



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABBES LAGHROUR –KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT : DE BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLECULAIRE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

FILIERE : Sciences Biologiques

OPTION : GENETIQUE

Thème

**Caractérisation morpho-physiologique, biochimique,
cytogénétique et moléculaire de quelques variétés de blé
dur (*Triticum durum Desf.*)**

(Etude bibliographique)

- **Présenté par :**
BOUZIDI Razika

DEKHIL Karawan

Soutenu le : 15/09/2020

Devant le jury composé de :

Président :	Dr. HABIBATNI S. (M.C.B)	Université Abbes Laghrou -Khenchela
Promoteur :	Mr. HAMADA Y. (M.A.A)	Université Abbes Laghrou - Khenchela
Examineur:	Dr. BENZAADA.M. (M.C.B)	Université Abbes Laghrou - Khenchela

Promotion 2019/2020

Remerciements:

Le prophète, que la paix soit sur lui a dit: "Celui qui n'a pas remercié les gens n'a pas remercié Dieu, et celui qui te donne une faveur, récompensez-le, si vous ne pouvez pas l'appeler.

Conformément à ce hadith et en reconnaissance de la grâce, nous remercions dieu et le remercions de nous aider à mener à bien ce travail.

Nous remercions sincèrement le Professeur "HAMADA Youcef", que Dieu le protège.

Pour son encadrement de notre mémoire et sa direction et ses conseils pour compléter, ce qui a eu un impact sur cela.

Nous remercions également les professeurs, membres du jury le Professeur "HABIBATNI" et le Professeur "BENSAADA" pour avoir accepté d'expertiser et de juger le travail.

Nous remercions également ceux qui ont été des messagers de la science et de l'éthique,

Tous les professeurs de la Faculté des sciences de la nature et de la vie.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes parents,

A Mon cher papa Abdel Hamid

Permettez-moi de vous exprimer mon grand amour, mon attachement et ma plus haute considération pour votre personne. Je suis très fière d'être votre fille et de pouvoir enfin réaliser, ce que vous avez tant espéré et attendu de moi. tfous n'avez jamais cessé de déployer tous vos efforts afin de subvenir à nos besoins, nous encourager et nous aider à choisir le chemin de la Réussite tfotre patience, votre bonne volonté, vos conseils précieux ainsi Que votre confiance en moi ont été pour beaucoup dans ma réussite Cher père, veuillez trouver, dans ce modeste travail, le fruit de vos sacrifices ainsi que l'expression de ma profonde affection et ma vive reconnaissance Que Dieu vous protège et vous garde

Ma Chère Maman Hizia

Si Dieu a mis le paradis sous les pieds des mères, ce n'est pas pour rien. Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur

Je t'aime.... tu sais.

A mes chères sœurs Souaad, Wissal, Zamen, Khadija pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral. A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Mon cher mari Fares

Pour tout l'encouragement, le respect et l'amour que tu m'as offert, Je te dédis ce travail, qui n'aurait pas pu être achevé sans ton éternel soutien et ton optimisme.

*Aucun mot ne saurait t'exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour, la tendresse et la gentillesse que j'ai vécu avec toi
J'espère te combler et te rendre toujours heureux,*

A mon cher neveu, mon adorable ange Abdel Moéez

A qui a longtemps été mon soutien ma chère tante Ibtissem et sa fille Rinad.

A celle qui a partagé avec moi mes joies et mes peines ma cousine Besma, et sa soeur Soundous

Sans oublier mon binôme Razika pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet, et mes amies (Wahiba, Linda, Nor Elhouda)

Merci d'être toujours là pour moi.

Karawan

Dédicaces

.Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité de lire et de réfléchir ,le pouvoir de croire pour apprendre de votre lumière ,la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever de dire (Ya Kayoum) je dédie ce mémoire :

***A Mon Cher père et ma chère mère** qui ont comblé ma vie de tendresse d'affection et de compréhension .Rien au monde ne pourrait compenser leurs efforts et leurs Sacrifices qu'il ont consentis pour mon bien être , et la poursuite de mes études dans des bonnes conditions .Aucune dédicace ,ne saurait exprimer a sa juste valeur profond amour que je vous porte, puisse dieu que vous procure santé ,bonheur et longue vie . et la merveilleuse petite -fille Norsin et ma petite sœur heba Al-rahman A mes chers frères Ma force et mon soutien dans la vie Hakime et abd allatif et leurs femme Abir ,Kaneza je prie dieu de mener une confortable a Tous pour on aidef ,spm'appui et surtout pour ses encouragements .A mes chères amies :Halima ,Afafe ,Linda , Foufa ,Nouna, Ikrame ect...cousins et cousines ,oncles et tantes ,à toute famille bouzidi ,mes collègues de la promotion et toutes mes amies des sciences de la vie .et mon associé Karawan dans l'entreprise, qui a été patient l'un envers L'autre malgré tous les obstacles et problèmes je lui souhaite du bonheur dans sa vie professionnel .*

Razika

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction	01

CHAPITRE I : CARACTÉRISTIQUE ET PROPRIÉTIES DU BLÉ DUR

1. importance du blé dans le monde et en Algérie	5
1.1. Dans le monde	5
1.2. En Algérie	6
2. Les zones de production de blé dur en Algérie	7
2. Catégories et variétés de blé	9
3.1. Catégories de blé	9
3.1.1. Les blés tendres	9
3.1.2. Les blés durs	10
3.1.3. Les blés mitadins	10
3. Origine et classification	10
4.1. Origine géographique du blé	10
4.2. Origine génétique du blé	12
4.2. origine génome A	13
4.2.2. origine génome B	13
4.2.3. origine génome D	14
4.3. classification botanique	14
5. la composition biochimique du grain de blé	15
5.1. l'amidon	16
5.2. Les Protéines	16
5.3. les lipides	16
5.4. Les Vitamines	16
5.5. Matières minérales	17
5.6. Les enzymes	17
6. Les protéines du grain de blé	18
6.1. Les protéines métaboliques	18
6.1.1. Les albumines et globulines	18
6.1.2. Les protéines amphiphiles	18
6.2. Les protéines de réserves	18

7. Analyse de la diversité	20
7.1. Les paramètres phénologiques de la plante	21
7.2. Morphologie de la plante et adaptation au milieu	21
7.2.1. Hauteur de la plante	22
7.2.2. Les barbes	22
7.2.3. Col de l'épi	22
7.2.4. La dernière feuille (la feuille étendard)	22
7.2.5. L'épi	23
7.3. Le rendement et ses composants	23
7.3.1. Le tallage	23
7.3.2. Le nombre de grains par épi	23
7.3.3. Le poids de 1000 grains	24
7.4. Paramètres physiologiques	24
7.4.1. Teneur relative en eau	24
7.4.2. Pilosité, la glaucescence et les cires	25
7.4.3. Teneur en chlorophylle	25
7.4.4. Accumulation de la proline	25
7.4.5. Rôles des sucres solubles	26
8. Les critères d'appréciation de la qualité du grain du blé dur	27
8.1. Le taux de moucheture	27
8.2. Le taux de mitadinage	27
8.3. Le calibrage	27
9. Le cycle biologique du blé	28
9.1. Période végétative	28
9.1.1. Phase germination-levée	28
9.1.2. Le tallage	28
9.2. Période reproductrice	29
9.2.1. Montaison-floraison	29

9.3. Période remplissage et maturité du grain	29
9.3.1. Floraison-maturité	29
10. Génomique du blé	29
10.1. Le génome du blé	30
10.1.1. Evolution de génome polyploïde du <i>Triticum</i>	31
10.1.2. Cytogénétique du blé	32

CHAPITRE II: CONTRAINTES ABIOTIQUES ET BIOTIQUES ET LEURS EFFETS SUR LE BLE

1. Notion du stress	36
2. Différents types de stress	36
3. Les principales contraintes liée à la production du blé en Algérie	36
3.1. Contrainte abiotique	37
3.1.1. Notion du stress thermique	37
3.1.2. Stress Salin	39
3.1.3. Le stress hydrique	40
4. La résistance et la tolérance aux stress biotique et abiotique	41
5. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique	41
5.1. Adaptation phénologique	42
5.2. Adaptation morphologique	42
5.3. Au niveau de la plante	42
5.4. Au niveau structure	43
5.5 Adaptation physiologique	43
5.5.1. La capacité photosynthétique	44
5.5.2. La teneur en chlorophylle	44
5.5.3. La régulation stomatique	44
6. Contrainte biotique	45
6.1 Maladies sur feuillage	47
6.1.1. Les rouilles	47
6.1.2 Les septorioses	48
6.1.3 Oïdium	50

CHAPITRE III: UTILISATION DE MARQUEURS MOLECULAIRES EN AMELIORATION DE BLE DUR

1. Qu'est- ce que la génomique ?	53
2. La génomique et l'amélioration du blé	54
2. 1. Génome du blé	54
2.2. L'amélioration du blé dur	54
2.3. Apport des marqueurs moléculaires à l'amélioration du blé	54
3. Utilisation des marqueurs pour l'amélioration de blé dur	56
3.1. Définition de marqueur moléculaire	56
3.2. Présentation d'un bon marqueur	56
3.3. Les principaux types de marqueurs génétiques utilisés	56
3.3.1. Marqueurs morphologiques	57
3.3.2. Marqueurs biochimiques	57
3.4. Les différents types de marqueurs moléculaires	57
3.4.1. Marqueur RFLP	58
3.4.2. Marqueur de type PCR	59
4. La sélection assistée par marqueur moléculaire (SAM)	66
4.1. Utilisation de marqueur moléculaire à l'amélioration de blé dur	67
4.1.1. Phylogénie	67
4.1.2. Analyse de la diversité génétique	68
4.1.3. Identification	68
4.1.4 .Notion de QTL	69
4.1.5. Cartographie génétique et applications	69
4.2. Utilité des marqueurs moléculaires dans la sélection de blé	70
5. Application de SAM dans l'amélioration du blé au stress abiotique	71
5.1. Marqueurs types microsatellites (SSR)	71
5.2. Marqueurs types RAPD	74
Conclusion	76
Références bibliographiques	

Liste des tableaux

Tableau	Le titre de tableau	La page
Tableau 1	Evolution de la production du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) dans le monde (en millions de tonnes) entre 2000 et 2011	6
Tableau 2	Caractéristiques des grandes zones de production des céréales algériennes	8
Tableau 3	Ecarts entre les besoins en eau et la pluviométrie du cycle de la culture de blé dur de la région de sétif	8
Tableau 4	origines possibles du génome B	13
Tableau 5	Composition chimique des différentes parties du grain de blé	17
Tableau 6	Les principales maladies fongiques du blé	46
Tableau 7	comparaison entre différents types des marqueurs RFLP, AFLP et SSR	65
Tableau 8	Les amorces utilisées pour analyse SSR dans l'analyse de la tolérance du blé dur à la sécheresse	72
Tableau 9	Les marqueurs microsatellites et les amorces utilisées correspondantes dans cette étude	73
Tableau 10	Description des marqueurs SSR utilisés dans l'étude de la tolérance au stress hydrique chez le blé dur	73

Liste des figures

Figure	Le titre de figure	La page
Figure1	Morphologie des graminées	5
Figure2	Rendement en grains de blé dur en Algérie depuis l'indépendance jusqu'à 2012	7
Figure3	Centre d'origine de blé dur	11
Figure4	Origine et diffusion de <i>Triticum turgidum</i>	12
Figure5	Origines génétiques des différentes espèces de blés	14
Figure6	Localisation chromosomale des différents gènes codant pour les gluténines	19
Figure7	composition protéique de la farine du blé	20
Figure8	Différents stades de développement du blé dur	30
Figure9	Diagramme schématique des relations entre les génomes du blé avec l'histoire et la généalogie de la polyploïdisation	31
Figure10	Organisation du génome du blé hexaploïde	31
Figure11	Les trois génomes de blé (génome polyploïde)	33
Figure12	caryotypes des trois espèces de blé	34
Figure13	polymorphisme de longueur des fragments d'amplification (RFLP)	59
Figure14	Polymorphisme de nombre d'unités de répétition (SSR)	60
Figure15	Polymorphisme de longueur des fragments d'amplification (AFLP)	61
Figure16	ADN Polymorphe au hasard (RAPD)	62

Liste des abréviation

<i>Abréviation</i>	<i>Désignation</i>
ADN	Acide Désoxyribonucléique complémentaire
AFLP	Amplified Fragment Length Polymorphisme
FAO	Food and Agricultural organization
PCR	Polymerase Chain Reaction
QTL	Quantitative trait locus
RAPD	Random Amplified Polymorphic DNA
RFLP	Restriction Fragment Length Polymorphism
SNP	Single Nucleotide Polymorphism
SSR	Simple Sequence Repeat
SAM	Sélection Assistée par Marqueur moléculaire

Introduction

Introduction générale:

La céréaliculture est considérée comme l'une des premières grandes découvertes ayant exercé une influence majeure sur l'avenir des sociétés humaines. Encore aujourd'hui, les céréales constituent la base de notre alimentation. Elle assurent la majeure partie des ressources nutritive humaine et animale de la planète (Jacus Guéguen et *al.*, 2009). Selon la FAO, (2014) la production des céréales dans le marché mondiale proche à 2518,8 Mt.

Le blé est une céréale importante en terme de consommation intérieure dans de nombreux pays du monde. Il sert principalement à la fabrication de semoule, matière première des pâtes alimentaires (Feillet, 2000). Sur la scène mondiale, la superficie moyenne consacrée annuellement à la culture du blé dur s'étend sur environ 18 millions d'hectares, ce qui donne une production annuelle moyenne approximative de 30 millions de tonnes métriques (Anonyme, 2002).

Les principales variétés de blé sont le blé tendre et le blé dur, le blé dur constitue un élément essentiel dans la structure de la consommation des céréales il occupe 8 à 10% du total des terres réservées aux blés dans le monde. Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une importante place parmi les céréales dans le monde (Sahraoui 2011).

Les habitudes alimentaires de l'Algérien (couscous, pâtes, pain et fric) font de lui un grand consommateur de cette denrée.

L'Algérie avant les années 1830, exporte son blé au Monde entier. Actuellement l'Algérie importe son blé et se trouve dépendante du marché international (ANONYME, 2006). Par sa position de grand importateur de blé, l'Algérie achète annuellement plus de 5% de la production céréalière mondiale, cette situation risque de se prolonger à plusieurs années, faute de rendements insuffisants et des besoins de consommation sans cesse croissants devant une forte évolution démographique (CHELLALI, 2007). En effet une production très insuffisante de 2.7 Mt pour couvrir les besoins du marché national et alimenter les stocks pousse à faire un recours systématique aux importations (FAO, 2007).

Notre pays est un grand importateur de blé selon le classement de la FAO. Cette situation risque de se prolonger durant plusieurs années, faute de rendements insuffisants et de la baisse de consommation (Chellali., 2007).

Cette faiblesse de la production de blé en Algérie était souvent liée à des conditions environnementales défavorables qu'on peut dénommer « stress ». (CHAISE et *al.* 2005).

L'amélioration du rendement et de la qualité du blé dur passe donc par la création variétale et le choix de critères fiables pour l'identification de mécanismes d'adaptations aux contraintes environnementales. Parmi ces critères, la stabilité du rendement, la tolérance aux

stress abiotiques, la résistance aux maladies en plus d'une bonne qualité technologique. Cependant les exigences en termes de qualité technologique du grain de blé sont parfois difficiles à concilier avec les contraintes des producteurs.

L'amélioration génétique du blé dur reste basée sur la recherche d'une meilleure variété tolérante et résistante aux contraintes abiotiques et biotiques (Fallah *et al.*, 2002). Le sélectionneur doit choisir une stratégie d'action qui peut maximiser ses chances de création d'une bonne variété en utilisant, les ressources génétiques, les méthodes de sélection classique, les nouvelles techniques de biologie moléculaire en intégrant au mieux les outils de la biotechnologie tels les marqueurs moléculaire en sélection assistée par marqueurs.

Pour répondre à cette préoccupation, Ce travail a pour objectif de comparer le comportement des variétés de blé dur sous stress hydrique, ceci par l'étude de quelques paramètres morphologiques, cytogénétique, physiologiques, biochimiques et moléculaire.

Notre mémoire est présenté en trois chapitres :

- **Le chapitre I** : est une synthèse bibliographique sur le blé dur, les mécanismes morpho physiologiques, biochimiques et cytogénétique ;
- **Le Chapitre II** : Met l'accent sur les contraintes abiotiques et biotiques et les mécanismes physiologiques et biochimiques de la tolérance des plantes au stress hydrique ;
- **Le Chapitre III** : s'intéresse à l'utilisation des marqueurs dans la sélection de blé en identifiant les différents marqueurs moléculaires utilisés dans la sélection assisté par marqueur.

En raison des conditions imposées par la pandémie du Covid-19, ayant abouti à l'empêchement de l'installation et le suivi des essais expérimentaux dans les délais ; nous avons été contraints à limiter le travail à une synthèse bibliographique.

Le manuscrit est finalisé, par une conclusion et des perspectives, suivies de la liste de références bibliographiques.

CHAPITRE:01

Caractéristique et propriétés du blé dur

Introduction:

Le blé dur (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) est une plante annuelle de la classe de Monocotylédones de la famille des Graminées, de la tribu des Triticées et du genre *Triticum* (Annexe. 01) (**Feillet, 2000**). En termes de production commerciale et d'alimentation humaine, cette espèce est la deuxième plus importante du genre *Triticum* après le blé tendre. Leur famille comprend 600 genres et plus de 5000 espèces (**Feillet, 2000**).

Il s'agit d'une graminée annuelle de hauteur moyenne et dont le limbe des feuilles est aplati. L'inflorescence en épi terminal se compose de fleurs parfaites (**Soltner, 1998**). Le système racinaire comprend des racines séminales produites par la plantule durant la levée, ainsi que des racines adventives qui se forment plus tard à partir des noeuds à la base de la plante et constituent le système racinaire permanent (**Bozzini, 1988**). Le blé dur possède une tige cylindrique, dressée, habituellement creuse et subdivisée en entrenoeuds. Certaines variétés possèdent toutefois des tiges pleines. Le chaume (talles) se forme à partir de bourgeons axillaires aux noeuds à la base de la tige principale (**Bozzini, 1988**).

Le nombre de brins dépend de la variété, des conditions de croissance et de la densité de plantation (**Clark et al., 2002**).

Comme pour d'autres graminées, les feuilles de blé dur se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux (**oreillettes**) (**Bozzini, 1988**).

La tige principale et chaque brin portent une inflorescence en épi terminal.

L'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entrenoeuds (**Soltner, 1998**). Chaque épillet compte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole. Chaque fleur parfaite est renfermée dans des structures semblables à des bractées, soit la glumelle inférieure (lemma ou lemme) et la glumelle supérieure (paléa). Chacune compte trois étamines à anthères biloculaires, ainsi qu'un pistil à deux styles à stigmates plumeux. À maturité, le grain de pollen fusiforme contient habituellement trois noyaux. Chaque fleur peut produire un fruit à une seule graine, soit le caryopse (**Bozzini, 1988**). Chaque graine contient un large endosperme et un embryon aplati situé à l'apex de la graine et à proximité de la base de la fleur (Fig. 01) (**Soltner, 1998**).

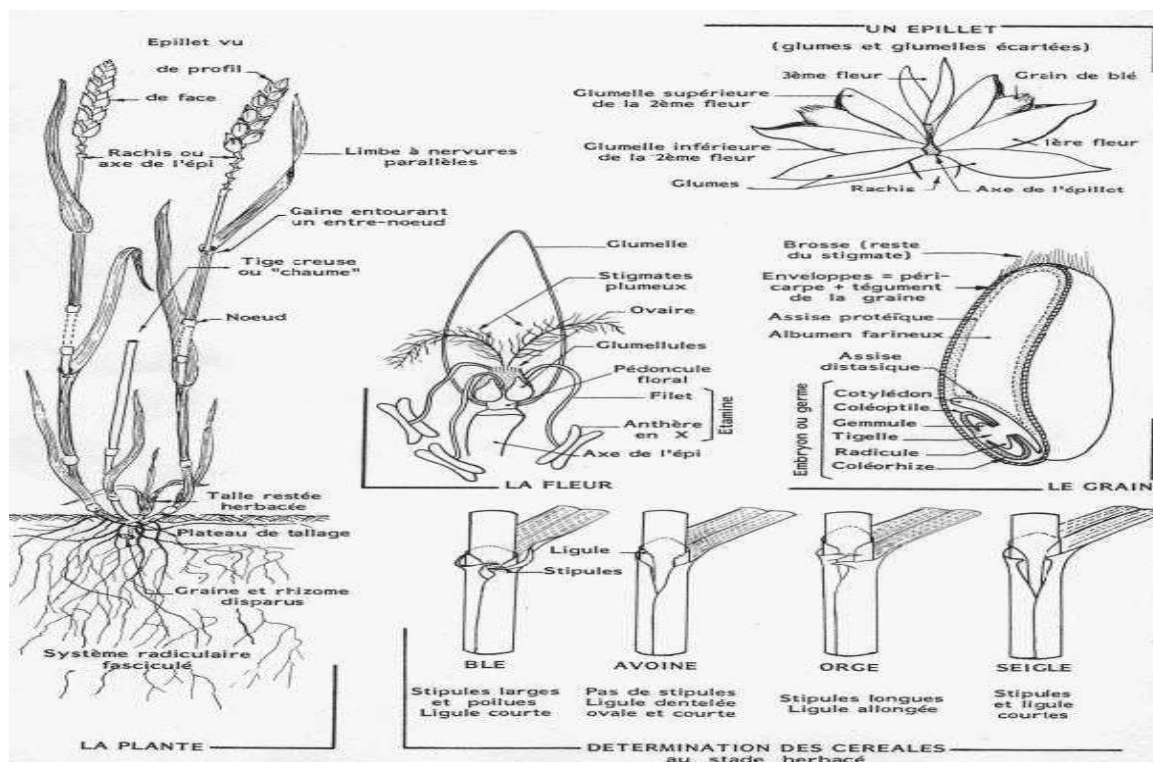


Figure N° 01 : Morphologie des graminées (exemple du blé) (Soltner, 1998).

1. Importance du blé dans le monde et en algérie

Dans le monde :

La production du blé dur (*Triticum durum* Desf) des différents pays n'est pas stable, ceci relève du fait que cette céréale est produite dans des zones et climats très variables comme le bassin méditerranéen (la sécheresse en Andalousie et l'Afrique du nord). Le blé dur est aussi produit dans les plaines du nord des Etats-Unis, dans le désert d'Arizona, en Californie et au Canada, (France Agrimer, 2013). En plus, il existe une production de blé dur au Mexique, au Kazakhstan et en Australie (Tableau 1).

