.
- Poutala R. T., Kuoppamaki O., Korva J. & Varis E. 1994.** The performance of ecological, integrated and conventional management systems in cereal cropping in Finland. *Field crops Res.* 37 : 3-10.
- Promayon F. & David C., 1996.** Nitrogen nutrition management in winter wheat in organic farming. ESA, 4<sup>th</sup> congress. 7-11 july. The Netherland (poster).
- Prunty L. & Greenland R., 1997.** Nitrate leaching using two potato-corn N-fertilizer plans on sandy soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 65 : 1- 13.

- Przulj N. & Momcilovic V., 2001.** Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation and translocation in two-rowed spring barley. II. Nitrogen translocation. *European Journal of Agronomy* 15 : 255-265.
- Quaglia G. B., 1988.** Other durum wheat products. P263-282, *in* : Durum wheat : Chemistry and technology. Fabriani G. & Lintas (Eds.). *Amer. Assoc. Cereal Chem.*, St. Paul, MN, USA.
- Raiffaud C., 2001.** Produits « Bio » de quelle qualité parle-t-on ? 191pp.
- Ramboatiana R., 2002.** L'agriculture biologique, un facteur de développement économique et social pour les pays du tiers-monde.
- Rauter W. & Wolkerstorfer W., 1982.** Nitrat in gemuse. *Z. Lebensm. Unters Forsch.*, 175 : 122-124.
- Rembalkowska E., 2000.** The nutritive and sensory quality of carrots and white cabbage from organic and conventional farms. In: Proceeding of the 13<sup>th</sup> IFOAM Conference, 297.
- Riou C., 1993.** L'eau et la production végétale. *Sécheresse*, 2 : 75-83.
- Rölling, N. G. & Jiggins J., 1998.** The ecological knowledge system. Cambridge University Press : Cambridge, pp 283-311.
- Ruiz M. & Carrillo J. M., 1995.** Relationships between different prolamin proteins and some quality properties in durum wheat. *Plant Breeding*, 114 : 40-44.
- Ryan J. & Matar A., 1992.** Fertilizer Use Efficiency Under Rainfed Agriculture in West Asia and North Africa. *ICARDA*, Aleppo, Syria.
- SAS Institute, 2001.** SAS Institute, 2001. SAS® User's Guide: Basics. Release 6.12 Ed. *SAS Institute Inc.*, Cary, NC.
- Schmidt H. & Von Fragstein P., 1999.** Importance of varying management and environment conditions in long term crop rotation trial, *In* J.E. Olesen, R. Eltun, M.J. Gooding, E.S. Jensen & U. Kopke: Designing and testing crop rotations for organic farming. Report n°1, Copenhagen, P191-202.
- SETRAB, 2000.** Etude des teneurs en résidus de pesticides dans les produits biologiques bruts et transformés. Document en cours de rédaction.
- Shewry P., Tatham A. S., Forde J., Kreis M. & Mifflin B. J., 1986.** The classification and nomenclature of wheat gluten proteins. A reassessment. *J. Cereal Sci.*, 4 : 97-106.
- Shukla G. K., 1972.** Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity* 29, 237-245.
- SJFI, 1998.** Account statistics of organic farming 1996/1997. Série G n°1. Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Copenhagen, 1998, 95p.