En terme de production mondiale, la moyenne annuelle durant la période allant de 2001 à 2011 est de l'ordre de 36.33 Mt avec des pics qui atteignent les 40 Mt en 2005, 2009 et en 2010. Les pays de la méditerranée produisent près de 50 % de la production mondiale, l'Italie et la France viennent en premier rang. Le Canada est le premier pays américain producteur du blé dur. Une partie non négligeable de la production mondiale est concentrée dans les pays du Maghreb, la Turquie et la Syrie (Tableau 1).

- Le blé dur représente environ 8% des superficies cultivées en blés dans le monde dont 70 % sont localisées en condition méditerranéennes (Monneveux, 2002).

Tableau 1 : Evolution de la production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans le monde (en millions de tonnes) entre 2000 et 2011 ; / : absence de données.

Années pays	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
U. européenne	9,1	6,9	8,9	8,2	11,4	8,4	9,1	8,2	10,1	8,7	9,1
France	1,3	1,6	1,7	2	2,04	2,1	1,9	2,1	2,09	2,4	2,07
Italie	3,6	4,2	3,7	5	4,4	3,7	3,9	5,01	3,6	4	3,9
Espagne	1,8	2,1	2	2,7	0,9	1,6	1,2	1,1	1,3	0,9	0,9
Grèce	1,42	1,4	1,2	0,9	0,9	0,89	0,92	1,4	1,3	1,2	0,9
Canada	5,6	3	3,9	4,3	5	5,9	3,3	3,7	5,5	5,4	3
Mexique	/	/	/	0,9	1,1	1,3	1,9	1,8	2	2,2	2,2
Etats-Unis	3	2,3	2,2	2,6	2,5	2,8	1,5	2	2,3	3	2,9
Turquie	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3	2,7	3	3,1	2,9
Algérie	0,5	1,2	1	1,8	2	1,8	1,5	0,8	2	2	2,2
Maroc	0,4	1	1	1,8	2	0,9	2,1	0,5	1	1,9	1,6
Tunisie	0,7	0,9	0,4	1,6	1,4	1,3	1,1	1,4	1,4	1,4	0,6
Syrie	2,1	3,1	2,8	3	2,5	2,5	2	1,8	1,2	1,8	1,6
Kazakhstan	2,2	2,5	2,6	2,6	2,2	2,4	2,6	3	2,5	2,6	1,7
Australie	/	/	/	0,6	0,5	0,6	0,2	0,3	0,5	0,5	0,5
Autres pays	6,9	7,9	8,8	6,2	6,8	6,7	7,2	7,7	8,5	7,5	6,7
Total	33,5	31,8	34,6	36,8	40,6	37,8	35,5	33,9	40	40,1	35

En algérie

La céréaliculture constitue en Algérie la principale activité, et le blé dur occupe une place centrale dans l'économie algérienne. Elle couvre la moitié de la surface consacrée à cette activité (**Mazouz. L, 2006**). La production algérienne de blé dur est très instable d'une année à l'autre à cause des conditions climatiques très variables (irrégularités des pluies, sécheresse...etc.).

Les céréales et leurs dérivées constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, et elles fournissent plus de 60% de l'apport calorifique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire. (**FAO. B, 2015**).

Si la production nationale de blé a dépassé la barre d'un million de tonnes plusieurs fois depuis l'indépendance, elle demeure tout de même loin du niveau réel de la consommation qui a augmentée progressivement avec la croissance démographique. En effet, la production n'a guère évolué en fonction des besoins (**FAO. A, 2015**). La production

céréalière, en Algérie, est fortement dépendante des conditions climatiques. Cela se traduit d'une année à l'autre par des variations importantes de la surface agricole utile, de la production et du rendement. Ainsi, le manque de précipitations, mais aussi la mauvaise répartition des pluies pendant l'année expliquent en grande partie la forte variation de la production céréalière. (Mazouz. L , 2006)

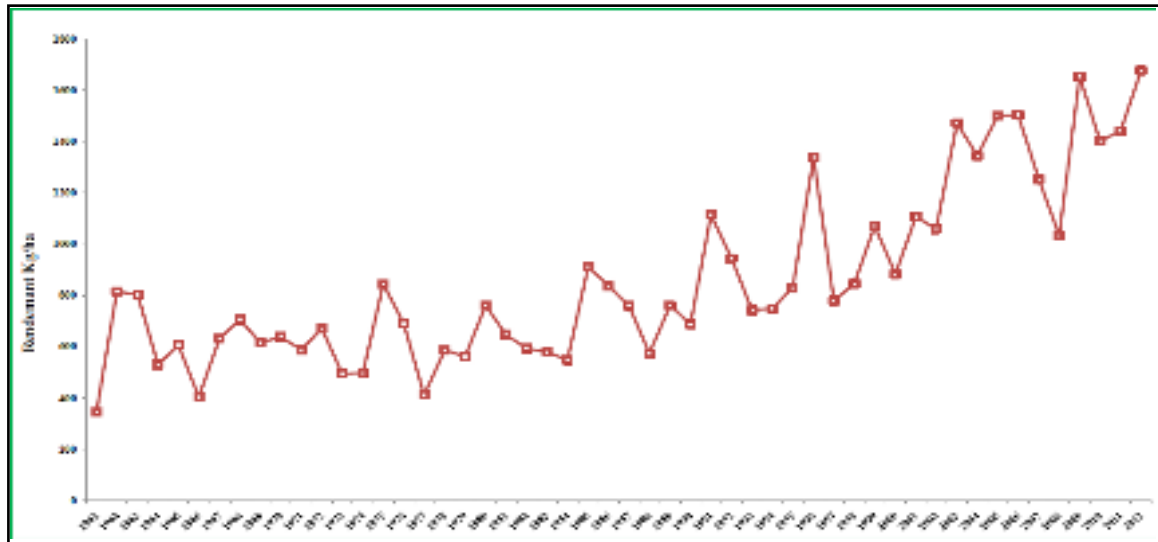


Figure 02 : Rendement en grains de blé dur en Algérie depuis l'indépendance jusqu'à 2012 (selon la banque mondiale).

2. Les zones de production du blé dur en Algérie :

La culture des crailles est pratiquée sur une aire géographique très variable du point de vue climat, allant du subhumide à l'aride, avec une forte concentration de près de 50% dans la franche 300-400mm, qui marque d'une profonde empreinte la production qualitativement et quantitativement (Mekhlouf ,1998).

Cette répartition est souvent faite au détriment d'autres cultures qui seraient mieux appropriées à certaines régions, c'est le cas des cultures pérennes et fourragères (MADR, 1992).

La majeure partie des emblavures céréalières se trouve donc concentrée sur les hautes plaines. Cette région se caractérise par de l'altitude (900 à 1200m), des hivers froids, un régime hydrique irrégulier et faible (Baldy ,1974). La superficie cultivable empiète sur cinq grands ensembles qui se différencient surtout par le cumul annuel des pluies qui déterminent dans une large mesure le potentiel de production. Les précipitations hivernales de l'atlas saharien qui est à l'origine de vents secs et desséchant intervenant dès le printemps, et de l'altitude qui entraîne des gelées tardives (Baldy, 1974). la superficie cultivable empiète sur

cinq grands ensembles qui se différencient surtout par le cumul annuel des pluies qui déterminent dans une large mesure le potentiel de production(tableau2)

Les hautes plaines sont soumises à la triple influence de l'Atlas tellien, qui limite les précipitations hivernales, de l'Atlas saharien, qui est à l'origine de vents secs et desséchants intervenants des le printemps, et de l'altitude qui entraine des gelées tardives(Baldy,1974).

Ces contraintes climatiques limitent du potentiel de production de ces zones accentué par le fait que la céréaliculture est conduite en pluviale. le déficit hydrique coïncide avec les stades végétatifs déterminants ou les besoins de la plante en eau deviennent intenses (tableau3,**Oudina et al,1988**).

Tableau 2 : Caractéristiques des grandes zones de production des céréales algériennes (MARA,1992).

Zones	Pluie (mm)	Céréales (10 ha)	Jachère (10 ³ ha)	stress
littoral	600	64	0	Néant
Plaines intérieures	450-600	850	400	Gel
Hauts plateaux	350-450	1500	900	Gel,sec
Steppe	200-350	400	0	sec
Mantagne	350-600	300	0	..

Tableau3:Ecarts entre les besoins en eau et la pluviométrie du cycle de la culture de blé dur de la région de sétif (**Oudina et al.1988**).

Mois	11	12	1	2	3	4	Total
Pluie moyenne(mm)	53	52	60	45	43	36	289
Besoins semis précoce	90	60	60	90	120	150	570
Ecarts	37	8	0	45	77	114	281
Semis tardif		60	60	90	120	150	480
Ecarts		8	0	45	77	114	191

3. Catégories et variétés de blé

Catégories de blé

Il existe un très grand nombre de variétés de blé. Ce sont les cultivateurs et les producteurs qui essaient d'adapter au mieux ces variétés en fonction de la nature du sol et du climat la région, afin d'obtenir le meilleur rendement possible. Toutes les différentes variétés de blé sont classées en trois grandes catégories.

les blés tendres :

➤ **Description botanique :** Céréale appartenant au genre *Triticum*, le blé a suivi le processus naturel de l'évolution. Cette plante annuelle de la famille des graminées existait à l'état sauvage il y a de cela des siècles. C'est une plante herbacée annuelle, monocotylédone, à feuilles alternes, formée d'un chaume portant un épi constitué de deux rangées d'épillets sessiles et aplatis. Les fleurs de cette plante sont nombreuses, petites et peu visibles. Elles sont groupées en épis situés à l'extrémité des chaumes. La fleur est cléistogame, c'est-à-dire qu'elle reste fermée, la pollinisation s'effectuant par autogamie qui est le mode de reproduction le plus fréquent chez les blés. C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscence (qui ne s'ouvre pas), appelé caryopse. Il est cultivé pour faire la farine panifiable utilisée pour le pain. Ses grains se séparent de leurs enveloppes au battage. Communément dénommée blé tendre ou tout simplement blé, cette espèce a connu une très grande dispersion géographique et est devenue la céréale la plus cultivée. La sélection moderne, initiée à la fin du XIXe siècle par Henry de Vilmorin, s'est concentrée sur trois axes : la résistance aux aléas climatiques, la richesse en protéines, notamment le gluten pour la panification, et bien entendu le rendement. (Armand et Germain, 1992)

➤ Classification botanique du blé tendre :

-Règne :	végétal <i>Plantae</i>
-Sous-règne :	<i>Tracheobionta</i>
-L'embranchement :	<i>Magnoliophyta</i>
-Sous-classe :	comelinidae
-Famille :	<i>Gramineae</i>
-Sous –famille :	Festucoideae
-Tribu :	Triticeae
-Sous – tribu :	Triticineae
-Genr :	<i>Triticum</i>
-Espèces :	<i>Triticumaestivum</i> (Blé Tendre)

(Bonneuil *et al*, 2009)**3.1. 2. Les blés durs:**

Cette catégorie de blé est cultivée dans les pays de climat chaud et sec. Les grains de blés durs sont allongés, souvent même pointus, les enveloppes sont assez minces et légèrement translucides. Ils donnent moins de son que les blés tendres et la farine obtenue, bien que contenant plus de gluten (12 à 14%), se prêtent moins bien à la panification.

Les blés mitadins :

Ces blés ont des caractéristiques et des qualités intermédiaires entre les blés tendres et les blés durs. Les grains sont plus plats que les grains de blé tendre et moins longs que ceux du blé dur. Les enveloppes assez résistantes sont d'une épaisseur comme des blés de force, mélange à des blés tendres, ce qui donne des très bonne qualité la panification (Abecassis, 1993).

4. Origine et classification**Origine géographique du blé**

Le blé est l'une des premières espèces cultivées par l'homme. Depuis plus de 7000 à 10000 ans le blé occupait le croissant fertile, zone couvrant la Palestine, la Syrie, l'Irak et une grande partie de l'Iran (Croston et Williams, 1982). Des vestiges de blés, diploïdes et tétraploïdes, remontant au VII^{ème} millénaire avant J.C ont été découverts sur des sites archéologiques au Proche Orient (Harlan, 1975).

Le foyer d'origine et le principal centre de diversification du genre *Triticum* est l'Asie du Sud-ouest, en particulier les zones de chénaies de la partie montagneuse du croissant fertile : de la côte méditerranéenne, à l'ouest, jusqu'à l'est, en passant par le désert de Syrie. Dans cette région sont concentrées de nombreuses espèces de *Triticum* diploïdes et polyploïdes qui présentent, chacune, une large gamme de variations morphologiques et écologiques (**Feldman et Sears, 1981**). Selon **Hamed (1979)**, le centre d'origine du blé est le Tigre et l'Euphrate, puis l'espèce s'est étendue en Egypte, en Chine, en Europe et en Amérique (Figure2). Le blé a été diffusé vers l'Afrique à travers l'Égypte vers – 6 000 avant aujourd'hui. D'autres voies d'introduction furent maritimes : à partir du Sud de la péninsule italienne et de la Sicile, parvinrent aux côtes de la Tunisie, du Maroc et de l'Algérie. Il semble que les courants initiaux concernaient principalement l'amidonnier et de petites quantités de blé nu tétraploïde de la ssp. *Parvicoccum* (**Bonjean, 2001**).

Par ailleurs, Orlov et Vavilov in **Gueorguiev et Arifi (1978)**, considèrent le Maghreb comme origine secondaire du blé. **Bonjean et Picard (1990)** affirment que le monde Romain a largement contribué à la diffusion des céréales du bassin méditerranéen vers l'Europe centrale et l'Europe de l'Ouest.

L'évolution du blé s'est donc produite dans de nombreux écosystèmes, de manière relativement indépendante jusqu'au XIXe siècle. À ce moment, l'amélioration génétique du blé par choix dans les populations cultivées et par hybridation s'est développée, aboutissant à un brassage important des différentes origines du blé (**Doussinault et al., 2001**) (figures 3 et4).

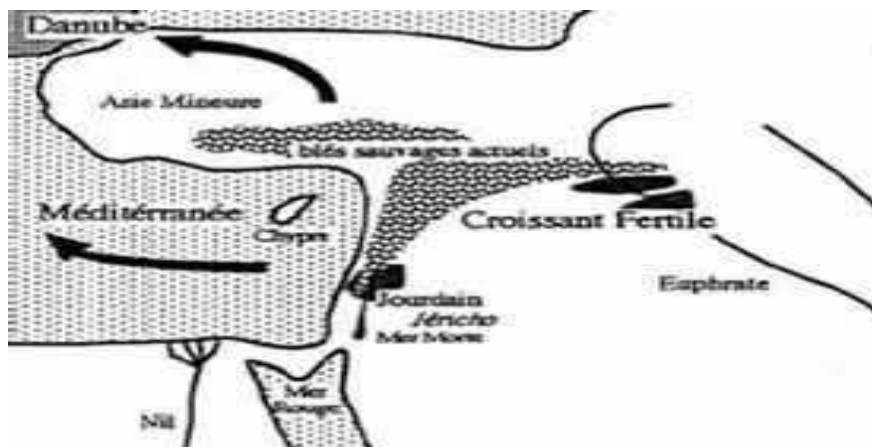


Figure 3 : Centre d'origine de blé dur : Université Pierre Marie Curie

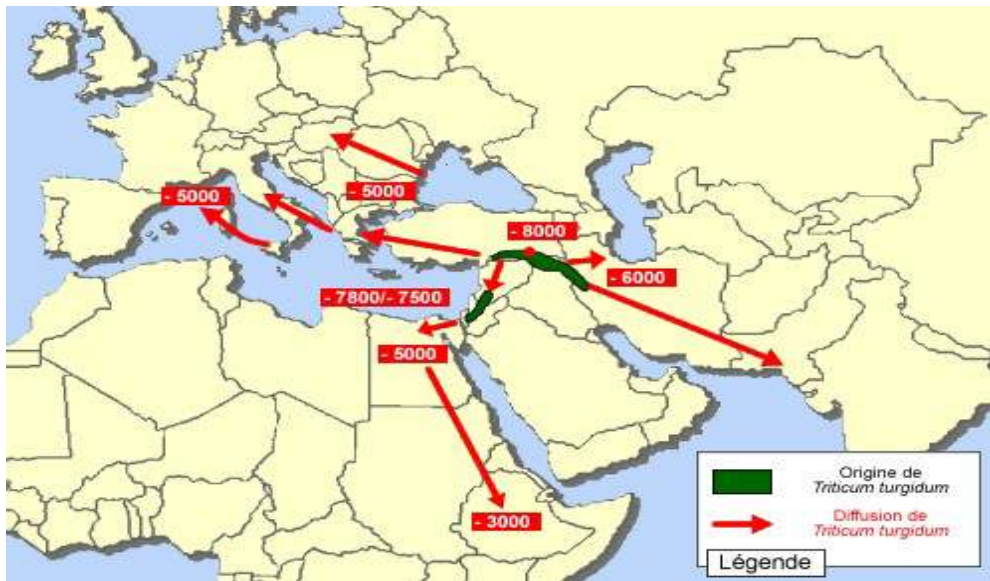


Figure 4 : Origine et diffusion de *Triticum turgidum* (Bonjean, 2001)

Origine génétique du blé

Génétiquement, le blé dur est allotétraploïde (deux génomes: AABB), comptant au total 28 chromosomes ($2n = 4x = 28$), contenant le complément diploïde complet des chromosomes de chacune des espèces souches. Comme telle, chaque paire de chromosomes du génome (A) a une paire de chromosomes homologues dans le génome (B), à laquelle elle est étroitement apparentée (Wall et al., 1971). Toutefois, durant la méiose, l'appariement des chromosomes est limité aux chromosomes homologues par l'activité génétique de gènes inhibiteurs (Wall et al., 1971).

L'allopoloïdie a joué un rôle fondamental dans l'évolution des plantes en permettant l'apparition de type nouveaux qui n'ont souvent que de lointains rapports avec les espèces qui leurs ont donné naissance (Prevost, 1976).

De part leur constitution chromosomique, Boyeldieu (1980) ; Simon et al. (1989) distinguent l'existence de trois sous groupes de céréales (Figure:01) :

- **Le groupe diploïde** ($2n = 14$ chromosomes) ou engrain.
 - *Triticum beoticum* ;
 - *Triticum monococcum*.
- **Le groupe tétraploïdes** ($2n = 28$ chromosomes) ou groupe de *Triticum dicoccum*

(Amidonier) ; on distingue :

- *Triticum diccocoïdes* ou amidonnier sauvage ;
- *Triticum turgidum* ou blé poulard ;
- *Triticum polonicum* ou blé de Pologne ;

- *Triticum durum* ou blé dur.
- **Le groupe hexapode** ($2n = 42$) ou groupe de *Triticum spelta* (épeautre) ; on distingue :
 - *Triticum vulgare* ou blé tendre ;
 - *Triticum compactum* ou blé hérisson.

Selon Prevost (1976), les blés à 28 chromosomes sont des allotétraploïdes possédant les génomes A et B.

4-2-1. Origine du génome A

Les travaux de Kihara (1924) cités par Felix (1966) ont permis d'attribuer l'origine du génome A à *triticum monococcum* var. *boeoticum* ou var. *urartu*.

Une autre étude basée sur le polymorphisme des séquences répétées a établi que *triticum urartu* qui est un proche parent de *triticum boeoticum* mais non inter-fertile est le donneur du génome A pour tous les blés polyploïdes (**dvorak, 1988**).

4-2-2. Origine du génome B

De nombreuses hypothèses sont émises quant à l'origine du génome B du blé: Le Tableau 4 synthétise ses explications plausibles.

Tableau 4 : origines possibles du génome B

Auteur	Année	Origine possible du génome B
Pathak	1940	<i>Aegilops speltoides</i>
Sarkar et Stebbins	1956	<i>Aegilops speltoides</i>
Johnson	1975	<i>Triticum urartu</i>
Konarerv et al	1976	<i>Aegilops longissima</i>
Feldman	1978	<i>Aegilops searsii</i>
Kushnir et Halloran	1981,1983	<i>Aegilops sharonensis</i>
Lange et Balkemaboomstra	1988	<i>Aegilops</i> , <i>Vizide la section Sitopsis</i>

(Kerby , 1987)

D'après ce tableau, l'origine du génome B demeure incertaine (source non identifiée) et controversée. Il est présent chez la plupart des blés tétraploïdes, il est similaire à *Aegilops speltoides*, Ainsi six espèces ont été données ou proposées en tant que donneuses potentielles et *Aegilops searsii* semble être le donneur le plus probable (**kerby et kupira,1987**)

4.2.3. Origine du génome D

Mc Fadden (1926) a montré que l'espèce *Aegilops tauschii* (*Aegilops squarrosa*) est l'origine du génome D chez les blés hexaploïdes, leur conférant une plus grande résistance au froid et certaines caractéristiques morphologique distinctes.

Cauderon (1979) signale qu'il a fallu près de 30 ans pour connaître l'origine du génome D. Il indique que l'analyse génomique par croisement de deux blés *T. aestivum* et *T. turgidum* avec trois espèces d'*Aegilops*; *Aegilops. Cylinrica*, *Aegilops. Caudata* et *Aegilops. Squarrosa* a conduit à la conclusion que l'espèce *Aegilops squarrosa* est à l'origine du génome.

Chaque génome A, B et D provient d'une espèce diploïde ancestrale différente .ces trois espèces seraient elles mêmes issues d'un ancêtre diploïde commun. (figure5)

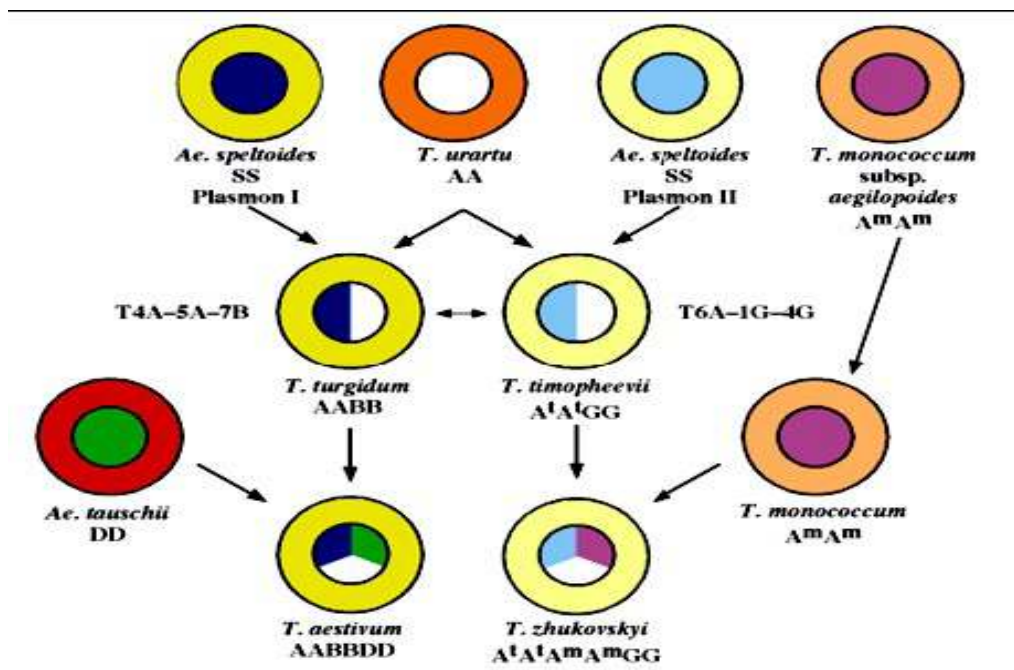


Figure 05 : Origines génétiques des différentes espèces de blés (Feldman et Sears, 1981)

Classification botanique

Le blé est le nom commun utilisé pour l'ensemble des espèces des deux genres *Triticum* L. et *Aegilops* L. Le premier comprenant des formes cultivées domestiquées et apparentées et le deuxième regroupe seulement des espèces sauvages (Couplan, 2002).

Blé du latin médiéval "blada" : récolte, dérivé du francique "blad" : produit de la terre.

En ancien français, le mot s'employait d'une façon générale à propos de diverses céréales dont le grain sert à l'alimentation. Selon Couplan (2002), Il est devenu en France et en Suisse synonyme de froment (blé tendre).

Le blé dur est une monocotylédone de la famille des graminées. La classification du genre *Triticum* a connu plusieurs controverses. Le nombre exact d'espèces du genre *Triticum*

n'est pas définitivement déterminé puisqu'il existe de nombreuses propositions de classification dont les unes considèrent certains taxons comme des espèces, alors que les autres les considèrent comme des sous-espèces (**Khalighi et al., 2008**).

Le blé dur est classé selon **Prats (1960)**, **Crête (1965)** et **Feillet (2000)** comme suit :

Embranchement	Angiospermes
Sous embranchement	Spermaphytes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Glumiflorales
Super ordre	Comméliniflorales
Famille	<i>Gramineae (Poaceae)</i>
Tribu	<i>Triticeae</i>
Sous tribu	<i>Triticinae</i>
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf

5. Composition biochimique du grain de blé

Les grains de céréales sont des organes végétaux particulièrement déshydratés, leur teneur en eau est environ de 14% . Le cotylédon du blé représente 82% à 85% du grain, il accumule toutes les substances nutritives nécessaires : glucides, protéines, lipides, substances minérales et vitamines (**Cretois et al., 1985**).

Pendant la maturité de la graine les substances de réserves sont accumulées soit dans le cotylédon, soit dans le péricarpe. Ces substances sont principalement des métabolites qui assurent la nutrition de la plantule lors de la germination (**Samson et Morel, 1995**).

Les réserves de la graine comprennent essentiellement :

- **70 à 80%** de glucides, essentiellement de l'amidon ; du gluten associé à l'amidon; des hémicelluloses (des parois cellulaires) ; des sucres solubles et des protides.
- **9 à 15%** de protéines : essentiellement des protéines de réserves.
- **1,5 à 2%** de lipides dont 60 sont des lipides libres apolaires et 40 sont des lipides polaires.
- **Enzymes** tels que : des α et β amylases, des protéases ainsi que des lipases et des lipoxygénases (**Campion, 1995**).

La qualité du blé est influencée par chacun des constituants du grain qui joue un rôle seul ou en interaction avec d'autres constituants dans l'expression de la qualité. Parmi ces composants: les protéines, l'amidon, les lipides, les enzymes, etc. ... **(Cherdouh, 1999)**.

L'Amidon

L'amidon est le principal polysaccharide de réserve des végétaux supérieurs, le grain de blé et l'albumen en contiennent respectivement 67-68% et 78-82%. C'est l'un des polymères fonctionnels les plus importants des aliments en raison de son pouvoir gélifiant et fixateur d'eau.

L'amidon de blé est constitué de granules de type A (80-90%) en poids et 15-20% en nombre), les plus gros (20-25µm) et lenticulaires, et de granules de type B, plus petits (2- 10 µm) et sphérique. **(FEUILLET, 2000)**.

Les Protéines

Les grains de blé renferment un grand nombre de protéines : des protéines de structure, des protéines biologiques actives et des protéines de réserve. Ces protéines ne sont pas réparties dans le grain de blé uniformément, elles sont surtout localisées dans le germe et l'assise protéique. Les protéines sont les seuls composés responsables à la fois de l'extensibilité, ténacité, élasticité et cohésion de la pâte. Parmi les différents types de protéines du blé, le gluten est le plus important tant du point de vue quantitatif (80-85% des protéines totales) que technologique **(BENHANIA, 2013)**.

Les Lipides

Les lipides représentent une classe complexe hétérogène de constituants, que nous définirons comme étant insolubles dans l'eau et solubles dans les solvants organiques (chloroforme, éther, benzène.....).

Ils sont constitués de longues chaînes hydrocarbonées et contiennent un ou plusieurs acides gras ou des dérivés d'acides gras.

Les lipides sont des constituants mineurs du blé puisqu'ils ne représentent en poids qu'entre 1.5 et 2.5 % **(DANIELS et al., 1971)**.

Le grain de blé est riche en acides gras saturés, localisés dans le germe (15%) et les enveloppes (12%) **(CALVEL, 1980)**.

Le grain de blé renferme également les constituants suivant :

Les Vitamines

Localisées surtout dans le germe, leur répartition varie selon le sol, le climat et la variété du blé. On retrouve surtout les vitamines : B1, B2, B5, PP, B6 et E. les variations dues aux

traitements technologiques sont beaucoup plus marquées parce que certaines vitamines sont très sensibles à la chaleur (**GODON, 1995**).

Matières minérales

Tous les éléments minéraux sont présents dans le grain à des proportions très différentes: 75% de Potassium (300-600 mg/100g de matière sèche), le Phosphore (200-500 U) dont la majeure partie se trouve sous forme de phosphate, le Souffre (100-250 U), Magnésium (100-150 U), Chlore (50-150 U) et Calcium (25-100 U). Les éléments minéraux n'existent pas à l'état libre mais à l'état combiné. Le blé peut être plus ou moins riche en minéraux selon le sol, le climat, la fumure et même l'année (**GODON, 1995**).

Les enzymes

Elles sont présentes en faible quantité dans le grain, les plus importantes sont :

- Les protéases trouvées en quantité relativement faible.
- Les amylases : sont des hydrolases capables de dégrader spécifiquement les liaisons glucidiques de l'amidon (amylose et amylopectine) (**ADRIAN et POIFFAIT,1996**).
- La lipase : est une enzyme lipolytique concentré dans la couche à aleurone et augmente au cours de germination (**POTUS et al, 1994**).

Tableau 5: Composition chimique des différentes parties du grain de blé

Partie du grain	% respectif dans le grain	Protéines	Composition en % des différentes parties			
			Fibres brutes (minéraux)	Lipides	Cendres	Eau
Grain	100	12+/- 1 Souvent > 1	4	2	1,5 à 2	14,5 à
Ecorce (sauf assise protéique)	9	5	21	1	3	
Assise protéique	8	18	7	9	16	
Albumen	80	> 10	0,5	1	0,5	
Germe	3	26,5	3	> 10		

(**BRANGER et al.,2007**)

6. Les protéines du grain de blé :

Osborne, en **1907**, a été le premier à s'intéresser à la classification des protéines du grain de blé. En **1924**, il définit quatre groupes de protéines caractérisés par leur solubilité dans différents milieux (**Osborne, 1924**),

- **les albumines** qui sont solubles dans l'eau ;
- **les globulines** qui sont solubles dans les tampons salins ;
- **les gliadines** qui sont solubles dans une solution d'alcool à 70% ;
- **les gluténines** qui sont solubles dans une base ou un acide ou des détergents en présence d'un réducteur.

Cette classification a été revue en **1986** par **Shewry et collaborateurs** qui ont proposé deux grandes catégories:

- **les protéines métaboliques** : les albumines et globulines, les amphiphiles ;
- **les protéines de réserves** : les gliadines et les gluténines.

Les protéines métaboliques :**Les albumines et globulines :**

Les albumines et les globulines représentent 15 à 20% des protéines présentes dans la farine de blé et sont solubles respectivement dans l'eau et les tampons salins. Ce groupe de protéines est très diversifié de par ses propriétés physicochimiques (compositions en acides aminés, points isoélectriques et poids moléculaires).

Ces protéines participent à la formation du grain et à l'accumulation des réserves dans l'albumen (**Vensel et al., 2005**).

Les protéines amphiphiles

Les protéines amphiphiles représentent entre 5 et 9% des protéines présentes dans la farine de blé. Elles possèdent un pôle hydrophobe et un pôle hydrophile. Ces protéines sont solubles dans le détergent Triton X114 et sont liées aux membranes. Elles jouent un rôle important dans la qualité, notamment les puroindolines qui sont connues pour avoir un effet sur les propriétés technologiques de la pâte (**Dubreil et al., 1997 ; Igrejas et al., 2001**). Les travaux réalisés par **Amiour et al. en 2003** ont permis d'assigner certaines de ces protéines sur les chromosomes du blé tendre.

Les protéines de réserves :

Les protéines de réserves font partie des prolamines et sont constituées par un mélange complexe de protéines. Chez le blé, les gènes codant pour ces protéines sont situés sous forme

de « cluster » de 2 à plus de 40 séquences codantes dépourvues d'introns sur les bras courts et longs des chromosomes du groupe 1 et les bras courts des chromosomes 6A, 6B et 6D. Ces protéines ont largement été étudiées du fait de leur relation avec la qualité technologique du blé. Une synthèse bibliographique a été rassemblée par **Wrigley, Békés et Bushuk en 2006** dans l'ouvrage « Gliadin and Glutenin : the unique balance of wheat quality ».

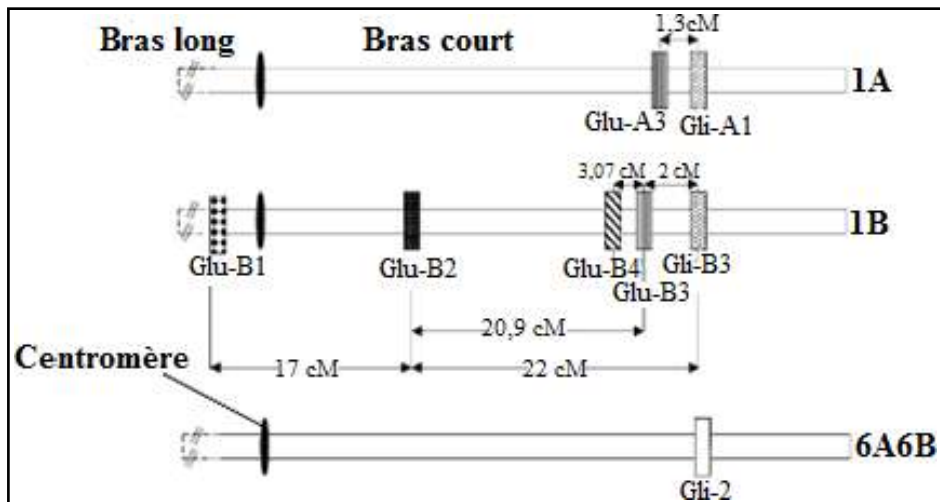


Figure 06 : Localisation chromosomale des différents gènes codant pour les gluténines (D'Ovidio et Masci, 2004)

Les prolamines regroupent d'une part les protéines monomériques (les gliadines) et d'autre part les protéines polymériques (les gluténines) qui sont elles mêmes constituées de deux sous groupes : les sous unités de gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM) et les sous unités de gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM). D'une manière générale, la proportion entre ces différentes prolamines est la suivante : 40% de gliadines, 40% SG-FPM et 20% de SG-HPM.

Ces protéines ont aussi été classées selon leur composition et séquences. On distingue:

- les prolamines riches en soufre qui représentent 70% des prolamines et sont constituées des gliadines de type α , β , γ et des SG-FPM.
- les prolamines pauvres en soufre :représentent entre 10 et 12% des prolamines totales et sont exclusivement constituées des gliadines de type ω .
- les prolamines de haut poids moléculaire : représentent 20% des prolamines.
- Les SG-HPM peuvent être de deux types différents : x et y.

Ces prolamines ont la capacité de former des structures polymériques avec les SG-FPM et certaines gliadines par l'intermédiaire de ponts disulfures.

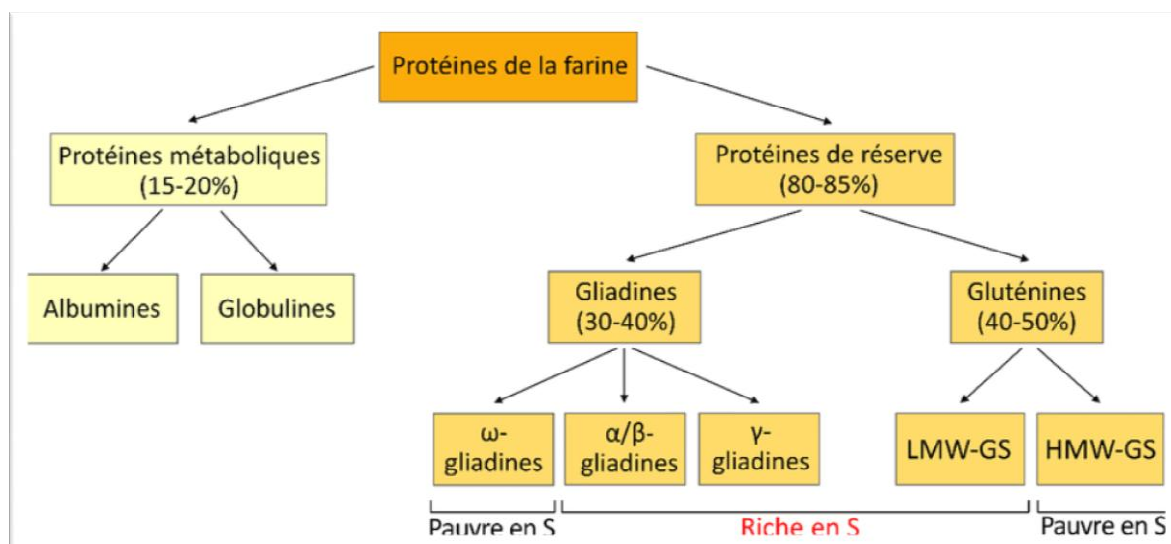


Figure 07 : composition protéique de la farine de blé (rapprochement des classifications de **Shewry P., et al., 1986**)

7. Analyse de la diversité

L'évaluation de la diversité génotypique et phénotypique peut être effectuée à partir de l'étude des généalogies des variétés considérées, à partir de caractères agro-morphologiques, ou encore à partir de données moléculaires (**Picard et al., 1992 ; Nachit et al., 1992**).

Les caractères morphologiques et les marqueurs biochimiques « neutres » fournissent des informations différentes, et complémentaires: les premiers renseignent sur les caractéristiques d'adaptation, par contre les marqueurs permettent de décrire la structuration de la diversité (**Boudour, 2006**).

L'identification des caractères morfo-physiologiques nous conduit à définir un idéotype adéquat sur un milieu donné et pour des conditions bien déterminées (Gherbali, 2003). D'autre part, la connaissance du matériel végétal, donc sa caractérisation et son identification sont utiles et nécessaires pour les travaux d'amélioration.

Selon Bouzerzour *et al.*, (1997), l'amélioration du rendement passe par la caractérisation du germoplasme disponible. Cette caractérisation permet de comprendre les liaisons entre différents caractères composant l'architecture de la plante, les phases de développement et leur influence sur le rendement. Selon les mêmes auteurs, l'identification des caractères contribuant positivement au rendement conduit à la sélection d'un type de plante bien défini qui valorise le milieu.

Les paramètres phénologiques de la plante

Les paramètres phénologiques renvoient à la notion « d'évitement » ou d'échappement qui correspond au pouvoir d'un cultivar à achever son cycle pendant la période où l'eau est disponible (avant la déclaration de la sécheresse) (**Hamada, 2002**).

La précocité à l'épiaison et à la maturité est un mécanisme important d'esquive de la sécheresse tardive (**Hadjichristodoulou, 1987**), chaque jour gagnée en précocité génère un gain de rendement variant entre 30 et 85 Kg / ha (**Fisher et Maurer, 1978**). La précocité a joué un rôle très important dans la stabilité des rendements des blés.

La précocité à l'épiaison et à la maturité peut donc être utilisée comme critère de sélection pour améliorer les productions dans les zones sèches (**Yang et al., 2001**)

De nombreux auteurs ont rapporté que les réductions de rendement les plus larges se produisent quand la sécheresse survient durant la période coïncidant avec l'initiation florale (**Fisher, 1973**). La précocité qui consiste en un développement phénologique rapide de cycle végétatif permet d'éviter la sécheresse et les hautes températures survenant à la fin du cycle de la culture (**Monneveux, 1991 ; Brisson, 1996**).

Morphologie de la plante et adaptation au milieu

Les marqueurs morphologiques sont déjà connus comme des outils efficaces pour l'estimation de la diversité génétique du blé (**Al Khanjari et al., 2008**) ainsi que la caractérisation des ressources génétiques est une étape clé pour la sélection.

Sont les paramètres correspondant à une stratégie d'adaptation de la culture qui font impliquer des mécanismes propres à la plante. Les essais conduits dans les différents environnements du bassin méditerranéen, ont révélé une interaction significative entre le génotype et l'environnement (**Nachit et Jarrah, 1986**). Les résultats observés par **Nachit et al., (1992)** sur les effets morphologiques et physiologiques révèlent que la taille, la capacité du tallage fertile, les caractères de l'épi, la durée du remplissage des grains et l'enroulement foliaire jouent un rôle important dans l'interaction entre génotype et environnement dans la région méditerranéenne.

Une étude faite par **Ruiz et Aguiriano (2004)** sur 30 génotypes de blé dur basée sur 14 paramètres agro-morphologiques recommandés par **IBPGI (1985)** a permis d'identifier différents groupes éco-géographiques. Ainsi, **Pecetti et Annichiarico, (1992) ; Teresa et al., (2009)** ont trouvé des différences significatives d'une région à une autre.

Ainsi, les paramètres morfo-physiologiques correspondent à une stratégie d'adaptation de la culture qui implique des mécanismes propres à la plante. En milieu variable, les

caractères morphologiques peuvent jouer des rôles assez importants qui réduisent la variabilité des rendements en grain (**Harrath, 2003 in Oudjani, 2009**).

7.2.1-Hauteur de la plante :

Selon **Hadjichristodoulou (1993)**, la hauteur de la plante fait partie des caractères d'adaptation les plus importants dans les conditions arides méditerranéennes. La contribution de la tige à l'élaboration du rendement s'accroît lorsqu'un déficit hydrique s'installe pendant la phase de remplissage, les réserves stockées dans les tiges migrent en quantités différentes selon les variétés. La hauteur de la plante apparaît comme un critère de sélection important. **Mekliche– Hanifi (1983)** trouve une liaison positive et significative entre le rendement et la hauteur de la paille. **Fisher et Maurer, (1978)** mentionnent que les blés hauts ont un indice de sensibilité à la contrainte hydrique plus faible comparativement aux blés nains.

Les barbes :

Grignac (1965), mentionne que la présence des barbes chez les céréales augmente la possibilité d'utilisation de l'eau et l'élaboration de la matière sèche lors de la phase de maturation.

La longueur des barbes est un paramètre morphologique qui semble également étroitement lié à la tolérance au déficit hydrique terminal (**Hadjichristodoulou, 1993**). Lors de la phase de remplissage du grain, la photosynthèse est moins sensible à l'action inhibitrice des hautes températures chez les géotypes barbus comparativement aux géotypes glabres (**Monneveux, 1991**).

Limiter les pertes en eau en présence de barbes chez les céréales, d'après **GRIGNAC (1965)**, expliquerait en partie la supériorité des blés durs sur les blés tendres mutiques quant à la résistance à la sécheresse, par la présence de stomates nombreux et de petite taille, à fermeture rapide (**Monneveux et Nemmar, 1986**).

Col de l'épi

La longueur du col de l'épi a souvent été proposée comme critère de sélection de géotypes tolérants au déficit hydrique (**Fisher et Maurer, 1978**). Le rôle de ce caractère s'explique par les quantités d'assimilat stockées dans cette partie de la plante qui sont susceptibles d'être transportées vers le grain en conditions de déficit hydrique terminal (**Gate et al., 1990**).

7-2-4- La dernière feuille (la feuille étendard) :

De par son âge et sa position, la feuille étendard joue un rôle primordial dans le remplissage du grain (**Auriau et al., 1992**). La durée de vie de la feuille étendard estimée par l'évolution de sa surface verte apparaît comme un révélateur du niveau du fonctionnement de

l'appareil photosynthétique en présence de déficit hydrique (**Gate et al., 1993**). D'après **Johnson et al., (1983)**, les plantes à surface foliaire plus grande peuvent tolérer la déshydratation et maintenir un potentiel hydrique élevé.

L'autre type d'adaptation foliaire développé par les plantes face à un manque d'eau est l'enroulement des feuilles. Ainsi chez certaines variétés résistantes, l'enroulement foliaire peut être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation (**Amokrane, 2001**). De même, lorsque la plante est exposée à des températures extrêmes, elle réduit la perte d'eau par transpiration ce qui permet aux réserves stockées de contribuer dans le remplissage du grain et donc au rendement en grain (**Brinis, 1995**).

7.2.5. L'épi

D'après **Spagnoletti et Qualset, (1987)**, l'épi du blé est en même temps une source et un réservoir d'assimilat qui détermine ultimement le rendement en grain. En effet, la morphologie de l'épi est en majorité connue comme critère de sélection.

L'épi joue un rôle dans la photosynthèse et la production d'assimilat nécessaires au remplissage du grain, quand la dernière feuille devient sénescente. Les derniers organes chlorophylliens (glumes et barbes) jouent un rôle prédominant dans la formation du grain (**Blum, 1985**).

Le rendement et ses composants

Engledow et wadham, (1993) définissent le rendement comme étant le produit des composantes nombre de plante par unité de surface, nombre d'épis par plante, nombre de grains par épi et poids de mille grains. Chez le blé, l'amélioration du rendement dépend de l'amélioration d'une ou de plusieurs composantes du rendement.

Le tallage

Ce caractère est influencé par les caractéristiques variétales ainsi que les techniques culturales (**Arian et al., 1992**). Le pourcentage de tallage est associé aux composantes du rendement tels que le nombre d'épis, qui dépend énormément des talles herbacées, le poids du grain dépend lui aussi du nombre de talles du fait de la compétition des différents épis pour l'accumulation des assimilats et également pour la nutrition minérale et l'eau (**Massle, 1981**). D'autre part, **Benbelkacem, (1986)** souligne que l'amélioration du pouvoir du tallage et du nombre d'épis au mètre carré donne un potentiel pour l'accroissement du rendement.