- Smith B. L., 1993.** Organic foods versus supermarket foods : element levels. *Journal of Applied Nutrition* n°45 (1) : 35-39.
- Solana P., 1999.** La bio : de la terre à l'assiette. Ed. *Sang de la terre*. Paris, France, 252 p.
- Sombrero, A. & Monneveux, P., 1989.** Le mitadinage chez le blé dur (*T. Durum*. Desf) : influence de l'alimentation azotée et hydrique et de la variété. *Agr.Med.* Vol (119), P340-360.
- Soulaka A. B. & Morrison W. R., 1985.** The amylose and lipid content, dimensions, and gelatinisation characteristics of some wheat starches and their A- and B-granule fractions. *J. Sci. food Agri.*, 36 : 709-718.
- Spampinato R. G., 2000.** Organic agriculture in Mount Etna Park. In *Stolton et al.* (2000) (the relationship between Nature Conservation, Biodiversity and Organic Agriculture, IFOAM. Germany).
- Stadler R. H., Blank I., Varga N., Robert F., Hau J. & Guy P. A., 2002.** Acrylamide from Maillard reaction products. *Nature*, 419(6906) : 449-450.
- Stark J. C. & Longley T. S., 1986.** Changes in spring wheat tillering patterns in response to delayed irrigation. *Agron J.* ; 78 : 892-6.
- Steel R. G. & Torrie J. H., 1980.** Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill, New York.
- Stewart G. R. & Lee J., 1974.** The role of proline accumulation in halophytes. *Planta*, 12 : 297-289.
- Stolton S. & Geier B., 2002.** Biodiversité et agriculture biologique. Conférence paneuropéenne à haut niveau sur l'agriculture et la biodiversité. Maison de l'UNESCO. Paris (France). 5-7 juin 2002.
- Svensson G., 1990.** Linkages between sprouting resistance and some agronomic traits in wheat. In: Ringlund, K., Mosleth, E., Mares, D. (Eds.), *Fifth International Symposium on Pre-Harvest Sprouting in Cereals*. Westview Press, Boulder, Co, USA, pp. 227-232.
- Taeymans D., Wood J., Ashby P., Blank I., Studer A. & Stadler R. H., 2004.** A review of acrylamide: An industry perspective on research, analysis, formation and control. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(5) : 323-347.
- Tamis W. L. M. & Van Den Brink W. J., 1999.** Conventional, integrated and organic winter wheat production in the Netherlands in the period 1993-1997. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 76 : (1) 47-59.
- Tamm L., 2000.** The future challenge and prospects in organic crop protection. *Proc. Intern. IFOAM Scientific Conference*, Basel, 106-109.

- Taylor B. R., Watson C. A., Stockdale E. A., Mc Kinlay R. G., Younie D. & Cranstoun D. A. S., 2001.** Current practices and future prospects for organic cereal production. Survey and literature review, HGCA, 45, 90p.
- Tejada M. & Gonzalez J. L., 2003.** Application of a byproduct of the two-step olive oil mill process on rice yield. *Agrochimica* (submitted for publication).
- Temperly A., Kunsch V., Scharer H., Konrad P., Suter H., Ott P., Eichenberger M. & Schmid O., 1982.** Einfluss zweier Anbauweisen auf den Nitratgehalt von Kopfsalat. *Schweiz. Landw. Fo.*, 21(3-4) : 167-196.
- Termine E., Lairon D., Taupier-Letage B., Gauthier S. & Hauton J.C., 1984.** Influence des techniques de fertilisation organique et minérale sur la valeur nutritionnelle de légumes. *Sci. Aliments*, 4 (HSIII) : 273-277.
- The Rodale Institute, 2000.** Organic food grade soybeans. [www.rodalinstitute.org/science/soybeans.html](http://www.rodalinstitute.org/science/soybeans.html)
- Tohver M., Kann A., Täht R., Mihhalevski A. & Hakman J., 2005.** Quality of triticale cultivars suitable for growing and bread-making in northern conditions. *Food Chemistry*, 89, 125–132
- Tovey H., 1997.** Food, environmentalism and Rural Sociology : On the Organic Farming Movement in Ireland. *Sociologia Ruralis* 37 : 21-37.
- Triboï E., 1990.** Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre. *Agronomie*, 10 : 191-200.
- Triboï A. M. & Triboï E., 2002.** Système de culture avec légumineuses comme source d'azote : effet sur le rendement et la qualité du blé. Proceeding workshop : problèmes sur la qualité du blé d'automne en Moldavie. (Ed. V. Sanduleac). Institut des recherches Selectzia, 28 Juin 2002, Balti, Moldavie.
- Valdayron G., Seguela J. M. & Matweef M., 1957.** De quelques conclusions sur trois années d'étude sur le mitadinage du blé dur en Tunisie. *Annales de service botanique agronomique de Tunisie*, vol (30), P 1-32.
- Van Elsen T., 2000.** Species diversity as a task for organic agriculture in Europe. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 77 : (1-2) 101-109.
- Varis E., Pietila L. & Koikkalainen K., 1996.** Comparaison of Conventional, Integrated and Organic Potato Production in Field Experiments in Finland. *Acta Agriculturae Scandinavica*, Sect. B Soil and Plant. Sci., 46 : 41-48.
- Viaux P., 1999.** Une 3<sup>ème</sup> voie en grande culture : Environnement, Qualité, Rentabilité. Ed. *Agridécisions*. Paris. pp. 211.
- Villeneuve F., 1992.** La carotte guide pratique. *Ctifl*. Tome 2. 206 p.