Le nombre de grains par épi

Le nombre de grains par épi contribue directement au rendement en grain chez le blé. En conditions de sécheresse, l'aptitude d'une céréale à conserver un rendement en grain

convenable dépend de ses potentialités à produire un nombre d'épis et un nombre de grains par épi élevés (**Ben Salem et al., 1990**). Selon **Ketata (1987)**, le nombre de grains par mètre carré est le produit du nombre d'épis fertiles par mètre carré par le nombre de grains par épi.

Le poids de 1000 grains

Une carence hydrique en fin de cycle réduit le poids du grain (**Kobata et al., 1992 in El-Hafid, 1997**). En effet, en conditions de déficit hydrique ce sont le nombre de grains par épi et le poids du grain qui déterminent le plus le rendement en grain (**Assuncao, 1979 in El-Hafid, 1997**). **Dokuyucu et al., (1999)** ont trouvé des corrélations significatives et positives entre le rendement en grain et le poids des grains par épi.

Paramètres physiologiques

Les outils de physiologie appliqués à la sélection trouvent des difficultés dues à la complexité des mécanismes des plantes et leur comportement vis-à-vis des conditions abiotiques de l'environnement. Dans les environnements stressés, le rendement dépend largement de l'expression des paramètres physiologiques. Ces derniers jouent un rôle important dans la tolérance aux stress et à l'interaction génotype et environnement (**Nachit et al., 1992 ; Annichiarico et Pecetti, 1993**).

Teneur relative en eau (TRE) :

La caractérisation du statut hydrique d'une plante pourrait passer par la seule évaluation de la teneur relative en eau. **Clarke et Mc Craig, (1982)** attirent l'attention sur l'utilisation de la teneur relative en eau comme indicateur de l'état hydrique de la plante sous stress. **Scofield et al., (1988)** notent que la teneur en eau diminue lorsque le stress augmente, mais elle diminue plus vite chez les variétés sensibles que chez les variétés résistantes. Ainsi, les variétés tolérantes au stress hydrique, sont celles qui sont capables de perdre le moins d'eau par unité de temps et unité de surface, sous stress.

La teneur relative en eau ou turgescence foliaire est une caractéristique génotypique qui est liée à la capacité de la plante à maintenir un niveau d'eau dans la feuille qui soit à même de garantir la continuité de l'activité métabolique dont, entre autres, la photosynthèse. Cette capacité est liée aux possibilités de la plante à s'alimenter, de manière constante en eau (système racinaire), au contrôle des pertes d'eau par les surfaces évaporantes (nombre et diamètres des stomates, résistance stomatique à la sortie de la vapeur d'eau) et à l'ajustement osmotique (**Araus et al., 1991**).

Le maintien d'un niveau élevé de la TRE serait probablement lié à une bonne capacité d'ajustement osmotique permettant la préservation de l'intégrité structurale et fonctionnelle des tissus (**Blum, 1988**).

Le suivi de la teneur relative en eau d'une variété de blé dur et d'une variété de blé tendre a démontré que le blé dur maintenu en régime déficitaire perd davantage l'eau, par contre ses besoins sont satisfaits (**Mekliche et al., 1993**).

Le potentiel osmotique aide dans le maintien de la turgescence cellulaire qui est à la base de la préservation de plusieurs fonctions physiologiques. En effet celle-ci permet d'empêcher la fermeture des stomates et donc de maintenir la photosynthèse, la transpiration, l'assimilation du carbone et enfin l'elongation cellulaire (**Bammoune, 1997**).

Pilosité, la glaucescence et les cires

La pilosité des feuilles et des tiges, la glaucescence et la présence des cires induisent une augmentation de la réflexion des radiations incidentes et limitent donc l'élévation de la température des feuilles et contribuent par conséquent, à limiter les pertes d'eau par transpiration. (**Bengeston et al., 1978 ; Anderson et al., 1984 ; Clarke et Richards, 1988 ; Araus et al., 1991**).

La glaucescence est un caractère qui réduit le taux de déperdition d'eau (transpiration cuticulaire) en conditions de déficit hydrique et qui influence fortement le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau en retardant la sénescence foliaire (Richards, 1986). La production des cires est liée à des facteurs environnementaux tels que : la faible humidité de l'air, une forte radiation lumineuse ; la réduction de la disponibilité de l'eau du sol (**Bengeston et al., 1978 ; Levitt, 1980 ; Johnson et al., 1983**).

Teneur en chlorophylle

La diminution de la photosynthèse, qui fait suite à la réduction de la teneur relative en eau et du potentiel hydrique foliaire, est causée par la réduction de la pénétration du CO₂ (**El-jaafari et Paul, 1993**).

Bousba et al., (2009), indiquent qu'une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur sous stress hydrique. **Tahri et al., (1997)** montrent que l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress suivie par un abaissement dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a et b). Ainsi la variété qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa (**Tahri et al., 1997**).

Accumulation de la proline

L'accumulation de la proline constitue aussi un véritable mécanisme de tolérance au stress hydrique (**Slama et al. 2004**). L'existence chez les céréales d'une variation intraspécifique pour l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique suggère la possibilité d'une sélection, sur la base de ce caractère, des génotypes qui auront une bonne

capacité à survivre et un rendement en grains stable en conditions hydriques limitantes (**Monneveux et Nemmar., 1986**). Pour cette raison, certains auteurs, Bellinger *et al.*, (1991) ont proposé l'accumulation de la proline comme technique de sélection.

Tahri et al., (1997) montrent que plusieurs sélectionneurs et physiologistes ont utilisé la capacité de son accumulation dans le criblage de géotypes résistants au déficit hydrique (**Monneveux, (1991)** sur le blé dur ; au froid Dorfling et **Askman (1989)** sur le blé tendre.

Singh et al., (1973) ont noté, chez les céréales soumises à l'action de la sécheresse, des accumulations de proline d'autant plus importantes que les géotypes sont plus résistants ; **Singh et al., (1973)** notent, chez l'orge, que cette accumulation a lieu principalement au niveau des limbes foliaires et, à un degré moindre, au niveau des racines et des apex. Chez le blé, l'augmentation des teneurs en proline et en arginine des feuilles serait, selon **Protsenko et al., (1968)**, un des symptômes de l'adaptation à la sécheresse, les variétés résistantes accumulant ces deux acides aminés en quantités plus importantes.

La proline pourrait intervenir dans ce cas en régulant, par l'augmentation de sa concentration, la pression osmotique interne (**Stewart et Lee, 1974**) mais aussi en inhibant les mécanismes d'auxésis ou en constituant un « stock d'azote » utilisable par la plante postérieurement à la période de souffrance hydrique (**Monneveux et Nemmar, 1989**).

Rôles des sucres solubles

Le potentiel osmotique peut être maintenu pour un stress hydrique de faible ou moyenne intensité, par ajustement osmotique. Les sucres peuvent servir de composés solubles compatibles pour cet ajustement osmotique, comme de nombreuses autres molécules (proline, glycine-bétaïne ou pinitol). D'après **Bensari et al., (1990)** lorsque la contrainte hydrique cesse, la feuille reconstitue les réserves d'amidon et si une nouvelle contrainte hydrique intervient, le temps d'adaptation est plus court. En effet, **Hare et Cress, (1997)** remarquent que les sucres glucose, fructose et le saccharose représentent des osmotocums beaucoup moins puissants que la proline, ils participent eux aussi au maintien de la balance de la force osmotique. Par ailleurs, il a été observé que sous stress hydrique, les réserves amyliques sont progressivement utilisées suite à leur conversion rapide en saccharose qui pourra être associé à une inhibition de la synthèse de l'amidon (**Bammoune, 1997**).

L'implication des sucres dans la tolérance au stress hydrique a été mise en évidence par les corrélations observées entre le contenu en certains sucres et l'acquisition de la tolérance (**Déjardin et al., 1999**). De nombreuses études ont mis en évidence l'accumulation de sucres solubles lors de la dessiccation. Une idée principale en ressort différents sucres solubles

peuvent être présents dans des tissus bien hydratés, mais le saccharose est préférentiellement accumulé dans les tissus en déshydratation (**Déjardin et al., 1999**).

8. Les critères d'appréciation de la qualité du grain du blé dur :

Le blé dur est employé depuis longtemps dans les pays méditerranéens pour la fabrication de pains plats traditionnels et d'autres pains de spécialité (**Quaglia, 1988**). La notion de qualité est complexe, elle est conditionnée par les habitudes alimentaires, les spécificités des blés et les technologies de transformation utilisées (**Mebtouche, 1998**).

La qualité est une somme de caractéristiques qui vont du rendement semoulier jusqu'à l'aptitude à la transformation (**Porceddu, 1995**), et s'élabore toute au long du cycle de développement pour répondre d'une part aux attentes des industriels, semouliers et pastiers et d'autre part aux critères nutritionnels, organoleptiques et hygiéniques. (**Liu et al., 1996**).

Il existe plusieurs critères pour l'appréciation de la qualité des grains de blé dur. Ils dépendent en partie de la variété et de techniques culturales :

Le taux de moucheture :

Est une tache brune du péricarpe causée par des champignons, se traduit par une diminution de la qualité commerciale des semoules à cause de la présence de points noirs dans les semoules, qui diminuent leur qualité commerciale.

Le taux de mitadinage :

Le taux de mitadinage est un critère d'appréciation déterminant dans le rendement et la qualité de la semoule et des produits dérivés. D'après **Matweef (1946)** le mitadinage serait dû, en particulier, à l'excès d'eau dans le sol et à un déficit d'azote et qui donne un grain gonflé, blanchâtre, à structure partiellement ou entièrement farineux, diminuant le rendement en semoule.

Il est donc important de contrôler le pourcentage de grains mitadinés, car il apporte une indication directe sur la valeur semoulière (**Desclaux, 2005**). Outre son effet défavorable sur le rendement en semoule, le mitadinage exerce une influence défavorable sur la qualité culinaire des pâtes alimentaires (**Feillet, 1986**).

C'est la structure vitreuse de l'amande qui favorise la formation des semoules; la structure farineuse, jugée comme anomalie pour un blé dur, tend à fournir des farines (**Samson et Morel, 1995**).

Le calibrage

Permet de classer la grosseur des grains en 3 fractions une fraction inférieure à 2.2 mm; une fraction inférieure à 2.5mm et une fraction inférieure à 2.8mm.

Outre, le poids spécifique et l'humidité des grains et le taux des protéines.

Abecassis et al. (1996) ont affirmé que le blé dur idéal pour un semoulier doit posséder les caractéristiques suivantes : gros et Vitreux, ayant des enveloppes fines et une faible teneur en matières minérales, riche en protéines, possédant un gluten ferme et élastique et contient beaucoup de pigments caroténoïdes mais peu d'activités lipoxgénasiques et peroxydasiques.

Le taux des protéines est connu comme l'élément le plus important de la qualité, il a une influence directe sur la qualité des pâtes et pain (**Sissou, 2008**).

9. Le cycle biologique du blé :

De graine à graine, le cycle biologique du blé se divise en trois périodes successives, chacune comporte des phases et des stades (Figure 9). La réalisation des différents stades est sous le contrôle de la somme des températures journalières (degré-jour) subie par la plante. La somme des températures, base zéro pour le blé, se calcule ainsi :

Somme degré-jour = $(T^{\circ}\text{C min} + T^{\circ}\text{C max}) / 2$; Il ne faut prendre en considération que les valeurs positives (>0) (**Hamadache, 2013**).

Période végétative :

Phase germination-levée :

Cette phase correspond à la mise en place du nombre de pieds/m². Le sol est percé par le coléoptile qui est un étui protecteur de la première feuille (**Hamadache, 2013**). La levée est notée quand 50% des plantes sont sorties de la terre (Figure 8). Pendant cette phase, les jeunes plantes sont sensibles au manque d'eau qui provoque une perte des plantes et au froid qui provoque le déchaussage (**Karou et al., 1998**).

Le tallage

Cette phase s'amorce à partir de la quatrième feuille. La formation de la première talle se fait au stade 3 feuilles. La première talle primaire (maitre-brin) apparaît à l'aisselle de la première feuille du blé. La 2^{ème} et la 3^{ème} talle apparaissent à l'aisselle de la 2^{ème} et la 3^{ème} feuille (**Hamadache, 2013**).

La fin tallage est celle de la fin de la période végétative, elle marque le début de la phase reproductive, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-noeuds (**Gate, 1995**) (Figure 09). Cependant, **Longnecker et al., (1993)** suggèrent que le tallage ne s'arrête pas à n'importe quel stade de développement du blé, mais il est plutôt contrôlé par un certain nombre de facteurs génétiques et environnementaux. Le nombre de talles productives dépend du génotype, de l'environnement et est fortement influencée par la densité de peuplement (**Acevedo et al., 2002**).

Période reproductrice :**Montaison-floraison :**

La montaison débute lorsque les entrenœuds de la tige principale se détachent du plateau du tallage (**Belaid, 1987**). Selon **Baldy (1984)** la montaison constitue la phase la plus critique du développement du blé.

Tout stress hydrique ou thermique au cours de cette phase réduit le nombre d'épis montants par unité de surface. A l'épiaison, l'épi sort de la dernière feuille. Les épis dégainés fleurissent généralement après quelques jours (moins de 7 jours) après l'épiaison. Les températures élevées et la sécheresse au cours de l'épiaison et de la floraison peuvent réduire la viabilité du pollen et ainsi réduire le nombre de grain (**Herbek et Lee, 2009**).

Période remplissage et maturité du grain :**Floraison-maturité :**

La période floraison-maturité correspond à l'accumulation des hydrates de carbone et de l'azote dans le grain (**Gallais et Bannerot, 1992**). Cette période correspond à la formation de la dernière composante constitutive du rendement qui est le poids de 1000 grains (**Robert et al., 1993**). Le remplissage du grain, après la floraison, se fait de deux façons :

- Par la migration d'une partie des réserves de la tige.
- Par la photosynthèse des parties de la plante encore vertes (feuilles, épis, barbes)

(**Hamadache, 2013**).

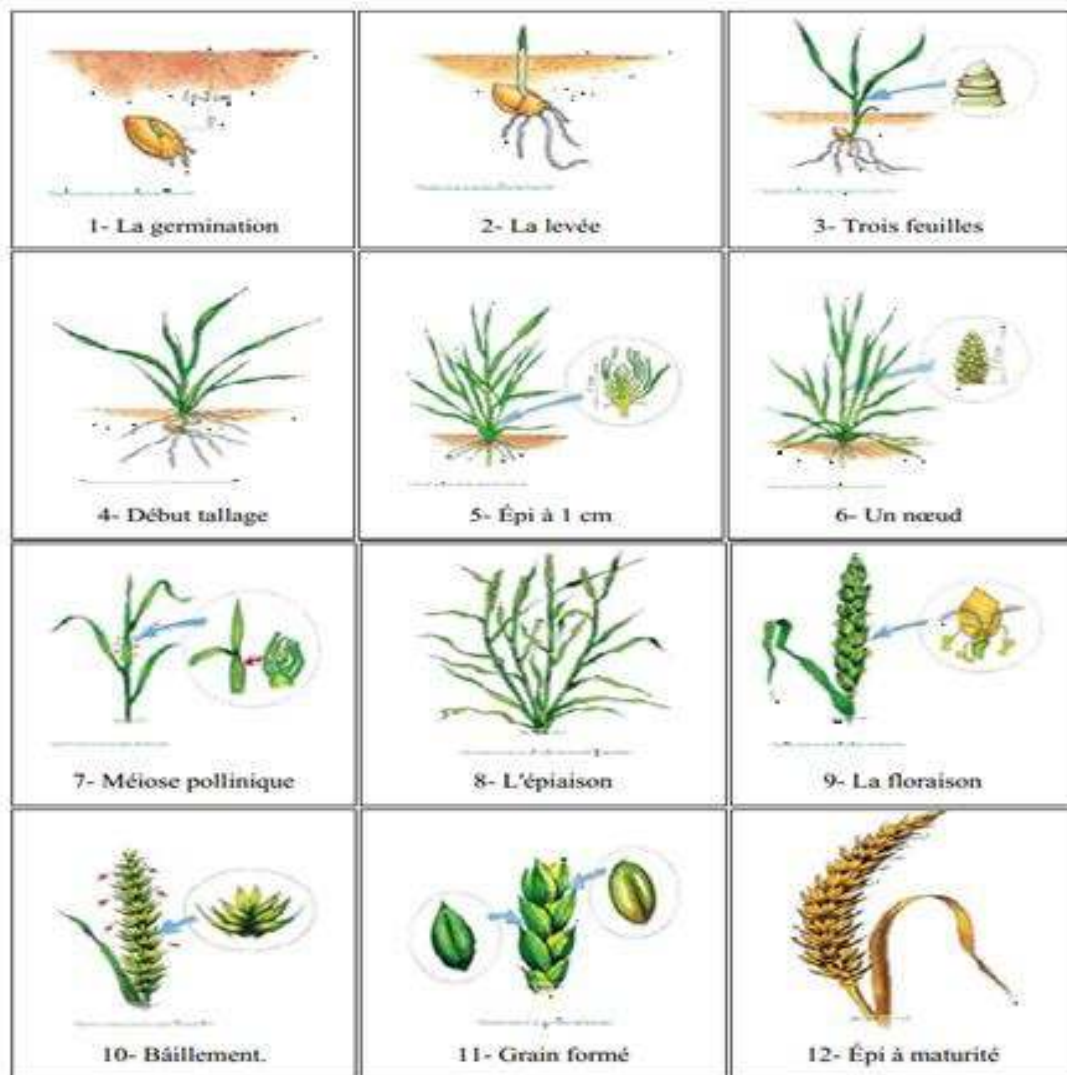


Figure 08 : Différents stades de développement du blé dur (cycle de Soltner, 2005)

10. Génomique du blé :

Le génome du blé :

Avec 16,7 Gb pour le génome nucléaire, le blé possède l'un des génomes les plus complexes parmi les céréales et, au-delà, dans l'ensemble du monde vivant.

De plus, le blé comporte non pas un « simple » génome nucléaire mais un génome nucléaire composite, une association de trois génomes de trois espèces différentes, regroupés dans la même cellule et formant par là même une nouvelle espèce (figure 10).

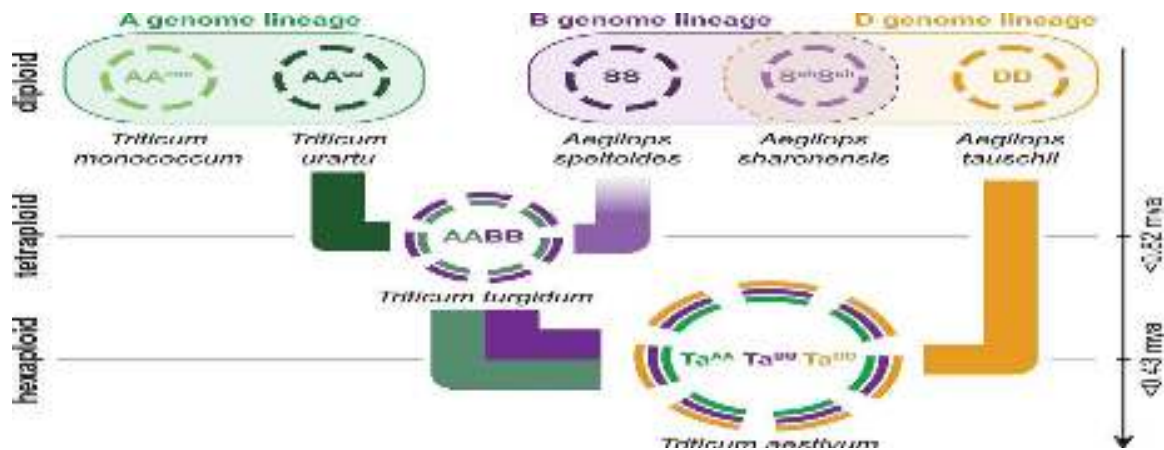


Figure 09 : Diagramme schématisé des relations entre les génomes du blé avec l’histoire et la généalogie de la polypléidisation. (Mayer et al., 2014).

Les noms et la nomenclature des génomes sont indiqués par des cercles qui montrent une représentation schématisée de la complémentarité chromosomale pour chaque espèce. Les temps sont estimés selon Marcussen et al., 2014 ; « mya : million years ago ».

Evolution de génome polypléide du Triticum :

Le blé, une plante domestiquée au génome polypléide complexe. Le génome du blé tendre est constitué de 17 milliards de paires de base, dont plus de 80% de séquences répétées. La taille ainsi que la forte proportion de séquences répétées constituent des obstacles importants pour le séquençage du génome du blé (Paux et al., 2008). Outre un génome nucléaire, le blé possède comme tout végétal un génome mitochondrial et un génome chloroplastique.

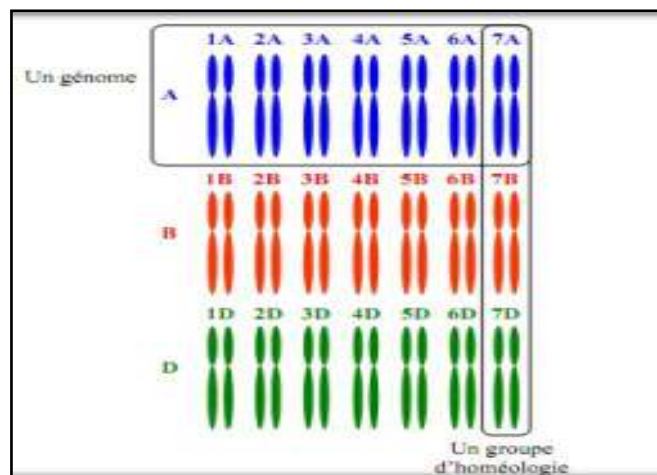


Figure 10 : Organisation du génome du blé hexaploïde. (Bogard.,2011)

Ce génome comprend 21 chromosomes intégrant les trois génomes homéologues (A, B et D) des espèces ayant successivement formé la série d’allopolyploïdes du genre Triticum. L’événement de polypléidisation a résulté du croisement entre deux espèces diploïdes ($2n =$

14) *Triticum urartu* (génome A) et une espèce proche d'*Aegilops spelta* (génome B) disparue aujourd'hui. Ce croisement a eu lieu avant la domestication par voie de sélection naturelle il y a environ 0.5 million d'années. Les descendants sont les blés tétraploïdes comme le blé dur (*Triticum turgidum ssp durum*) et l'amidonnier (*Triticum dicoccum*).

Un second croisement entre une variété domestiquée d'un blé tétraploïde et *Triticum tauschii* porteur du génome D a conduit, il y a environ 10 000 ans, à l'obtention de blés hexaploïdes tels que le blé tendre (*Triticum aestivum*) ou l'épautre (*Triticum spelta*) (Griffiths et al., 2006).

Cette allopolyploïdisation a conduit à la formation de génomes de très grande taille. Le génome du blé tendre est structuré en 21 paires de chromosomes regroupées en sept groupes homéologues représentant les génomes de chaque ancêtre.

Du fait de l'appareillement des espèces constituant le génome du blé tendre, les gènes homéologues ont des fonctions proches mais ont pu, éventuellement au cours de l'évolution, diverger suffisamment pour acquérir des fonctions biologiques propres. Le gène *ph1* "Pairing homeologous 1", présent sur le bras long du chromosome 5B, supprime les appariements homéologues à la méiose, ce qui a pour conséquence un comportement diploïde strict à la méiose (Griffiths et al., 2006).

Cytogénétique du blé

Le genre *Triticum* comprend les espèces sauvages et domestiques généralement considérées comme du blé. La filiation génétique des blés est complexe et incomplètement élucidée. Il est acquis que le génome A provient de *Triticum monococcum*, le génome B d'un *Aegilops* (*bicornis*, *spelta*, *longissima* ou *searsii*) et le génome D d'*Aegilops squarrosa* (également dénommé *Triticum tauschii*). (Hamel, 2010)

Le croisement naturel *T. monococcum* x *Aegilops* (porteur du génome B) a permis l'apparition d'un blé dur sauvage de type AA BB (*Triticum turgidum ssp, diccoides*) qui a ensuite progressivement évolué vers *L turgidum ssp, diccoccum* puis vers *T durum* (blé dur cultivé). Les blés tendres cultivés (AA BB DD) seraient issus d'un croisement, également naturel, entre *T turgidum ssp. diccoccum* (AA BB) et *Aegilops squarrosa* (DD). (Hamel, 2010) (Figure 10).

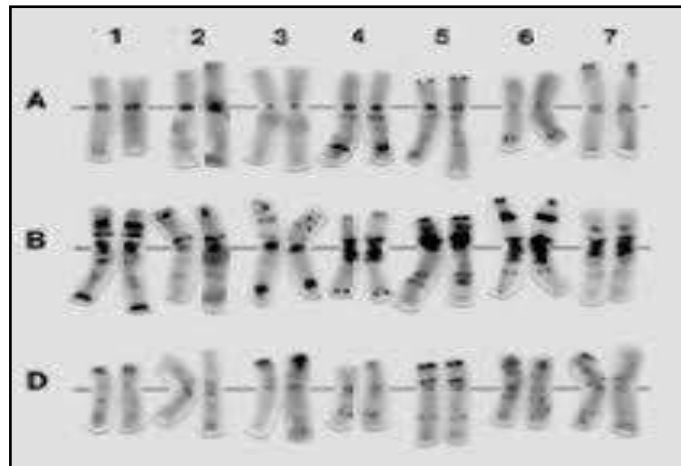


Figure 11 : Les trois génomes de blé (génome polyploïde) (Zhang et al.,2011)

a) Les différentes espèces du genre *Triticum* :

Toutes les espèces de blés sauvages et domestiques, comme les espèces d'*Aegilops* (le genre *Aegilops* est souvent considéré synonyme de *Triticum*), forment des séries polyploïdes dont le nombre haploïde de base est 7. Cela se vérifie aussi pour des genres voisins appartenant au même groupe taxonomique des Triticinées (Orge, Avoine, Bromes, fétuques, etc.).

Les blés sauvages et domestiqués peuvent comporter 14 (diploïdes), ou 28 chromosomes (tétraploïdes). L'engrain est un blé domestiqué diploïde, le blé dur est tétraploïde.

Seul le blé tendre est hexaploïde ($2n=42$) et ne possède pas d'équivalent sauvage (au moins dans les espèces classiquement rangées dans le genre *Triticum*). (Salamé, 2012)

On distingue deux espèces cultivées de blé : Le blé tendre (*Triticum aestivum*) (AABBDD, $2n = 42$), fournit une farine panifiable et le blé dur (*Triticum durum* Desf.) (AABB, $2n = 28$), qui, essentiellement cultivé pour la semoulerie, Parmi les espèces apparentées au blé, on trouve une abondance de gènes de résistance aux virus à la fusariose, à la sécheresse et aux maladies foliaires et racinaires.

Ces gènes pourraient résoudre des problèmes d'échecs cultureux dans les pays du sud et diminuer la pollution dans les pays plus fortunés. En réduisant les besoins de pesticides et d'engrais conventionnels. (Salamé,2012).

b) Les caryotypes de trois espèces de blé :

Le caryotype de *Triticum monococcum* présente toutes les caractéristiques d'un caryotype classique. Il s'agit donc du caryotype d'une espèce diploïde. En revanche les caryotypes du blé dur et du blé tendre présentent une originalité.

Celui du blé dur montre deux groupes de 7 chromosomes, désignés par les lettres A et B. Dans chaque groupe, chaque chromosome est représenté en deux exemplaires ce qui est habituel (chromosomes homologues).

Le caryotype du blé tendre montre, outre les deux groupes de chromosomes A et B, un troisième groupe de 7 chromosomes, D. Chez une espèce comme *Triticum turgidum* où le nombre de chromosomes est de 28, les chromosomes du caryotype devraient être numérotés de 1 à 14 et chez le blé tendre (42 chromosomes) de 1 à 21. Ce n'est pas le cas. On identifie seulement 7 chromosomes ayant chacun un représentant dans les groupes A et B (A1 et B1, A2 et B2, etc.) chez le blé dur, et un représentant dans les groupes A, B et D chez le blé tendre.

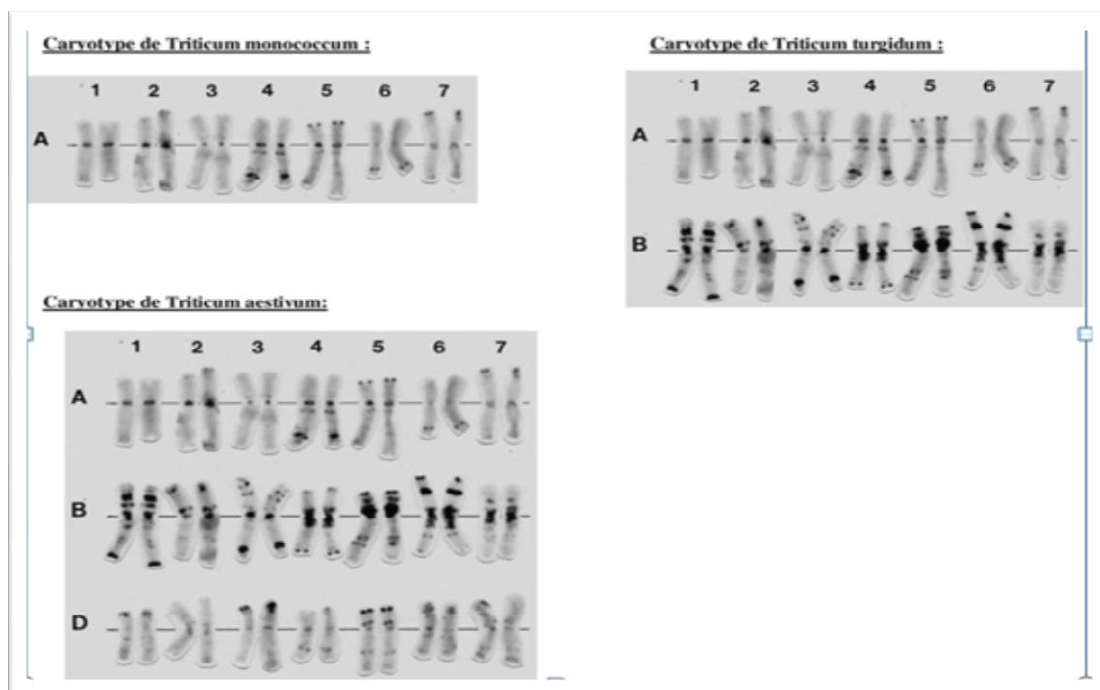


Figure 12 : caryotypes des trois espèces de blé

Chapitre 02 :

Contraintes Abiotiques et biotiques et leurs effets sur le blé

1. Notion du stress

Tous les organismes subissent des modifications/perturbations de leurs conditions de vie, liées par exemple à des changements de leur environnement. Ces stress biotiques et abiotiques peuvent induire un dysfonctionnement cellulaire allant jusqu'à la mort des cellules.

Le stress chez les plantes apparaît avec des significations différentes en biologie, qui convergent principalement en attribuant le stress à n'importe quel facteur environnemental défavorable pour une plante (**Levitt, 1980**).

Un stress se définit aussi par son intensité, sa durée, le nombre d'expositions ainsi que par son association à d'autres stress (Bray *et al.*, 2000) et son effet dépend de son degré, le stade de développement de la plante, le génotype et son interaction avec l'environnement (**Yokota *et al.*, 2006**).

Selon **Jones *et al.*, (1989)** un stress désigne à la fois l'action d'un agent agresseur et les réactions qu'il entraîne dans l'organisme agressé, une force qui tend à inhiber les systèmes normaux. D'autre part, les stress environnementaux nés de la fluctuation des facteurs abiotiques (sécheresse, salinité et température) et biotiques affectent les conditions de croissance, le développement et le rendement des plantes (**Madhava Rao *et al.*, 2006**)

Les facteurs de stress agissent rarement seuls ou de façon constante tout au long du développement des végétaux, ce qui complique l'étude physiologique des stress chez ces derniers. La complexité de la réponse biologique au stress rend souvent difficile à discerner la cause et les effets du stress (**Jones *et al.*, 1989**).

2. Différents types de stress:

- Stress physiques : déshydratation (dessiccation), température élevée ou gel, choc osmotique, variation de pH, conditions de lumière, rayonnement UV, radioactivité, traitements mécaniques.
- Stress chimiques : salinité, métaux lourds, effet de l'ozone, déséquilibre de la balance de minéraux nutritifs.

3. Les principales contraintes liée à la production du blé en Algérie :

La faiblesse de la production céréalière et particulièrement celles des blés et des orges est due à plusieurs facteurs dont les plus importants sont considérés être : les pratiques culturales, les aléas climatiques et les variétés anciennes à faible rendement (Sayoud et Benbelkacem 1996). Un autre élément parmi les plus contraignant de la production céréalière et non des moindres est le parasitisme du essentiellement aux maladies

et insectes. Les maladies fongiques du blé causent des pertes de rendement pouvant atteindre 30% en cas de développement épidermique (Eyal et al. 1987).

Contrainte abiotique :

Les principales contraintes abiotiques des zones céréalières sont :

- Une succession de périodes sèches de durées et de fréquences variables
- Des gelées hivernales et printanières
- Des températures élevées et siroccos
- Des sols salins

3 .1.1. Notion du stress thermique :

La température est l'un des facteurs environnementaux qui affectent le plus la croissance. La température est un facteur environnemental qui agit sur la vitesse de croissance et sur le développement des plantes, incluant la transition de la phase végétative à la phase reproductive.

Pour effectuer sa croissance et son développement, chaque plante exige une gamme bien particulière de températures. Chaque plante possède une température optimale de croissance et de développement, qui ne peuvent se dérouler qu'entre des limites supérieures et inférieures. Lorsque la température avoisine ces limites, la croissance diminue et au delà, elle s'annule (Hopkins, 2007).

Le stress thermique est souvent défini quand les températures sont assez hautes ou basses pendant un temps suffisant pour qu'elles endommagent irréversiblement la fonction ou le développement des plantes. Elles peuvent être endommagées de différentes manières, soit par des températures basses ou élevées de jour ou de nuit, par l'air chaud ou froid ou par les températures élevées du sol .La contrainte thermique est une fonction complexe qui varie selon l'intensité (degré de la température), la durée et les taux d'augmentation ou de diminution de la température (Oukarroum, 2007).

La température représente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'être vivants dans la biosphère (Ramade, 2003).

3 .1.1.1. Stress liés à la chaleur :

La contrainte thermique par la chaleur est souvent définie comme l'élévation de la température au delà d'un seuil d'avertissement pendant une période suffisante qui endommage irréversiblement la croissance et le développement de la plante.

Généralement un passage de la température entre 10-15 au-dessus de la température ambiante, est considéré comme un choc thermique ou bien une contrainte thermique. Cependant, cette dernière est une fonction complexe de l'intensité (le degré de la température), de la durée, et du taux d'accroissement de la température (**Peet et Willits, 1998**).

Lorsque la température optimale du développement d'une plante est dépassée, le rendement des cultures baisse; cette température optimale varie d'une plante à l'autre. La plupart des plantes cultivées craignent les hautes températures, même pendant des laps de temps courts. Une température de l'air entre 45 et 55°C pendant une demi-heure abîme directement les feuilles des plantes dans la plupart des cas, et même des températures plus basses (entre 35°C et 40°C) peuvent être graves si elles persistent (**Hopkins, 2003**).

Une brève exposition périodique aux contraintes thermique sub-létales induit souvent la tolérance aux températures autrement mortelles, un phénomène désigné sous le nom de thermo tolérance. A des températures très élevées, des dommages cellulaires graves et même la mort des cellules peut se produire dans des minutes, qui pourraient être attribuées à un effondrement catastrophique d'organisation cellulaire (**Schöfl et al., 1999**).

A des températures modérément élevées, les dommages ou la mort peuvent se produire seulement après l'exposition à long terme. Les dommages directs dus aux hautes températures incluent la dénaturation et l'agrégation de protéine, et la plus grande fluidité des lipides membranaires. Les dommages les plus lents de la chaleur incluent l'inactivation des enzymes dans les chloroplastes et les mitochondries, l'inhibition de la synthèse des protéines, la dégradation des protéines et la perte d'intégrité de la membrane (**Howarth, 2005**).

3.1.1.2. Stress au froid (basse température) :

La sensibilité des plantes aux températures extrêmes est très variable. Certaines sont tuées ou lésées par les baisses modérées de température, alors que d'autres parfaitement acclimatées, sont capable de survivre au gel à des dizaines de degrés °C en dessous de zéro. Dans certains milieux, les plantes sont soumises, occasionnellement, ou régulièrement de façon saisonnière, à des températures basses. La plupart d'entre elles sont capables de résister aux températures supérieures à 0°C.

Quand les plantes sont soumises à des températures sub-optimales (entre 10 et 20°C), la croissance et le développement se ralentissent, à des températures dites froides (entre 0 et 10°C) des dommages tissulaires et cellulaires apparaissent et à des températures négatives les parties aériennes meurent. Les effets du froid ne dépendent non seulement du minimum de

température atteint, mais aussi de la nature et de la progressivité du refroidissement, de sa durée, de l'espèce et de son âge.

3.1.1.3. Le stress thermique et la culture de blé :

Un bon comportement de la culture durant tout son cycle de développement exige la réunion de certains facteurs qui conduisent à l'observation d'un meilleur rendement et parmi les exigences on peut citer :

- **Climat :** selon **Clement et Prats (1970)**, les facteurs climatiques ont une action prépondérante sur les différentes périodes de la vie du blé.
- **Température :** La température conditionne à tout moment la physiologie de blé selon le zéro de végétation et de germination c. a. d. la température à partir de laquelle un blé germe et pousse, est de 0°C cependant l'optimum se situe entre 20 et 22 °C entre ces deux extrêmes, une température élevée sera favorable au développement et à la croissance (**Simon et al, 1989**).

D'après **Baldy (1993)** il est généralement admis que la température agit de manière positive sur la croissance optimale. Ajoute que les fortes températures provoquent une levée trop rapide et parfois un déséquilibre entre la partie aérienne et la partie souterraine: Les températures entre 25 et 32 °C défavorisent l'allongement racinaire l'optimum se situe entre 5 et 12 °C. **Mekhlouf et al., (2001)** situent les exigences en température pour les stades suivants:

- Stade levée: La somme des températures =120°C.
- Stade tallage : La somme des températures =450°C.
- Stade plein tallage : La somme des températures =500°C.
- Stade épi 1 cm : La somme des températures = 600°C.

3.1.2. Stress Salin

Plusieurs auteurs ont défini la salinité des sols et des eaux comme étant la présence de concentration excessive de sels solubles, ou lorsque les concentrations en (Na⁺), (Ca⁺⁺), (Mg⁺⁺) sous formes de chlorures, carbonates, ou sulfates sont présentes en concentrations anormalement élevées (**Asloum, 1990**). Ce type de stress est essentiellement dû au NaCl en conditions naturelles (**Sun et Zheng, 1994**). Il caractérise les zones arides et semi arides, surtout là où l'irrigation est pratiquée (**Ashraf, 1994**). La salinité déclencherait un stress environnemental très significatif chez les plantes cultivées, qui constitue un obstacle majeur sur la productivité agricole.

3 .1.2.1. Effet du stress salin

La salinité constitue un des majeurs problèmes pour la croissance des végétaux, la culture du blé dur se trouve confrontée à ce problème en Algérie. L'utilisation des variétés résistantes est devenue impérative, près de 25% des terres irriguées sont confrontées au problème du sel qui affecte particulièrement les zones arides et semi-arides cette dernière est le principal facteur limitant à la croissance des plantes (**Levignron et al .1995**). Ces contraintes impliquent la mise au point de variétés suffisamment tardives pour éviter les effets de gels tardifs et assez précoces pour échapper aux effets des hautes températures. En effet le programme de sélection et d'amélioration vise essentiellement à développer des variétés précoces avec la perspective d'éviter les gelées tardives et en conséquence d'éviter également les sécheresses terminales (**Benbelkacem 2000**).

3 .1.3. Le stress hydrique

Le stress hydrique a été défini comme une baisse ou un excès de la disponibilité de l'eau dans le milieu d'installation de telle culture, traduisant par une réduction de la croissance de la plante et/ou de sa reproduction par rapport au potentiel du génotype. La contrainte hydrique est le facteur ou l'ensemble de facteurs ayant pour conséquence le stress. D'autres auteurs limitent la définition du stress aux seules conditions correspondant à une hydratation suboptimale des tissus (**LAMAZE et al., 1994**).

L'installation d'une sécheresse se manifeste par la combinaison d'une part, de la restriction de la disponibilité en eau du sol et, d'autre part, de l'augmentation de la demande évaporatrice (**KIANI, 2007**). Le manque d'eau peut se manifester aussi bien dans le sol que dans l'atmosphère (**VESELOVSKY H., 1985**). Généralement, la sécheresse du sol est lente (**LARCHER, 1995**), mais la diminution de l'humidité de l'air peut parfois être rapide (**YOKOTA et al 2006**). D'un point de vue physique, le stress hydrique résulte d'un abaissement du potentiel hydrique dans l'air et/ou dans le sol en dessous d'une certaine valeur, dépendant du génotype, du phénotype et des caractéristiques du milieu (type de sol, température, vent) (**LAMAZE et al., 1994**),.

Effet du stress hydrique

Le manque d'eau ou déficit hydrique représente le stress abiotique le plus sévère auquel la culture du blé dur fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi-arides (Sahraoui 2011). La sécheresse est l'un des principaux facteurs limitant les rendements

à travers le monde, le manque d'eau souvent associé à d'autre stress (gel, hautes températures, salinité...) (Furini et al. 1997). En effet, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement de la culture du blé dur. Le manque d'eau se traduit par une réduction de la croissance de la plante et de sa production par rapport au potentiel du génotype. Un manque d'eau précoce affecte principalement la croissance des racines, le développement des feuilles et des organes reproducteurs (Sahraoui 2011). Ceci se répercute sur le rendement économique de la culture, qui peut baisser de plus de 80% (Sahraoui 2011).

4 .La résistance et la tolérance aux stress biotique et abiotique

La résistance des plantes aux stress biotiques et abiotiques est un caractère multigénique qui dépend de la combinaison d'un grand ensemble de gènes, de protéines et de voies métaboliques qui agissent de concert. Les changements (tant qualitatifs que quantitatifs) au niveau des protéines en réponse aux stress, permettent une modulation des voies métaboliques et donc une meilleure protection de l'organisme. Ces éléments démontrent que les plantes ont développé des mécanismes cellulaires de réponse aux stress particulièrement flexibles qui leur permettent de s'adapter efficacement à ces stress.

La tolérance des plantes aux stress peut être aussi acquise par une combinaison de diverses approches expérimentales : l'ingénierie génétique la sélection / reproduction l'utilisation de marqueurs génétiques le repérage de loci de caractères quantitatifs (QTL - "quantitative trait loci") accumulation des protéines ; HSP : heat shock proteins LEA late embryogenesis abundant

5. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique

Pour lutter contre le manque d'eau, les plantes développent plusieurs stratégies adaptatives qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu (esquive, évitement et tolérance) (Turner, 1986). La résistance d'une plante à une contrainte hydrique peut être définie, du point de vue physiologique, par sa capacité à survivre et à s'accroître et du point de vue agronomique, par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles (Madhava Rao et al., 2006). La résistance globale d'une plante au stress hydrique apparaît comme le résultat de nombreuses modifications phénologiques, anatomiques, morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui interagissent pour permettre le maintien de la croissance, du développement et de production (Hsissou, 1994).

Adaptation phénologique

Pour éviter les périodes difficiles pour la croissance et le développement, certaines variétés accomplissent leur cycle de développement avant l'installation de stress hydrique. La précocité constitue donc un important mécanisme d'évitement au stress hydrique de fin de cycle (**Ben Naceur et al., 1999**). Dans ces conditions, les paramètres phénologiques d'adaptation ou paramètres de précocité définissent le calage du cycle vis-à-vis des contraintes environnementales (**Ben Naceur et al., 1999**). La précocité assure une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau. En effet, en produisant la biomasse la plus élevée, les génotypes à croissance rapide et à maturité précoce utilisent mieux l'eau disponible et ils sont moins exposés aux stress environnementaux que les génotypes tardifs (Bajji, 1999). Le rendement en grains est positivement corrélé à la précocité d'épiaison (**Gonzalez et al.1999**). En effet, les variétés qui ont une vitesse de croissance élevée ont la capacité de mieux utiliser les sources nutritives à la fin du cycle de développement lorsque celles-ci deviennent limitantes (**Poorter, 1989**). La précocité à l'épiaison peut donc être utilisée comme critère de sélection pour améliorer la production dans les zones sèches. C'est l'un des traits les plus importants dans l'adaptation des plantes au stress hydrique (**Ben Salem et al., 1997**).

5.2. Adaptation morphologique

L'effet du stress hydrique peut se traduire, selon la stratégie adaptative de chaque espèce ou génotype, par des modifications morphologiques pour augmenter l'absorption d'eau et pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes pour les assimilés. Ces modifications affectent la partie aérienne ou souterraine (**Bajji, 1999**).