- Vogtmann H., 1984.** Organic farming practices and research in Europe. In: Kral DM Hawkins S. L., eds. *Organic Farming : Current Technology and 1<sup>st</sup> Role in a Sustainable Agriculture*. Madison, Wis : American Society of Agronomy, Crop Science Society of America. Soil Science Society of America, 19-36.
- Vogtmann H., Matthies K., Kehres B. & Meier-Ploeger A., 1993.** Enhanced food quality : effects of composts on the quality of plant foods. *Compost Science et utilization*. Premier issue, 82-100.
- Vos J. 1985.** Aspects of modelling post-floral growth of wheat and calculations of the effects of temperature and radiation., In W. Day and R. K. Atkin, eds. *Wheat growth and modelling*.
- Wang G. Y., Abe T. & Sasahara T., 1998.** Concentrations of grains of rice (*Oryza sativa* L.) cultivated under organic and customary farming practices. *Japanese journal of crop science*, 67 : ( 3), P307-311.
- Wang W. X., Brak T., Vinocur B., Shoseyov O. & Altman A., 2003.** Abiotic resistance and chaperones : possible physiological role of SP1, a stable and stabilising protein from *Populus*. In : Vasil I. K. (ed) *plant biotechnology 2000 and beyond*. Kluwer Dordrecht, 439-443.
- Warman P. R. & Haward K. A., 1997.** Yield, vitamin and mineral contents of organically and conventionally grown carrots and cabbage. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 61 : (2-3) 155-162.
- Warman P. R. & Haward K. A., 1998.** Yield, vitamin and mineral contents of organically and conventionally grown potatoes and sweet corn. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 68 : (3) 207-216.
- Wieser H. & Seilmeier W., 1998.** The influence of nitrogen fertilisation on quantities and proportions of different protein types in wheat flour. *J. Sci. Food Agric.*, 76 : 49-55.
- Willm C. L. & Fourre N., 1998.** La gestion des cendres en meunerie. *Industrie des céréales*, 108.
- Wöse K., Lange D., Botss C. & Bogl K. W., 1997.** A comparison of organically and conventionally grown foods-results of a review of the relevant literature. *Journal of the science of food and agriculture*, 74: (3), P281-293.
- Wrigley C. W. & Bietz J. A., 1988.** Proteins and amino acids. In: Pomeranz, Y. (Ed.), *Wheat Chemistry and Technology*, Vol. 1. *American Association of Cereal Chemists, Inc.*, St. Paul, Minnesota, pp. 159–275.
- Wricke G., 1962.** Über eine methode zur erfassung der ökologischen Streubreite in feldversuchen. *Z. Pflanzenzüchtg.* 47: 92-96.
- Wricke G. & Weber W. E., 1980.** Erweiterte analyse von wechselwirkungen in versuchsserien. In: *Biometrie- heute und morgen*. Köpcke and Überla. (eds). Springer-Verlag, Berlin.

**Wuest S. B. & Gassman K. G., 1992.** Fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated wheat uptake efficiency of preplant versus late- season application. *Agron. J.* (84), P682-688.

**Younie D., Watson C. A. & Squire G. R., 1996.** A comparison of crop rotations in organic farming: agronomic performance. *Aspects Appl. Biol.* , 47, P379-380.

# *ANNEXES*

**Annexe 1.** Carré moyen du rendement en grains de 14 variétés de blé dur dans de deux sites selon deux modes de culture et pendant deux années d'essai combinées.