5.3. Au niveau de la plante

La diminution de la surface foliaire des feuilles et du nombre de talles est considérée comme une réponse ou adaptation au manque d'eau (**Blum, 1996**). Chez le blé, l'enroulement des feuilles chez certaines variétés peut être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation, il entraîne une diminution de 40 à 60 % de la transpiration (**Amokrane et al., 2002**). La longueur des barbes est un paramètre morphologique qui semble également étroitement lié à la tolérance au stress hydrique (**Hadjichristodoulou, 1985**). La hauteur de la plante apparaît comme un critère de sélection important particulièrement dans les zones arides, ceci s'expliquerait par le fait qu'une paille haute s'accompagne souvent d'un système racinaire profond ce qui conférerait à la

plante une capacité d'extraction de l'eau supérieure (**Bagga et al., 1970**). Les plantes à enracinement superficielle et peu dense souffrent plus du déficit hydrique que ceux à enracinement profond (**El hassani et Persoons, 1994**).

5.4. Au niveau structurel

Une des principales modifications structurelles observées sur des plantes ayant subi un stress hydrique, concerne l'altération des propriétés physico-chimiques des parois cellulaires (**Dixon et Paiva, 1995**). Ces changements peuvent être induits par des modifications au niveau des enzymes impliquées dans la biosynthèse des monolignols ou dans leur assemblage dans la paroi. L'augmentation de l'expression de ces gènes peut être reliée à l'arrêt de la croissance et à l'épaississement de la paroi (Dixon et Paiva, 1995). Un autre composant majeur de la paroi correspond aux composés issus de la polymérisation des sucres (cellulose et hémicellulose). (**Xu et al,1996**) ont mis en évidence des modifications au niveau de l'hémicellulose via, notamment, la modulation de l'expression d'une famille multigénique appelée XET (xyloglucaneendo-trans-glucanase). Les XET effectuent des coupures internes dans les polymères de xyloglucanes, pour ensuite lier les fragments générés à d'autres chaînes de xyloglucanes (**Xu et al., 1996**). Braam et al., (1997) ont proposé l'idée qu'à l'instar des gènes impliqués dans la lignification, les XET pourraient intervenir dans l'altération des propriétés (exemple : extensibilité) de la paroi lors des stress abiotiques et notamment hydriques.

5.5 Adaptation physiologique

5.5.1. La capacité photosynthétique

La cinétique de la fluorescence chlorophyllienne est utilisée pour étudier les effets des stress abiotiques sur le rendement de la photosynthèse et principalement sur l'activité des photosystèmes PSII (**Krause et Weis, 1991**). **Djekoun et Planchon, (1991)** ont confirmé l'intérêt des mesures in vivo de la fluorescence chlorophyllienne pour l'étude de l'adaptation des plantes cultivées aux contraintes de l'environnement.

Les investigations basées sur des évaluations de la fluorescence chlorophyllienne ont prouvé que le PSII est tout à fait résistant au stress hydrique. Une grande partie du stress hydrique a été attribuée pour diriger les effets de la déshydratation sur les réactions biochimiques de la photosynthèse (**Heitholt et al., 1991**). Pendant que les teneurs en eau des feuilles diminuent, une diminution d'efficacité photochimique de PSII et du transport

d'électron se produit (Giardi et al., 1996). Ceci peut être dû aux dommages des centres de réaction de PSII, mais peut également être provoqué par la diminution de la capacité de transport d'électron de PSII (Osmond, 1994). La majeure partie de la variation de l'utilisation d'énergie pour la photochimie pendant un stress hydrique peut être expliquée en termes de variation de l'efficacité de la capture d'électron par les centres ouverts de PSII (Cornic et Fresneau, 2002). Ykhlef et Djekoun, (2000) suggèrent que la survie des plantes au manque d'eau est en partie dû à l'entretien de la capacité photosynthétique des feuilles, permettant le rétablissement rapide des plantes suite à une période de stress hydrique.

5.5.2. La teneur en chlorophylle

Sous un stress hydrique, une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur (Bousba et al., 2009). Pour limiter les pertes en eau par évaporation et aussi l'augmentation de la résistance à l'entrée du CO₂ atmosphérique nécessaire à la photosynthèse, l'économie de l'eau se traduit par une turgescence relative moins affectée par le stress conduisant à une dilution de la chlorophylle (Slayter, 1974). Le rapport chlorophylle (a/b) est un bon indicateur du seuil de tolérance au stress hydrique (Guettouche, 1990). Tahri et al., , entre les teneurs en proline accumulées et les teneurs en pigments chlorophylliens perdues. Ainsi la variété qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte diminution de ses teneurs en pigments (1997) montrent que l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress suivie par un abaissement dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a et b). Les résultats de Tahri et al., (1997) révèlent une certaine proportionnalité, mais inverse chlorophylliens et vice versa (Tahri et al., 1997).

5.5.3. La régulation stomatique

La réduction de la perte en eau par la fermeture stomatique est un moyen d'adaptation des plantes au stress hydrique (Djekoun et Planchon, 1992). Cette diminution de la transpiration peut engendrer une réduction de la photosynthèse. Ainsi, les génotypes qui ont la capacité photosynthétique intrinsèque la moins affectée par le stress hydrique présentent une efficacité de l'utilisation de l'eau (photosynthèse/transpiration) plus élevée et une plus grande capacité de survie (Ykhlef, 2001).

L'augmentation du nombre de stomates par unité de surface pourrait être un des facteurs de résistance au stress hydrique chez les céréales si elle est accompagnée par une bonne activité physiologique (Slama, 2002). L'accroissement de la densité stomatique peut

augmenter l'assimilation nette du CO₂ et diminuer la perte en eau. En effet, un nombre élevé de stomates peut engendrer des stomates de petite taille et à fermeture rapide (**Djekoun et Ykhlef, 1996**). **Erchidi et al., (2000)** qui ont constaté que les variétés ayant **Mécanisme d'adaptation biochimique en condition de stress hydrique**: Accumulation de la proline en condition de stress hydrique Parmi les acides aminés pouvant être accumulés, la proline représente des manifestations les plus remarquables des stress hydriques et osmotiques. **Singh et al., (1973)** proposent d'utiliser la proline comme critère de sélection pour la tolérance au stress chez l'orge. La proline est l'un des solutés compatibles le plus fréquemment accumulé en réponse à des contraintes environnementales variées et joue un rôle important dans la tolérance des plantes (**Ben Rejeb et al., 2012**). L'accumulation de proline est l'une des stratégies adaptatives fréquemment observées chez les plantes pour limiter les effets du stress hydrique. Elle est liée à l'osmorégulation cytoplasmique (**Acevedo et al, 1989**). Selon **Tahri et al., (1997)** l'accumulation de la proline, induite par les stress, peut être le résultat de trois processus complémentaires: stimulation de sa synthèse, inhibition de son oxydation et/ou altération de la biosynthèse des protéines. La proline est synthétisée selon deux voies distinctes, via le glutamate et l'ornithine (**Neffar, 2013**). La chaîne de réaction commence par la réduction du glutamate en glutamyl-5-semialdéhyde. Ce composé se cyclise spontanément et forme l'acide pyrroline-5-carboxylique qui est réduit ensuite en proline.

La proline peut être issue aussi de l'ornithine, précurseur de l'acide pyrroline-2-carboxylique, transformé ensuite en proline (**Jean-François et Morot-Gaudry, 1997**). Son accumulation dans les feuilles de plantes qui souffrent d'un manque d'eau a été décrite très anciennement (**Cornic, 2008**). On pense que l'accumulation se fait dans le cytoplasme où sa concentration atteint parfois 230 à 250 mm. Elle peut à cette concentration participer effectivement à l'ajustement osmotique de la plante (**Samars et al., 1995**).

6. Contrainte biotique

Comme toutes les autres plantes cultivées par l'homme, le blé à paille peut être attaqué par un grand nombre des organismes parasites macroscopiques et microscopiques. Les maladies se manifestent successivement au cours de développement de la plante. Il existe plusieurs contraintes pour la céréaliculture des stress biotiques et abiotiques (**Benbelkacem 2000**).

La forte présence de bios agresseurs peu affecté jusqu'à 30% des rendements. Et s'aggravent en raison des changements climatiques que connaît notre planète. Dépendant des

Chapitre 02 : Contraintes Abiotiques et biotiques et leurs effets sur le blé

conditions d'humidité, de température ainsi que de la présence des pathogènes, plusieurs maladies cryptogamiques attaquent les blés et provoquent ainsi différents dégâts

Dix années d'enquêtes et de recherche sur les maladies des céréales ont résulté en un capital de données fiables. C'est ainsi que sur les blés, les maladies les plus importants ont été : la Septoriose, la Rouille, sans oublier les fusarioses qui produisent les mycotoxines (**Moreau 2011**).

De plus, les stress biotiques sont ceux causés par les organismes pathogènes. Les champignons sont les plus répandus et les plus dommageables pathogènes des cultures cultivées (**Ezzahiri, 2001 ; Zahri et al., 2014**).

Les champignons peuvent occasionner des pertes importantes lorsque les variétés utilisées sont sensibles et les conditions de l'environnement sont favorables à l'expansion des maladies (**Ezzahiri, 2001**).

Les maladies qui s'attaquent au blé sont dues à plusieurs types de pathogènes à savoir les champignons, bactéries, virus, nématodes. Les principales maladies fongiques répandues dans le monde et en Algérie sont regroupées dans le tableau ci dessous (**Sayoud et al., 1999**).

Tableau 6 : Les principales maladies fongiques du blé

Nom de la maladie	L'agent causal
Rouille jaune	<i>Puccinia striiformis</i>
Rouille noire	<i>Puccinia graminis f.sp.tritici</i>
Rouille brune	<i>Puccinia triticina</i>
Oïdium	<i>Erysiphe graminis f.sp.tritici</i>
Tache helminthosporienne	<i>Pyrenophora tritici-repentis</i>
Caries	<i>Tilletia caries et Tilletia foetida</i>
Charbon foliaire	<i>Urocystis agropyri</i>
Charbon nu	<i>Ustilago tritici</i>
Pourriture racinaire	<i>Cochliobolus sativus</i>
	<i>Fusarium culmorum</i>
	<i>Fusarium graminearum</i>
	<i>Fusarium avenaceum</i>
Septoriose	<i>Septoria nodorum ou Stagnospora nodorum</i>
	<i>Septoria tritici ou Mycosphaerella graminico</i>

Source : (**Sayoud et al., 1999**).

Selon **Aouali et Douici-Khalfi (2009)**, Les maladies des céréales peuvent être regroupées selon les symptômes qu'elles induisent et les parties qu'elles affectent. De ce fait, on distingue :

- Maladies causant des symptômes localisés sur feuillage.
- Maladies causant des pourritures racinaires.
- Maladies causant des symptômes sur les épis.

Maladies sur feuillage

Les rouilles

La rouille brune

Les symptômes causés par *Puccinia recondita f.sp. tritici* se caractérisent par petites pustules circulaires ou ovales de couleur orange ou brune (urédospores), apparaissent sur la face supérieure des feuilles (**Lamari et al., 1991 ; Sayoud et al., 1999 ; Ezzahiri, 2001**) et parfois sur la face inférieure des feuilles. En fin de saison, ces pustules prennent une couleur noire (téleutospores) (**Aouali et Douici-Khalfi, 2009 ; Ezzahiri, 2001**).

Selon **Mohamed Jlibene (2011)**, les dégâts causés par cette maladie varient selon le niveau de résistance des variétés, de 5 à 40 %. Les variétés sahariennes au Maroc sont sévèrement affectées par des pertes qui peuvent aller jusque 100 % et, **selon Belaid (1996)**, la rouille brune est celle qui provoque le moins de dégâts en Algérie. Les variétés italiennes y sont sensibles. L'hôte alternatif, *Anchusa azurea* anciennement appelé *Anchusa italica* ou Buglosse d'Italie ou fausse bourrache (**Aouali et Douici-Khalfi, 2009**).

La rouille jaune

Les symptômes de *Puccinia striiformis* se traduisent par des pustules de forme globuleuse et de couleur jaune ou orange, disposées en stries le long des nervures des feuilles d'où le nom de l'espèce. Elles peuvent aussi se développer sur la face inférieure des feuilles sur les épis et les grains (**Aouali et Douici-Khalfi, 2009 ; Ezzahiri, 2001 ; Jlibene, 2011**).

Elles peuvent engendrer des pertes de rendement pouvant atteindre 75 %. Selon **Belaid, 1996**, l'aire de dispersion de la rouille jaune correspond aux zones littorales humides et tempérées. Les variétés Florence-Aurore et Sonora sont les plus sensibles.

Cette maladie bien connue depuis 2004 par nos agriculteurs, elle est présente chaque année à des degrés variés. Elle est prévalant dans les régions froides comme les hauts plateaux (**Anonyme, 2007**).

La rouille noire

Les symptômes de *Puccinia graminis* f.sp. *tritici* se manifestent par des pustules plus longues que celles de la rouille brune, elles sont de couleur rouge-brique à marron foncé. Elles se développent sur les feuilles, les tiges et les épis (Aouali et Douici-Khalfi, 2009 ; Ezzahiri, 2001). Selon Belaid (1996), la rouille noire est favorisée par l'eau et la chaleur. Variétés Mahons sont sensibles à la rouille noire, de même que Hedba3 et Bidi 17. Les blés à courte paille tels que *Strampelli Inia*, *Siete-Cerros* et *Saba* sont résistants à cette maladie. L'hôte alternatif est *Berberis vulgaris* (Aouali et Douici-Khalfi, 2009).

Les cycles des rouilles sont complexes et impliquent souvent un hôte principal et un hôte alternatif, seule la rouille jaune ne connaît pas d'hôtes alternatifs. Le développement des épidémies des rouilles est tributaire de la nature et de la qualité de l'inoculum primaire, de la sensibilité de la variété cultivée, du stade de développement du blé au moment de l'infection primaire et des conditions climatiques (Aouali et Douici-Khalfi, 2009).

Ces mêmes auteurs signalent que la rouille jaune est plus conditionnée par le milieu que les autres espèces de rouille, et nécessite des températures plus basses. En absence d'hôtes alternatifs, l'agent pathogène doit se conserver sous forme de cycles végétatifs (urédospores). Les premières attaques de cette maladie se présentent souvent sous forme de foyers localisés. Les urédospores sont très sensibles aux rayons UV, ce qui réduit leur viabilité en temps clair. En temps couvert, la dissémination est très efficace. Les infections se font dans des journées caractérisées par une température moyenne supérieure à 4°C et des températures nocturnes entre 10 et 15°C avec une humidité relativement supérieure à 18 % pendant au moins 18 heures.

6. 1.2. Les septorioses

Deux espèces de septoriose s'attaquent au blé, à savoir la tache septorienne et la septoriose des feuilles et des épis (Belaid, 1996 ; Ezzahiri, 2001 ; Aouali et Douici-Khalfi, 2009 ; Jlibene, 2011). Le pathogène *Septoria tritici*, responsable de la septoriose des feuilles, connue sous le nom de la tache septorienne, et *Septoria nodorum* responsable de septoriose des feuilles et des épis. Les attaques sont surtout observées dans les zones humides. C'est surtout la septoriose des feuilles qui est la plus abondante sur les blés (Ezzahiri, 2001 ; Zahri et al., 2014 ; Aouali et Douici-Khalfi, 2009 ; Jlibene, 2011). Les pertes de rendement peuvent aller jusqu'à 40 % (Ezzahiri, 2001).

6. 1.2.1 La tache septorienne

Les symptômes de *Septoria tritici* commencent par de petites taches de couleur brune rougeâtre irrégulières sur les feuilles inférieures et en particulier sur celles en contact du sol.

Les taches sont d'abord délimitées par les nervures pour ensuite s'étendre longitudinalement de 5 à 15 mm et prendre une couleur grise claire (Ezzahiri, 2001 ; Michel, 2002 ; Aouali et Douici-Khalfi, 2009). Après l'apparition des nécroses sur les feuillages, on observe des ponctuations noires alignées parallèlement qu'on appelle pycnides (Ezzahiri, 2001 ; Aouali et Douici-Khalfi, 2009).

Cette maladie est la deuxième maladie la plus répandue en Algérie après la tache auréolée. Elle est beaucoup plus importante dans les zones littorales. Elle a eu un impact important en 2006, aussi bien sur les blés durs que sur les blés tendres dans les wilayas de Skikda, Annaba, Constantine et Guelma (Anonyme, 2007).

6. 1.2.2. Septoriose des feuilles et épis

Les symptômes de *Septoria nodorum* se manifestent sur le feuillage et sur les glumes, la gaine des feuilles et les noeuds. Sur les feuilles, on peut observer des taches ovales ou lenticulaires brunes, elles peuvent être entourées d'une chlorose ou d'un jaunissement périphérique. Lorsqu'elles sont abondantes, elles se rejoignent et forment de grandes plages nécrotiques. Les pycnides sont de couleur brune claire moins apparente que celles provoquées par la septoriose des feuilles (Ezzahiri, 2001 ; Aouali et Douici-Khalfi, 2009). Plus tard, ces pycnides virent au gris foncé, et à ce moment là, leur distinction de celles de *Septoria tritici* devient moins apparente et seul un examen microscopique les différencierait. Sur les glumes, la maladie se développe lorsque l'attaque est importante. Les symptômes se manifestent par de petites taches grises qui vont disparaître et présentent des colorations brunes ou des symptômes d'échaudage (Ezzahiri, 2001). Les variétés mexicaines sont sensibles à cette maladie (Belaid, 1996).

Pour la tache septorienne, les chaumes du précédent cultural constituent la source principale de l'inoculum. Les pycnides du champignon peuvent survivre sur les chaumes du blé jusqu'à 6 mois et induire les premières infections sur les jeunes plantules de blé précisément sur les premières feuilles en contact du sol. En présence d'eau libre, les pycnides gonflent et produisent une gelée sporifère „cirrhe“ incolore qui protège les pycnidiospores en conditions défavorables. Après germination le champignon colonise le tissu foliaire.

L'humidité est indispensable pour tous les stades de l'infection (Ezzahiri, 2001).

6. 1.2.3. Helminthosporioses

La tache helminthosporienne est une grave maladie foliaire du blé causée par le champignon *Pyrenophora tritici-repentis* (Died) Drechs (Lamari et al., 1991, Sayoud et al., 1999 ; Lamari et al., 2005). Communément désignée par l'appellation anglo-saxonne „Tan Spot“, la maladie de la tache bronzée ou maladie de la tache jaune (Sayoud et al., 1999). Huit

racés de *P. tritici-repentis* ont été identifiées à ce jour, en se basant sur leur capacité à provoquer la nécrose ou la chlorose dans un groupe d'hôtes différentiels chez le blé (**Benslimane et al., 2011 ; Aboukhaddour et al., 2013**).

Cette maladie s'attaque principalement au blé. Elle est répandue partout au Maroc avec des attaques importantes au Nord du pays (Saoud, 1994). En Algérie et en Tunisie, cette maladie est surtout répandue dans les zones du Nord. Dans des prospections réalisées durant quatre années consécutives en zones favorable et défavorable au **Maroc, Nassrellah et Mergoum (1994)** ont constaté que la tache helminthosporienne est la première maladie foliaire du blé dur.

L'agent pathogène se conserve sous forme de spores et de mycélium sur les résidus du blé infecté à la surface du sol. Sur les chaumes, les périthèces structures de reproduction sexuée et le mycélium constituent la principale source d'inoculum primaire. En présence d'humidité, les périthèces libèrent les ascospores et le mycélium produit des conidies. Les deux types de spores sont disséminés pour initier l'infection primaire sur les plantules de blé en début de saison. Au cours de la saison, l'infection secondaire est assurée par les conidies qui sont facilement disséminées par le vent. La germination des conidies et l'infection des tissus sont favorisées par une durée d'humectation du feuillage de 24 à 48h. Les températures optimales pour l'infection se situent entre 18 et 28 °C. La sporulation au niveau des taches foliaires est favorisée par des conditions humides (**Ezzahiri, 2001; Aouali et Douici-Khalfi, 2009**).

6. 1.3 Oïdium

Toutes les céréales peuvent être attaquées par l'oïdium. Plusieurs formes de la maladie sont cependant spécifiques à des cultures précises, et ne provoquent pas d'infections croisées (**Anonyme a, 2014**).

Les premiers symptômes d'*Erysiphe graminis f.sp.tritici* apparaissent sous forme d'un duvet blanchâtre ou gris pâle sur les limbes des feuilles basales, puis se développent sur les feuilles des étages supérieurs (**Ezzahiri, 2001 ; Anonyme, 2008 ; Aouali et Douici-Khalfi,2009**). En cas d'attaque sévère les taches apparaissent aussi sur les gaines des feuilles et les glumes des épis (**Ezzahiri, 2001 ; Aouali et Douici-Khalfi, 2009**).

Cette maladie du blé hiverne essentiellement sous forme de mycélium sur les repousses de céréales et les cultures à semis automnal. Les cléistothèces produits en fin d'été résistent aux faibles températures et à la sécheresse (**Anonyme a, 2014**).

En présence d'une forte hygrométrie, les cléistothèces libèrent les ascospores produites par voie sexuée, qui peuvent alors provoquer des infections automnales. On estime par

ailleurs que les cléistothèces ont une importance secondaire pour le mycélium (Anonyme a, 2014). Au printemps, avec les montées de température, le mycélium en dormance commence à se développer, et des spores sont rapidement produites. Leur germination se produit dans une large fourchette de températures (5 °C à 30 °C), même si 15 °C, elle reste la température optimale, avec un taux d'humidité relativement supérieur à 95 %. L'eau libre inhibe la germination des spores. Dans des conditions de sécheresse, des spores fraîches peuvent se former au bout de sept jours (Anonyme a, 2014).

À la fin de la saison, les repousses de céréales et les cultures à semis automnal précoce peuvent à leur tour être contaminées, constituant ainsi l'inoculum pour la culture suivante (Anonyme a, 2014).

Les parcelles de blé d'hiver à semis tardif sont souvent particulièrement sensibles aux attaques de l'oïdium, notamment lorsque les cultures se développent rapidement au printemps (Anonyme a, 2014).

Chapitre 03 :

Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

1. Qu'est- ce que la génomique ?

La génomique est une branche de la biologie qui porte sur l'étude du génome, support moléculaire des caractères héréditaires des êtres vivants. La génomique apporte des outils nouveaux pour étudier la biodiversité des plantes, et pour constituer des ressources génétiques organisées et exploitables, une étape essentielle au travail d'amélioration génétique (Caboche, 2008). La génomique donne l'occasion de comprendre, de manière générale, les causes de la diversité et la fonction des organismes vivants, comme les plantes.