Source de variation	ddl	Carré moyen
Année (A)	1	92725.42 <sup>***</sup>
Site (S)	1	5242.79 <sup>***</sup>
Année * Site (A * S)	1	4509.45 <sup>***</sup>
r(Année * Site)	12	0.32
Mode (M)	1	1090.22 <sup>***</sup>
Site * Mode (S * M)	1	121.84 <sup>***</sup>
Année * Mode (A * M)	1	3569.50 <sup>***</sup>
Année * Site * Mode (A * S * M)	1	153.47 <sup>***</sup>
r(Année * Site * Mode)	12	0.20
Variété (V)	13	280.61 <sup>***</sup>
Variété * Mode (V * M)	13	29.41 <sup>***</sup>
Site * Variété (S * V)	13	77.85 <sup>***</sup>
Site * Variété * Mode (S * V * M)	13	28.04 <sup>***</sup>
Année * Variété (A * V)	13	130.61 <sup>***</sup>
Année * Variété * Mode (A * V * M)	13	84.18 <sup>***</sup>
Année * Site * Variété (A * S * V)	13	59.03 <sup>***</sup>
Année * Site * Variété * Mode (A * S * V * M)	13	42.26 <sup>***</sup>
Erreur	312	0.33
CV = 2.38		
R <sup>2</sup> = 0.99		
<sup>***</sup> : Différence significative au seuil de probabilité de 0.001		

**Annexe 2.** Analyse de la variance du rendement en grains de 14 variétés de blé dur dans deux sites selon deux modes de culture et pendant les années d'essai 2001 (année difficile) et 2002.

Sources de variation	ddl	Année d'essai 2001		Année d'essai 2002	
		Kef	Bousalem	Kef	Bousalem
Répétition	3	0.41	0.23	0.16	0.55
Mode (M)	1	192.46 <sup>***</sup>	160.99 <sup>***</sup>	3375.03 <sup>***</sup>	1201.92 <sup>***</sup>
Erreur M	3	0.06	0.13	0.24	0.27
Variété (V)	13	58.92 <sup>***</sup>	16.53 <sup>***</sup>	389.38 <sup>***</sup>	82.87 <sup>***</sup>
M * V	13	28.56 <sup>***</sup>	12.25 <sup>***</sup>	95.78 <sup>***</sup>	47.61 <sup>***</sup>
Erreur V	78	0.37	0.14	0.28	0.54
<b>CV</b>		6.03	3.85	1.17	2.30
<b>R<sup>2</sup></b>		0.98	0.98	0.99	0.98
<sup>***</sup> : Différence significative au seuil de probabilité de 0.001					

**Annexe 3.** Analyse de la variance du rendement en grains de 9 variétés de blé dur dans deux sites selon deux modes de culture et pendant l'année d'essai 2003.

<b>Sites</b>		<b>Kef</b>	<b>Bousalem</b>
<b>Source de variation</b>	<b>ddl</b>	<b>Carré moyen</b>	<b>Carré moyen</b>
Répétition	3	0.21	1.69
Mode (M)	1	206.78***	1708.90***
Erreur M	3	0.23	5.80
Variété (V)	8	31.29***	60.49***
M * V	8	111.99***	3.59***
Erreur V	47	0.38	0.75
<b>CV</b>		2.62	3.38
<b>R<sup>2</sup></b>		0.99	0.98

\*\*\* : Différence significative au seuil de probabilité de 0.001

**Annexe 4.** Analyse de la variance du rendement en grains de 7 variétés de blé dur dans deux sites selon deux modes de culture et pendant l'année d'essai 2004.

		<b>Kef</b>	<b>Bousalem</b>
<b>Source de variation</b>	<b>ddl</b>	<b>Carré moyen</b>	<b>Carré moyen</b>
Répétition	3	0.18	1.22
Mode (M)	1	3624.59***	1607.14***
Erreur M	3	0.07	0.45
Variété (V)	6	47.79***	77.79***
M * V	6	59.79***	24.07***
Erreur V	36	0.25	0.55
<b>CV</b>		1.53	2.94
<b>R<sup>2</sup></b>		0.99	0.99

\*\*\* : Différence significative au seuil de probabilité de 0.001.

**Annexe 5.** Analyse combinée de la variance du rendement en grains de 7 variétés de blé dur dans deux sites selon deux modes de culture et pendant quatre années d'essai (2001-2004).