La génomique végétale est décrite comme l'étude et l'amélioration des nouvelles variétés végétales grâce à l'examen du génome entier des espèces végétales et au séquençage des nucléotides afin de trouver les gènes qui en font partie. La génomique fournit des renseignements précieux pouvant contribuer à la découverte de nouveaux gènes qui permettront d'accroître le rendement agricole, de comprendre la variabilité génétique et de déterminer les marqueurs génétiques rendant possible l'amélioration des cultures grâce à une sélection prédictive plus ciblée, rapide et efficace. La génomique comprend deux volets complémentaires : la caractérisation de la nature physique du génome complet (la génomique structurale) et la caractérisation des profils d'expression des gènes (la génomique fonctionnelle). Ces deux approches sont essentielles pour la cartographie, la caractérisation fine d'un locus à intérêt économique (ETL) et pour l'identification du ou des gènes contrôlant le caractère étudié. Il est à souligner que la ressource de base pour l'identification d'un ETL dans un génome est constituée de populations "ressources" avec des données phénotypiques fiables et des échantillons d'ADN génomiques correspondants (Sonstegard *et al.*, 2001). Une meilleure connaissance au niveau moléculaire des gènes impliqués dans la résistance/sensibilité aux stress abiotiques devrait aider au développement de nouvelles variétés mieux adaptées aux contraintes environnementales. Par ailleurs, l'adaptation des plantes aux différents stress abiotiques est un phénomène complexe, impliquant directement ou indirectement de nombreux gènes dans les chaînes de perception et de transduction des signaux ainsi que dans les mécanismes de régulation de l'expression d'autres gènes.

2. La génomique et l'amélioration du blé

Les progrès de la génomique et de la post-génomique interviennent à plusieurs niveaux:

- ❖ **le marquage moléculaire** permet de repérer les régions chromosomiques contenant des gènes d'intérêt. Il est utilisé dans la sélection assistée par marqueurs, qui permet d'exploiter la diversité naturelle.
- ❖ **l'analyse de l'expression des gènes** : la transcriptomique et la protéomique permettent de repérer les gènes régulés par la sécheresse. Cette connaissance peut être ensuite utilisée dans l'utilisation de la variabilité naturelle ou dans l'amélioration par transgénèse.
- ❖ **la transgénèse** permet la modification de l'expression d'un ou de plusieurs gènes.

Génome du blé

Le génome du blé contient 16 milliards de bases (**Feillet, 2000**). Si l'on accepte d'assimiler les bases du code génétique à des lettres et le génome à un livre, le génome du blé formerait une bibliothèque d'environ 5000 livres de 1000 pages chacun.

Un gène peut exister sous différentes formes et coder des protéines différentes: on parle d'allèles. L'emplacement d'un gène sur un chromosome est un locus. Il arrive que plusieurs gènes soient très proches les uns des autres et soient, de ce fait, transmis ensemble de génération en génération (**feillet, 2000**).

Dans les années 80, les travaux de Payne et ses collaborateurs ont largement contribué à la connaissance biochimique et génétique des SG-HPM. De plus l'existence de lignées aneuploïdes d'une variété d'origine chinoise : **Chinese Spring** ont permis à **Orth et Bushuk(1974) et Bushuk(1974) et Bietz et al. (1975)** de localiser les gènes des SG-HPM de ce cultivar.

L'amélioration du blé dur

L'amélioration des plantes est basée sur une large utilisation de la variabilité génétique naturelle et sur des méthodes d'exploitation rapides et fiables de cette diversité dans les programmes de sélection.

La sélection a joué un rôle déterminant dans l'accroissement de la production agricole au cours du siècle dernier, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Les sélectionneurs de blé dur mettent l'accent sur l'amélioration simultanée du comportement agronomique, de la résistance aux contraintes environnementales et aux maladies.

Apport des marqueurs moléculaires à l'amélioration du blé

L'essor des techniques de marquage moléculaires au cours des dernières années a induit des changements considérables dans plusieurs branches de la biotechnologie, notamment la

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

biologie moléculaire (clonage positionnel), la génétique évolutive (cartographie comparative), la génétique quantitative (détection et identification des locus contrôlant les caractères quantitatifs -QTL-) et l'amélioration des espèces (sélection assistée par marqueurs) (Najimi et al. 2003).

Le recours à la génétique moléculaire et l'obtention de marqueurs moléculaires pour les blés comme c'est le cas du maïs et du riz, a été toujours limité par la large taille du génome. Cependant, avec le développement de la génomique et des approches moléculaires associées au phénotypage, on s'attend à percer plus efficacement les gènes et les voies métaboliques de tolérance à la sécheresse chez les plantes et notamment chez le blé dur.

Plusieurs QTL et gènes impliqués dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse chez plusieurs espèces de blés ont été identifiés. La génomique, les cartographies de QTL, les études des gènes candidats, la transcriptomique ont permis durant les vingt dernières années l'identification de plusieurs gènes impliqués dans la tolérance à la sécheresse ainsi que la compréhension des mécanismes moléculaire de la tolérance (**Mir et al. 2012**).

Les marqueurs moléculaires permettent à la fois un diagnostic extrêmement fin de la variabilité et la mise en place de stratégies très rapides de création et sélection variétale (**Adam et Dron 1993**). Ces marqueurs présentent également différents avantages comparés aux marqueurs morphologiques et protéiques, très nombreux, neutres vis à vis de la sélection, couvrent le génome entier, indépendants de la partie de la plante prélevée, du stade de développement et des fluctuations environnementales (**FAO 1996**).

En effet, le sélectionneur peut inférer la présence d'un gène par la recherche du marqueur qui lui est étroitement lié et pourra ainsi sélectionner les individus résistants avant même que le caractère considéré ne soit exprimé et en absence du pathogène.

Cette sélection assistée par marqueurs est donc d'un intérêt certain pour le sélectionneur puisqu'elle offre l'avantage d'une sélection efficace, rapide et précoce, et devient alors un complément nécessaire aux méthodes traditionnelles d'amélioration génétique des céréales.

En outre, les marqueurs moléculaires deviennent aujourd'hui un outil essentiel d'amélioration des plantes et ouvrent de nouvelles perspectives pour le sélectionneur. Ils sont d'un grand intérêt lors du pyramidage de deux gènes ou plus dans une même variété permettant ainsi une résistance plus constante et à large spectre.

De même, les marqueurs moléculaires permettent le cumul rapidement de plusieurs gènes dans une seule variété élite en vue d'une résistance plus efficace, et la maîtrise de la taille des fragments chromosomiques introduits par rétrocroisements, ce qui élimine les effets défavorables susceptibles d'être transmis avec les gènes cibles introgressés (**Hospital 2001**).

3. Utilisation des marqueurs pour l'amélioration de blé dur

Définition de marqueur moléculaire :

Un marqueur moléculaire est un locus polymorphe qui renseigne sur le génotype de l'individu qui le porte. Un marqueur doit être à hérédité simple, multi allélique et Co-dominant.

Les marqueurs moléculaires correspondent donc au polymorphisme révélé au niveau de l'ADN. L'analyse de ce polymorphisme par les techniques de biologie moléculaire s'adresse à l'ensemble du génome, qu'il soit ou non traduit en protéine, et est indépendant des conditions de l'environnement (**Langridge et al., 2001**). En outre, le nombre de marqueur observables est théoriquement illimité et le génotype d'une plante peut être déterminé à un stade très précoce, aussitôt que le matériel est disponible pour l'extraction de l'ADN (**Eagles et al., 2001**). Ces marqueur seront d'une grande importance dans l'amélioration des cultures à valeur agronomique et dans les programmes de sélection assistée par marqueur chez les céréales (**Dekkers, Hospital, 2002**).

Présentation d'un bon marqueur

Selon De vienne (1999) un marqueur génétique "idéal" est:

- **Polymorphe** : la matière première du généticien est la variabilité,
- **Multi-allélique** : c'est-à-dire possédant plusieurs allèles (donc des séquences d'ADN différentes) sur un même locus (**plomion, 2003**)
- **Co-dominant** : l'hétérozygote présente simultanément les caractères des deux parents homozygotes, il peut être distingué de chacun des homozygotes parentaux.
- **Non épistatique** : son génotype peut être "lu" à partir de son phénotype quel que soit le génotype aux autre locus. La codominance et la non épistasie peuvent être respectivement définies comme l'absence d'interaction intra et inter locus.
- **Neutre** : les substitutions alléliques au locus marqueur n'ont pas d'autre effets phénotypiques (et donc éventuellement sélectifs) que ceux qui permettent de déterminer son génotype. Dans leur très grande majorité les polymorphismes moléculaires sont neutres.
- **Insensible au milieu** : le génotype peut être inféré à partir du phénotype quel que soit le milieu.

Les principaux types de marqueurs génétiques utilisés

Les marqueurs sont classés en différentes catégories en fonction des molécules utilisées pour révéler le polymorphisme. Les marqueurs largement utilisée à ces jours concernent directement l'information portée par Les acides nucléique ou les produits de la traduction des

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

gènes. De nombreux autres distinguent les marqueurs biochimiques, issue de l'expression des gènes, y compris les produits du métabolisme secondaire et les marqueurs moléculaires, directement issus du polymorphisme existant au niveau de l'ADN. Le terme marqueurs génétiques regroupe les marqueurs Morphologique, Biochimique et Moléculaire.

Marqueurs morphologiques

Les caractères morphologiques ont été les premiers marqueurs génétiques utilisés. Ils représentent des variations de type qualitatif (couleur...), morphologique, des résistances à des maladies ou des ravageurs. Ces marqueurs sont le souvent dominants.

Marqueurs biochimiques

Les séquences exprimées du génome codent des protéines dont une partie assurent les réactions enzymatiques des métabolites. Les allèles d'un même locus codent des protéines qui peuvent présenter des différences de séquences et éventuellement d'activité. La quantité d'une substance peut ainsi révéler des variations des enzymes responsables de son accumulation (Woff *et al.*, 1997).

Produit et métabolisme secondaires :

Les produits et les métabolites secondaires sont utilisés comme marqueurs génériques, dès lors que la voie de biosynthèse de ses métabolites est bien connue (Muler- Starck *et al.*, 1992).

3.3.2.2- Isoenzymes

Les isoenzymes (ou isoformes) sont différentes formes d'une enzyme d'une fonction donnée définie par le substrat et le produit de la réaction. Le terme isoforme est couramment utilisé par les physiologistes et biochimistes.

3.3.2.3. Protéines totales

Les protéines totales consistent en un mélange complexe des protéines extractibles présentes au moment du prélèvement dans les tissus analysés. Les protéines sont dénaturées afin de séparer les différentes chaînes polypeptidiques les constituant. La séparation par électrophorèse des polypeptides peut être conduite selon deux critères indépendants : la masse, ou le point isoélectrique. (Gay *et al.*, 1986)

Les différents types de marqueurs moléculaires :

De nombreuses techniques de marquage moléculaire sont aujourd'hui disponibles, et de nouvelles sont régulièrement publiées (Gupta *et al.*, 2001 ; Langridge *et al.*, 2001 ; Rafalski, 2002a, b).

Les marqueurs moléculaires proviennent du polymorphisme détecté au niveau des molécules d'ADN nucléaire, chloroplastique et mitochondrial. Ils sont d'un coût souvent plus

élevé que les marqueurs biochimique comme les isoenzymes ou les terpènes mais ils permettent une inférence génétique plus précise basée sur un échantillon beaucoup plus large de locus (**Karp et al ; De vienne, 1998**).

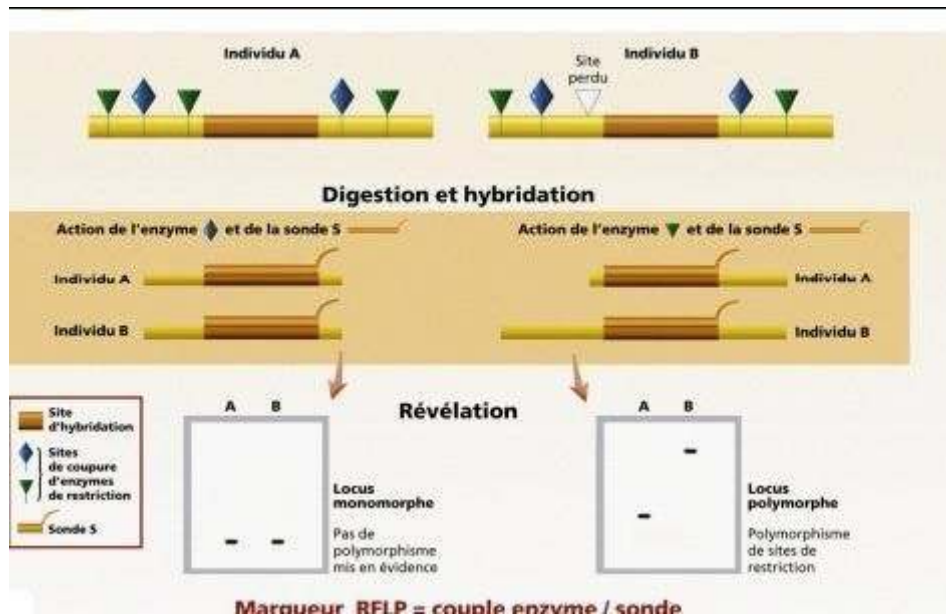
Ces méthodes peuvent être regroupées en deux grandes catégories : les marqueurs de type RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphisme) et les marqueurs basés sur la méthode de PCR (Polymérase Chain Réaction). Le choix du système de marquage dépend de l'objectif précis fixé, des moyens et des compétences disponibles au laboratoire. (**Gupta et al., 1999 ; Santoni et al., Langridge et al.,2001**).

Marqueur RFLP

La technique RFLP développée par **Botstein et al., (1985)** repose sur la mise en évidence de la variabilité de la séquence nucléotidique de l'ADN génomique après digestion par des enzymes de restriction. Une multitude de fragments d'ADN de tailles variables est générée par digestion enzymatique, puis séparée sur gel d'agarose et transférée par capillarité sous forme dénaturée sur une membrane de nylon.

Cette membrane est mise en contact avec une solution contenant un fragment d'ADN ou sonde qui permet de repérer, par hybridation moléculaire, des fragments d'ADN génomique qui lui sont homologues. La différence entre deux génotypes est révélée par autoradiographie si la sonde est marquée par la phosphore radioactif ou par réaction colorée si elle est associée à un conjugué enzymatique.

Le polymorphisme détecté est dû à des mutations au niveau des sites de restriction de l'enzyme (polymorphisme de site de restriction) et/ou à des délétions /insertion d'un fragment d'ADN au voisinage de la zone génomique reconnue par la sonde. C'est le couple enzyme/sonde qui constitue le marqueur (Figure.13).



<http://www.gnis-pedagogique.org/index>

Figure 13 : polymorphisme de longueur des fragments d'amplification(RFLP).

Marqueur de type PCR

Le développement de la technique PCR offre l'avantage d'analyser les marqueurs moléculaires en un temps court tout en utilisant des concentrations faibles d'ADN. Les marqueurs basés sur la technique PCR tendent à remplacer les systèmes classiques (les marqueurs morphologiques, iso-enzymatique et RFLP) et deviennent très nombreux. Les plus largement utilisés chez le blé sont les microsatellites ou SSR (Simple Sequence Repeat) ; L'AFLP, (Amplified Fragment Length polymorphisme) et la RAPD (Randomly Amplified Polymorphic DNA).

Les microsatellites ou SSRs

Ils sont constitués de séquences de di-, tri- ou tétra-nucléotides répétés en tandem. Ces éléments sont uniformes répartis en plusieurs exemplaires sur l'ensemble du génome d'une espèce et présentent un taux de polymorphisme élevé. Ce polymorphisme repose sur la variation du nombre d'unités de répétition constituant le microsatellite. Les séquences flanquant ces éléments répétés permettent de définir les amorces qui seront utilisées pour l'amplification PCR. L'analyse des produits amplifiés s'effectue sur gel d'acrylamide. C'est la paire d'amorces spécifiques des bordures droite et gauche du microsatellite qui constitue le marqueur. **(Margant et Olivieri, 1993).**

Si les SSRs constituent de bons marqueurs moléculaires (reproductibles, co-dominants et aisés d'utilisation), leur caractérisation initiale est toutefois assez lourde. En effet, leur

production doit passer d'abord par le clonage et le séquençage de ces éléments répétés.

(Parker, Langridge, 2000) (Figure.14).

- Application des microsatellites
- Génotypage des individus
- Evaluation des ressources génétiques
- Diversité génétique
- Cartographie des génomes
- Etude phylogénétiques
- Etude d'évolution

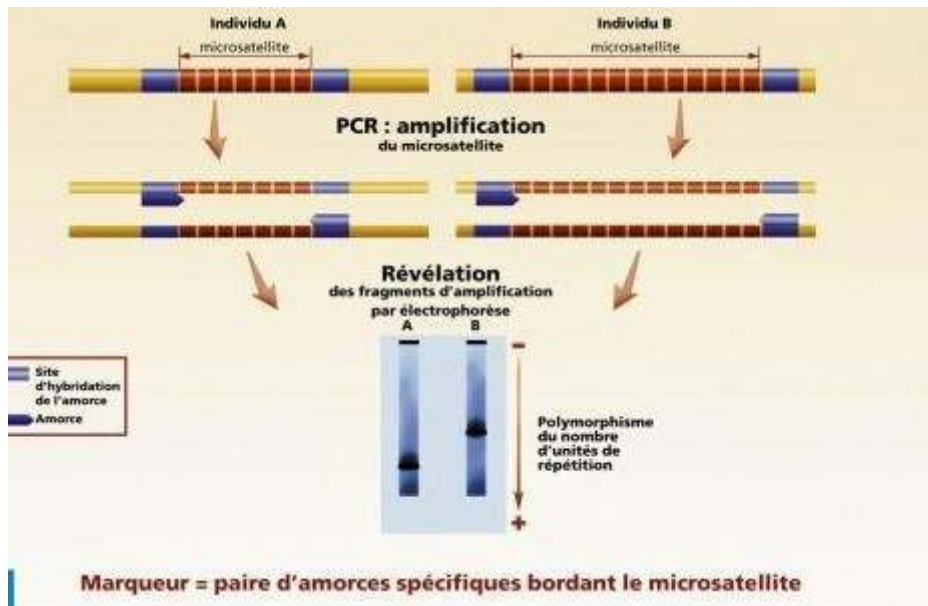


Figure 14 : Polymorphisme de nombre d'unités de répétition (SSR)

La technique AFLP

Elle est fondée sur la mise en évidence conjointe de polymorphisme de sites de restriction et d'hybridation d'amorce arbitraires. Cette technique utilise à la fois les enzymes de restriction et l'amplification PCR.

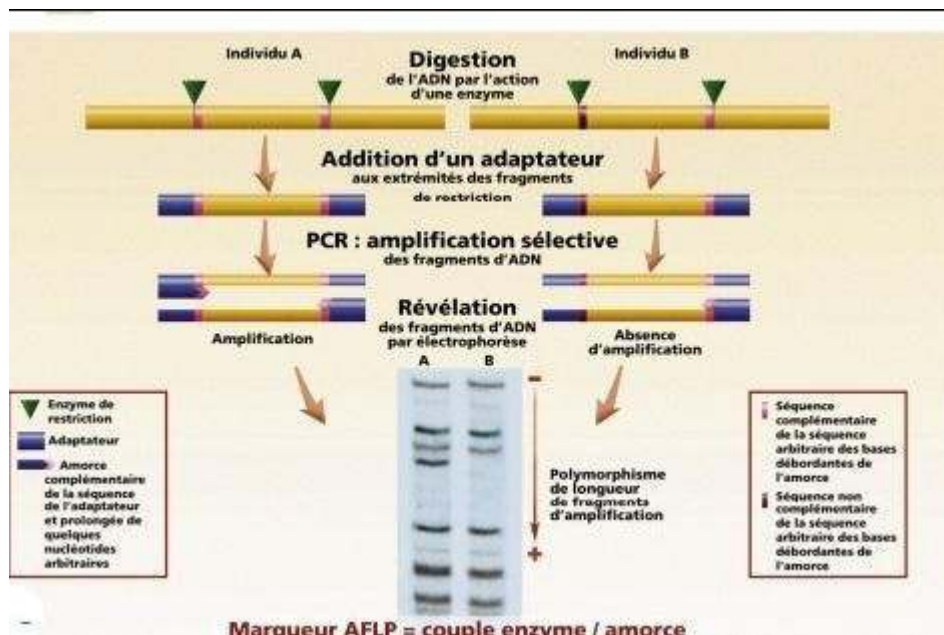
L'ADN génomique est clivé par deux enzymes de restriction. Des adaptateurs de séquences connues et spécifiques des enzymes de restriction utilisée sont ajoutées aux extrémités des fragments de restriction générant ainsi une matrice pour l'amplification. Une première amplification, dite pré-amplification, est réalisée à l'aide d'amorce de séquences complémentaires à la séquence des adaptateurs et des sites de restriction. La deuxième amplification, dite sélective, utilise des amorces identique aux première mais prolongées à l'extrémité 3', de quelques nucléotides arbitraire (de 1 à 3 nucléotides).

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

Ainsi, seuls sont amplifiés les fragments possédant les bases complémentaires de ces bases arbitraires. Ces amorces sélectives permettent de réduire le nombre de fragments amplifiés à une centaine.

Ces fragments sont séparés par électrophorèse sur gel d'acrylamide dénaturant puis visualisés par coloration au nitrate d'argent ou révélés grâce à un marquage radioactif ou fluorescent réalisé lors de l'amplification sélective. C'est la combinaison enzyme de restriction/amorce qui permet de révéler le polymorphisme entre les individus et constitue donc le marqueur AFLP (Prins et al., 2001).

Cette technique est puissante, stable et rapide. En outre, l'AFLP ne nécessite aucune connaissance préalable de séquence du génome de la plante étudiée ni la construction de banques génomiques ou cDNA, à l'encontre des SSR OU des RFLP. Elle connaît une large application dans le finger printing, l'identification des cultivars et la détermination de leur relation phylogénétique, la cartographie des génomes et le clonage. Toutefois, la dominance, le coût élevé et les difficultés techniques liées au marquage par AFLP limitent son utilisation à grande échelle pour des applications comme la sélection assistée par marqueur, (Figure.09) (Vos et al., 1995).