Source de variation	ddl	Carré moyen
Année (A)	3	15724.29 <sup>***</sup>
Site (S)	1	2731.08 <sup>***</sup>
Année * Site (A * S)	3	1358.67 <sup>***</sup>
r(Année * Site)	24	16.65
Mode (M)	1	5025.60 <sup>***</sup>
Site * Mode (S * M)	1	0.73
Année * Mode (A * M)	3	1639.26 <sup>***</sup>
Année * Site * Mode (A * S * M)	3	270.87 <sup>***</sup>
r(Site * Mode)	12	18.57
Variété (V)	6	68.49 <sup>***</sup>
Variété * Mode (V * M)	6	62.39 <sup>***</sup>
Site * Variété (S * V)	6	90.67 <sup>***</sup>
Site * Variété * Mode (S * V * M)	6	39.79 <sup>**</sup>
Année * Variété (A * V)	18	53.36 <sup>***</sup>
Année * Variété * Mode (A * V * M)	18	55.03 <sup>***</sup>
Année * Site * Variété (A * S * V)	18	42.15 <sup>***</sup>
Année * Site * Variété * Mode (A * S * V * M)	18	43.41 <sup>***</sup>
Erreur	300	13.82
CV = 14.02		
R <sup>2</sup> = 0.94		
*, ** : Différence significative au seuil de probabilité de 0.01 et 0.001 respectivement		

**Annexe 6.** Carrés moyens du poids spécifique, d'humidité, de teneur en protéines totales, d'activité amylasique et de teneur en cendres des semoules entières issues de 14 variétés de blé dur suivant deux modes de culture.

Source de variation	ddl	Poids spécifique	Humidité	Teneur en protéines totales	Activité amylasique	Teneur en cendres
Mode (M)	1	56.80 <sup>***</sup>	0.01 <sup>NS</sup>	2.22 <sup>***</sup>	18145.8 <sup>***</sup>	0.41 <sup>***</sup>
Variété (V)	13	13.16 <sup>***</sup>	0.56 <sup>***</sup>	13.17 <sup>***</sup>	3043.62 <sup>***</sup>	0.03 <sup>***</sup>
M * V	13	2.29 <sup>***</sup>	0.34 <sup>***</sup>	2.47 <sup>***</sup>	1503.05 <sup>***</sup>	0.02 <sup>***</sup>
Erreur	28	0.05	0.004	0.004	175.34	0.0001
<b>CV</b>		0.28	0.62	0.47	3.12	0.7
<b>R<sup>2</sup></b>		0.99	0.99	0.99	0.94	0.99

<sup>\*\*\*</sup> : Différence significative au seuil de probabilité de 1%.  
<sup>NS</sup> : Différence non significative au seuil de probabilité de 5%.

**Annexe 7.** Carrés moyens de la teneur en macroéléments des farines entières issues de 14 variétés de blé dur conduites en modes conventionnel et biologique.

<b>Eléments minéraux</b>	<b>Source de variation</b>	<b>ddl</b>	<b>Carré moyen</b>
<b>Phosphore</b>	Mode (M)	1	0.45 <sup>***</sup>
	Variété (V)	13	0.08 <sup>***</sup>
	M*V	13	0.015 <sup>**</sup>
	Erreur	56	0.005
	CV		21.36
	R <sup>2</sup>		0.85
<b>Potassium</b>	Mode (M)	1	0.20 <sup>***</sup>
	Variété (V)	13	0.03 <sup>***</sup>
	M*V	13	0.05 <sup>***</sup>
	Erreur	28	0.0003
	CV		3.03
	R <sup>2</sup>		0.99
<b>Calcium</b>	Mode (M)	1	0.000005
	Variété (V)	13	0.0005 <sup>***</sup>
	M*V	13	0.001 <sup>***</sup>
	Erreur	28	0.000003
	CV		3.41
	R <sup>2</sup>		0.99

\*\*\* : Différence significative au seuil de probabilité de 1‰  
\*\* : Différence significative au seuil de probabilité de 1%

# TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Table des matières	
Résumé - Abstract - خلاصة	
Liste des abréviations et des symboles	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>18</b>
<b>PROBLEMATIQUE GENERALE</b> .....	<b>22</b>
<b>CHAPITRE 1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>26</b>
1- Agriculture biologique : Définition, principe et intérêts.....	26
2- Agriculture biologique dans le monde.....	28
3- Agriculture biologique en Tunisie.....	30
4- Les céréales biologiques .....	32
5- Le blé biologique.....	34
<b>6- La stabilité</b> .....	<b>36</b>
6-1- Introduction .....	36
6-2- Les concepts de la stabilité.....	37
6-3- Les méthodes statistiques de mesure de l'interaction génotype * environnement.....	38
6-3-1- Analyse de la variance .....	38
6-3-2- Analyse de la stabilité ou approche paramétrique .....	40
6-3-2-1- Coefficient de régression ( $b_i$ ) et déviation de régression ( $S^2d_i$ ).....	40
6-3-2-2- Ecovalence de Wricke ( $W_1$ ).....	41
6-3-2-3- La méthode de Shukla de stabilité de la variance ( $W_2$ ) .....	41
6-3-2-4- La supériorité variétale de Lin & Binns .....	42
6-3-3- Interactions croisées et analyse non paramétrique.....	42
<b>7- La qualité</b> .....	<b>43</b>
7-1- Définition .....	44
7-2- La qualité nutritionnelle .....	44
7-2-1- La teneur en eau.....	45
7-2-2- Les macro nutriments.....	46
7-2-2-1- La teneur en protéines.....	46
7-2-2-2- La teneur en amidon .....	51

7-2-2-3- La teneur en lipides.....	53
7-2-3- Teneur en micro nutriments.....	55
7-2-3-1- Teneur en minéraux et oligo-éléments .....	55
7-2-3-2- Teneur en vitamines.....	56
7-3- La qualité culinaire.....	57
7-4- La qualité hygiénique.....	58
7-4-1- Résidus de pesticides.....	58
7-4-2- Résidus en métaux lourds.....	59
7-4-3- La teneur en nitrates .....	60
7-4-4- La teneur en mycotoxines.....	62
7-5- La qualité écologique .....	64
7-6- La qualité organoleptique.....	66
7-6-1- Le goût .....	66
7-6-2- La couleur .....	67
7-6-3- L'aspect du grain .....	67
7-7- Qualité semoulière.....	68

## **CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODES..... 71**

### **1- Site expérimental..... 71**

### **2- Matériel végétal..... 71**

### **3- Dispositif expérimental..... 72**

### **4- Conduite de la culture..... 73**

4-1- Précédent cultural.....	73
4-2- Préparation du sol.....	73
4-3- Semis de la culture .....	73
4-4- Désherbage.....	73
4-5- Fertilisation.....	73
4-6- Protection phytosanitaire.....	74

### **5- Paramètres étudiés et méthodes d'analyses..... 74**

5-1- Etude de la culture.....	74
5-2- Etude de la qualité des produits.....	74
5-2-1- Matériel végétal .....	74
5-2-2- Méthodes d'analyses .....	75
5-2-2-1- Mesure de la masse volumique.....	75
5-2-2-2- Dosage de l'humidité.....	75
5-2-2-3- Dosage des protéines .....	75
5-2-2-4- Dosage des acides aminés (AA) par chromatographie échangeuse d'ions .....	77
5-2-2-5- Extraction du gluten.....	77
5-2-2-6- Indice de chute de Hagberg .....	79
5-2-2-7- Dosage des cendres.....	81
5-2-2-8- Dosage des macroéléments.....	82
5-2-2-9- Essai à l'alvéographe Chopin .....	83

<b>6- Analyse statistique .....</b>	<b>86</b>
<b>CHAPITRE 3. RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>88</b>
<b>1- Performances des variétés de blé dur en agriculture biologique .....</b>	<b>88</b>
1-1- Evaluation du comportement variétal au cours des deux premières années d'essai .....	88
1-2- Evaluation du comportement variétal au cours de la première année d'essai.....	91
1-3- Evaluation du comportement variétal au cours de la deuxième année d'essai .....	94
1-4- Evaluation du comportement variétal au cours de la troisième année d'essai .....	95
1-5- Evaluation du comportement variétal au cours de la quatrième année d'essai.....	97
<b>2. Synthèse sur le rendement en grains des variétés de blé en mode biologique et en mode conventionnel.....</b>	<b>99</b>
<b>3- Analyse de la stabilité.....</b>	<b>101</b>
<b>4- Qualité technologique et nutritionnelle des grains .....</b>	<b>109</b>
4-1- Analyses physico-chimiques .....	109
4-1-1- Poids spécifique (PS) .....	109
4-1-2- Humidité.....	111
4-1-3- Teneur en protéines.....	111
4-1-3- Teneur en acides aminés totaux.....	119
4-1-4- Extraction et caractérisation du gluten .....	123
4-1-5- Activité amylasique .....	127
4-1-6- Teneur en cendres .....	129
4-1-7- Teneur en macroéléments .....	131
4-2- Analyse rhéologique.....	133
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>139</b>

## Références bibliographiques

## Annexes