<http://www.gni-pedagogique.org/index>

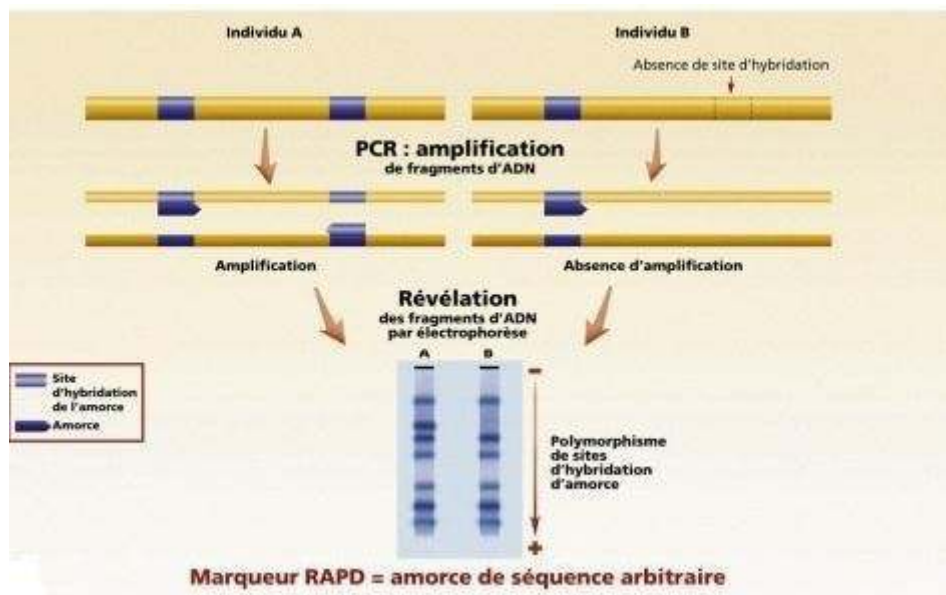
Figure 15: Polymorphisme de longueur des fragments d'amplification (AFLP)

La technique RAPD

Elle consiste en l'amplification par PCR de fragments de l'ADN génomique en utilisant des amorces arbitraires de taille courte (10pb). Une amorce RAPD permet généralement l'amplification d'une dizaine de fragments correspondant à des locus dominants. Les

produites d'amplification sont généralement visualisés par Electrophorèse sur gel d'agarose. Le polymorphisme révélé est un polymorphisme de sites d'hybridation d'amorce, il est dû à des mutations soit dans les régions amplifiées soit au niveau des sites de fixation des amorces, et il se traduit par la présence ou l'absence de bande chez les différents génotypes. (Santoni et al., 2000). Les amorces constituent donc le marqueur.

Cette technique est simple, rapide et ne nécessite ni un marquage radioactif ni une connaissance préalable de la séquence nucléotidique. Néanmoins, la RAPD manque de reproductibilité puisqu'elle est très sensible à concentration de l'ADN et aux conditions d'amplification. (Figur.10) (Williams et al., 1990).



<http://www.gni-pedagogique.org/index>

Figure 16 : ADN Polymorphe au hasard (RAPD)

ISSR (Inter-Simple Sequence Repeat)

Les marqueurs ISSR, liés aux séquences ou nucléotides de l'espace présent entre les séquences simples répétées (SSRs) dans le génome, sont basés sur le polymorphisme de taille de 200 à 2500pb le long de ces espaces inter-microsatellites amplifiables par une seule amorce PCR (Zietkiewicz et al., 1994). En général, les locus microsatellites sont régulièrement distribués en grand nombre à travers le génome d'eucaryote, fournissant ainsi un pool riche en potentiels marqueurs ISSR convenables pour révéler la diversité étroitement associée aux accessions (Wiesner et Wiesnerová, 2003).

En effet, cette amplification ISSR est définie par variation des PCR qui utilisent des amorces à simple séquence répétée comme [AC]_n. Pour amplifier les régions situées entre les séquences microsatellites (Kahl, 2001). Selon Zietkiewicz et al., 1994, la production des marqueurs ISSR est, par rapport aux marqueurs AFLP, SSR et RFLP, moins coûteuse, rapide

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

et facile à optimiser. Par ailleurs, ils sont considérés plus reproductible que ceux de RAPD et détectent un grand polymorphisme génomique que les marqueurs RFLP (Zietkiewicz et al., 1994 ; Oh et al., 2000).

La technique ISSR a été largement et diversement appliquée dans l'étude de la variabilité génétique des plants (Godwin et al., 1997) et la caractérisation de certains organismes fongique (Grunig et al., 2001).

SCAR(Sequence-Characterized Amplified Region)

Un marqueur obtenu par RAPD , AP-PCR , DAF,AFLP peut être cloné. Le fragment intéressant est séquencé à partir de ses extrémités pour définir des amorces 20-50 bases spécifiques de ce fragment. Une nouvelle réaction de polymérisation en chaine est réalisée à l'aide de ces nouvelles amorces conduisant à l'amplification d'un marqueur SCAR spécifique.

Le polymorphisme est révélé après électrophorèse ; trois situations sont alors attendues : le polymorphisme est identique à celui du profil original (tous et seulement tous les individus qui possédaient le marqueur initial (RAPD) présentent les marqueurs(SCAR) ; l'amplification donne de un fragment taille attendue chez tous les individus avec un polymorphisme de longueur (les ségrégations distinguent normalement les même individus que le polymorphisme de présence initial) ; l'amplification donne un fragment chez tous les individus sans polymorphisme visible. Une autre technique est alors utilisée pour restaurer le polymorphisme et la ségrégation initial (changer les amorces si polymorphisme était localisé au niveau des amorces initiale RAPD (Paran et Michelmore, 1993).

SNP (Single Nucléotide Polymorphisme)

Les SNP sont des variations naturelles qui ne concernent qu'un seul nucléotide dans une séquence donnée. Comparés aux autres marqueurs moléculaires, les SNP présentent l'avantage l'une répartition homogène dans tout le génome et d'être excessivement nombreux. Ce nombre élevé permet donc potentiellement la création de cartes génétiques à très haute densité.

L'accumulation récente des données de génomes complétement séquencés, de séquences génomiques ainsi que de séquences codantes (EST) a permis de développer des marqueurs SNP chez plusieurs génomes végétaux comme le maïs , le blé (Somers et al., 2003). Ils ont jusqu'à présent généralement été détectés en tant que marqueurs dominants et utilisés pour la construction des cartes génétiques et physiques ainsi que pour étudier la phylogénie, la diversité génétique et le déséquilibre de liaison (LD)

SSCP (Single Strand Conformational polymorphisme)

Le principe du SSCP repose sur les propriétés de migration de l'ADN simple brin liées à sa conformation spatiale (**Orita et al., 1989**). Les fragments d'ADN simple brin, obtenus après dénaturation par chauffage à 95°C et refroidissement brusque, se replient sur eux-mêmes.

Chaque simple brin prend une conformation qui lui est propre en fonction de sa séquence et des appariements possibles à l'intérieure de ce brin. Les deux brins d'ADN complémentaire prennent une conformation différente en raison des différences de stabilité des liaisons A-T et G-C. Chaque brin d'ADN a une vitesse de migration dans un gel d'électrophorèse qui lui est propre en fonction de sa conformation spatiale. La réassociation des brins complémentaires est empêchée durant toute la migration, l'ADN est visualisé par une coloration généralement à l'argent ou à l'aide de fluoro-chromosomes.

STS (Séquence-Tagged Site)

Les amorces de ces marqueurs sont définies à partir de la séquence des extrémités d'un fragment d'ADN (sonde RFLP.....) préalablement cartographié. Le polymorphisme est observé comme pour les SCAR. Divers auteurs utilisent ce sigle pour des marqueurs amplifiés par PCR à l'aide d'amorce spécifique. (**Olson et al., 1989**).

En résumé, les marqueurs RFLP et microsatellites sont spécifiques de locus, codominants et sont utilisés généralement pour la cartographie et la détection de QTL (Quantitative Trait Loci) tandis que les marqueurs RAPD et AFLP sont dominant, non spécifiques de locus et servent essentiellement à la saturation d'une région du génome au voisinage d'un gène d'intérêt en vue de son clonage. (**Hernandez et al., 1999**).

Selon **Daniel et al., (2006)** et d'après **De vienne, (1999)** le tableau suivant nous synthétisera les caractéristiques des principaux marqueurs.

Les avantages et les inconvénients des principaux marqueurs moléculaires :

Tableau .07: comparaison entre différents types des marqueurs RFLP, AFLP et SSR

Marqueur	Avantages	Inconvénients
RFLP	<ul style="list-style-type: none"> – La RFLP est une méthode fiable et facilement transférable entre laboratoire. – Il s'agit d'un marqueur codominant. – Aucune information sur la séquence n'est requise. – Elle est utilisable pour faire des cartes génétiques de liaisons. 	<ul style="list-style-type: none"> – La RFLP nécessite une grande quantité d'ADN. – Elle n'est pas automatisable, vu les étapes de transfert et d'hybridation. – Certaines espèces possèdent un taux peu élevé de polymorphisme. – Un faible nombre de locus sont détectés par expérience.
AFLP	<ul style="list-style-type: none"> – L'AFLP permet un survol rapide de l'ensemble du polymorphisme du génome. – Elle est hautement reproductible. – Il n'y a pas besoin de connaître une séquence et de créer des sondes spécifiques. – Elle permet la création facile et rapide de cartes génétiques. 	<ul style="list-style-type: none"> – La génération d'une grande quantité d'information. – Nécessite une analyse automatisée et la technologie informatique. – Ce sont des marqueurs dominants. – Les marqueurs AFLP sont souvent localisés aux centromères et aux télomères.
SSR	<ul style="list-style-type: none"> – Les microsatellites sont des marqueurs codominants. – Ils sont très largement utilisés. – Ils y a une grande fréquence de SSR dans le génome. – Les microsatellites sont bien répartis 	<ul style="list-style-type: none"> – La préparation des microsatellites est assez lourde car il faut « cribler une banque génomique enrichie avec une sonde du microsatellite, séquencer les clones positifs, synthétiser les amorces oligonucléotidiques et tester les paires d'amorces dans un échantillon d'individus ».

4. La sélection assistée par marqueur moléculaire (SAM)

La SAM est basé sur la possibilité de détecter la présence d'un gène ou d'une caractéristique agronomique intéressant par la recherche du marqueur qui lui est étroitement lié.

Les perspectives d'application du marqueur moléculaire en sélection sont nombreuses. La SAM est non destructif, elle nécessite peu de tissu végétale et elle n'est pas influence par des facteurs environnementaux .Ce type de sélection est particulièrement avantageux lorsqu'el caractère étudié est difficile, couteux à évaluer ou influencé par les conditions climatiques ou pédologique (résistance au stress hydrique, tolérance à l'aluminium, résistance à la germination sur pied, etc.). (MOULLET et al.,2009)..

Le sélectionneur doit fréquemment anticiper les problèmes, par exemple en améliorant la résistance contre des maladies dans des régions où le pathogène en n'existe pas encore. Dans un tel cas, comme la propagation artificielle du pathogène est proscrite, la SAM est incontournable.

L'amélioration des plantes repose sur deux éléments essentiels, d'un part disposer de larges ressources génétiques et d'autre part sélectionnes les rares combinaisons appropriées dans le but d'apporter l'amélioration recherchée.

Les marqueurs permettent d'évaluerait de structurer ces ressource génétiques (coré collections) en identifiant un nombre limité de variétés représentatives de la totalité de la collection. Ces coré- collections permettent d'optimiser le choix des géniteurs en sélectionnant les cultivars possédant des allèles favorables complémentaires.

La SAM présente encore un grand intérêt dans les programmes d'intégration destinés à modifier de manière ciblée un matériel génétique existant, en remplaçant un segment chromosomique initial. par un segment porteur de caractéristique favorables provenant d'un autre matériel. (MOULLET et al.,2009)..

Cette approche suppose de croiser deux lignées, l'un considérée comme le parent donneur, de l'autre comme le parent receveur, puis d'éliminer progressivement par rétrocroisement successif (back6cross) le génome du parent donneur, tout en conservant de façon ciblée le segment d'intérêt. Les plantes porteuse des allèles favorables peuvent être identifiées à l'aide de marqueurs.

La SAM peut également aider à accumuler dans une plante des gènes de résistance complémentaires pour une même maladie, de façon à obtenir une résistance multi génique qui sera potentiellement plus stable car plus difficile à contourner par le pathogène. Le phénotype

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

seul ne permet pas de différencier les individus cumulant deux ou plusieurs résistances de ceux qui n'en possèdent qu'une, rendant le recours aux marqueurs indispensable.

La SAM a cependant ses limites. Comparée aux méthodes de sélection traditionnelles, cette nouvelle technologie n'est compétitive en termes de coût et de temps lorsque le phénotype peut être déterminé facilement (hauteurs des plantes, précocité, résistance à certaines maladies....)

Par ailleurs, pour la sélection de caractéristiques agronomique à déterminisme génétique complexe, comme le rendement par exemple, gouvernées par un grand nombre de gènes ou de QTL qui interagissent et dont la plupart sont encore inconnus, la SAM est actuellement un out il inefficace. (MOULLET et al.,2009).

Utilisation de marqueur moléculaire à l'amélioration de blé dur

Phylogénie

Les marqueurs utilisés doivent être neutres pour retracer correctement l'évolution des taxons. Plus les taxons sont proches génétiquement, plus les marqueurs utilisés doivent avoir un taux de mutation élevé pour révéler suffisamment de polymorphisme exploitable. Les relations entre les taxons sont fondées sur leur divergence qui est croissante au cours du temps.

Les relations de proximité entre espèces ou populations sont abordées de deux façons différentes:

La phonétique : est fondée sur les distances génétiques entre les unités taxonomiques et aboutit à la construction de dendrogrammes ; Les dendrogrammes construits avec différents types de marqueurs montrent parfois des regroupements différents : C'est le cas pour 22 lignées de blé analysées avec les marqueurs AFLP, RFLP et microsatellites. Dans une autre étude, les dendrogrammes ont été construits pour 33 lignées de maïs avec des marqueurs RAPD, AFLP, RFLP et microsatellites (les marqueurs RAPD fournissent un dendrogramme différent des autres).

La cladistique : est fondée sur l'identification des mutations successives et repose sur le principe de minimiser le nombre d'événements pour décrire un arbre phylogénétique. Les marqueurs préconisés sont les marqueurs RFLP et PCR-RFLP pour lesquels les sites de restriction sont cartographiés de façon à individualiser chaque mutation. Les marqueurs RFLP des gènes ribosomiques dont les sites de restriction sont cartographiés sont de bons marqueurs pour la cladistique. (Anonyme 04 ,2010)

Analyse de la diversité génétique

Phylogéographie

La phylogéographie analyse simultanément la diversité géographique et les relations phylogénétiques des populations. Comme pour la construction d'arbres phylogénétiques, la succession des mutations conduisant aux allèles observés doit pouvoir être retracée. Les marqueurs RFLP, PCR-RFLP et PCR-RFLP de façon générale sont adaptés à ces études.

Structure et différenciation

La structure d'une sous-population est analysée par référence à la situation attendue dans une population panmictique (équilibre de Hardy-Weinberg). Pour tester d'éventuels écarts à cet équilibre, le génotype de tous les individus doit pouvoir être caractérisé aux loci analysés.

En général, les marqueurs dominants ne sont utilisables que dans des espèces à fort taux de fixation, où les individus hétérozygotes sont presque inexistantes, ou dans des populations dont l'écart à l'équilibre de Hardy-Weinberg peut être connu, de préférence pour les marqueurs analysés.

Flux de gènes, recherche de parenté et introgression

Les taux d'allofécondation ou d'autofécondation sont correctement estimés à partir des génotypes notés à une dizaine de locus polymorphes, neutres et indépendants. Ces loci sont de préférence codominants.

Des marqueurs cartographiés comme des RFLP, des STS et des microsatellites sont donc intéressants.

Les techniques d'empreintes génétiques fournissent de nombreux marqueurs dominants dont l'analyse simultanée permet également de mener des recherches de paternité. Les marqueurs microsatellites chloroplastiques (SSR) présentent aussi un intérêt pour la recherche de maternité chez les espèces à transmission maternelle du génome chloroplastique et pour la recherche de paternité chez les autres espèces.

Identification

L'identification de clones ou de lignées est plus facile que celle de population ou de variétés synthétiques. L'efficacité des marqueurs AFLP, RAPD, RFLP et microsatellites pour caractériser les variétés a été comparée chez l'orge. Chaque type de marqueur a permis l'identification des 18 variétés, mais avec un effort plus important pour les marqueurs RFLP.

Notion de QTL

La génétique formelle étudie des caractères phénotypiques dont la variation est discrète (couleur des fleurs, des graines, résistance à un herbicide, etc...). Ces caractères sont généralement sous le contrôle d'un seul gène (caractères dits mono géniques). Cependant de très nombreux caractères, notamment importants en agronomie, manifestent une variation continue. Ces caractères sont dits quantitatifs. Chez le maïs, le rendement en grain, la hauteur de la plante, la taille de l'épi, la masse des grains, la précocité mâle ou femelle, la tolérance à des contraintes de l'environnement sont des caractères quantitatifs très étudiés. On peut aussi citer la masse et le pH du fruit, sa teneur en sucres solubles, analysés notamment chez la tomate. Les caractères quantitatifs sont sous les contraintes de plusieurs gènes, ils sont dits polygéniques. De plus, ils sont dans la grande majorité des cas influencés par l'environnement. Les loci responsables de la variation continue d'un caractère sont appelés QTL.

Cartographie génétique et applications

Tous les types de marqueurs permettent, potentiellement :

- de construire des cartes génétiques,
- d'établir des associations entre marqueurs et gènes,
- et de localiser dans le génome les régions qui sont impliquées dans la détermination des caractères quantitatifs (QTL).

Carte référence, portabilité dans l'espèce

La carte doit contenir un maximum de marqueurs et être au moins saturée. La difficulté pour utiliser les informations de la carte de référence en vue d'établir une carte sur une autre population est de retrouver du polymorphisme à chaque locus pour chaque marqueur.

La présence de marqueurs microsatellites, très polymorphes, dans la carte de référence en fait une carte consensus utilisable dans un grand nombre de croisements. Les marqueurs RFLP sont aussi exploitables.

Recherche de QTL, gènes candidats

Les marqueurs dominants n'apportent pas une information complète sur l'effet du QTL en raison de la confusion des individus hétérozygotes avec certains individus homozygotes.

L'analyse fonctionnelle du génome, menée essentiellement chez les espèces modèles, donne accès à des séquences codantes, de fonction identifiée et intervenant dans divers caractères.

Ces séquences constituent des « gènes candidats » qui peuvent rendre compte de l'effet de certains QTL et remplacer, après validation, le marqueur lié au QTL.

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

Les marqueurs de fonction connus (RFLP avec cDNA et STS) ont l'avantage de permettre de manipuler ces gènes candidats. Un bon exemple nous est fourni par la comparaison des cartes génétiques et physique du blé tendre et blé dur à l'aide de marqueurs microsatellites. (Anonyme 04, 2010).

Saturation rapide, marquage de gènes majeurs

Les marqueurs MAAP sont parfaitement adaptés pour saturer une carte génétique, surtout pour des espèces peu étudiées, où les sondes et les marqueurs PCR n'ont pas été développés. Pour des objectifs de clonage positionnel, ils permettent, dans des dispositifs génétiques adaptés, d'obtenir une forte densité de marqueurs dans une région précise du génome, au voisinage du gène à cloner. (Anonyme 04, 2010)

Cartographie comparée entre espèces

Présente un intérêt fondamental pour la connaissance de l'évolution des génomes, et aussi un intérêt appliqué pour la recherche de gène ou de QTL d'un caractère donné dans une espèce mal connue, en exploitant les données disponibles sur une espèce proche (modèle).

Les marqueurs utilisés doivent être retrouvés dans des espèces voisines. En pratique, les marqueurs RFLP, surtout avec des sondes ADNc, sont les mieux adaptés à la cartographie comparée. (Anonyme 04, 2010). a différenciation) car les informations utilisées sont semblables.

4.2. Utilité des marqueurs moléculaires dans la sélection de blé

Les marqueurs moléculaires peuvent être utiles dans la sélection du blé à plus d'un titre (Yann manès. , 2005):

- Un certain nombre de gène majeur connus interviennent dans le contrôle génétique de caractère important tel que la précocité d'épiaison, la hauteur, la qualité boulangère, le besoin en vernalisation, etc.... Des marqueurs pour ces gènes permettaient au sélectionneur d'avoir une meilleure appréciation du potentiel d'un croisement et d'orienter la descendance du croisement par l'application de marqueurs dès les premières générations de sélection.
- Certains caractères sont difficiles ou coûteuse à évaluer : les marqueurs sont alors utiles quand les conditions de l'année n'ont pas permis l'expression d'un caractère important pour sélectionneur et donc une sélection phénotypique efficace. Dans le cas d'un caractère coûteux à contrôle génétique simple, le sélectionneur pourrait même envisager de substituer une évaluation au champ par un test génotypique.
- Tout schéma de sélection est multicaractère, particulièrement dans le cas du blé. Or l'ordre de sélection des caractères dans le cycle de sélection résulte en fait plus de

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

contraintes pratique que d'un ordre de priorité. Les caractères à déterminisme génétique complexe comme le rendement ne sont pas traités en début de cycle. Si le sélectionneur disposait de marqueurs liés à des gènes intervenant dans le contrôle génétique de caractères complexes, il pourrait exercer une pression de sélection sur de tels caractères dès le début du cycle.

- Tout type de gènes peut être introduit par back-cross dans du matériel élite à partir de source dites exotique, grâce aux marqueurs moléculaires. Je pense en particulier aux gènes récessifs.
- Les marqueurs peuvent permettre d'envisager de véritables schémas de construction génotypique, c'est-à-dire que le sélectionneur peut volontairement orienter sa sélection pour avoir dans la même variété deux, trois ou quatre gènes connus différents.

5. Application de SAM dans l'amélioration du blé au stress abiotique

Marqueurs types microsatellites (SSR)

Une recherche a été menée chez une population F1 issus de différents croisements, les grains ont été semés dans deux essais irrigués et sans irrigation, avec l'utilisation de quarante marqueurs de types BARC (Tableau.04), dont l'objectif est de détecter la liaison entre les marqueurs et la tolérance à la sécheresse leurs motifs et leurs références peuvent être tirés du site ; http://www.scabusa.org/pdfs/BARC_SSR_011101.xls (USWBSI).

Les résultats obtenus de cette étude montrent la présence de 112 allèles notés chez les quarante amorces SSR avec une moyenne de 2.8 allèles par locus ce qui montre l'importance de ces marqueurs dans le criblage des génotypes tolérants sous condition de stress abiotique.

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

Tableau 08: Les amorces utilisées pour analyse SSR dans l'analyse de la tolérance du blé dur à la sécheresse (El-Maghraby et al, 2005)

L'amorce	Motif
BARC004	(TTA) 15
BARC012	(TAA) 28
BARC017	(TAA) 12
BARC018	(TAA) 20
BARC024	(TCA)10+(TAA)9
BARC042	(TTA)12
BARC048	(TATC)11
BARC052	(ATCT)5
BARC062	(TAGA) 8
BARC065	(TAGA) 9
BARC066	(TC) 8(TAGA) 5
BARC069	(TATC) 15
BARC072	(CT) 4(TCTA) 8(TC) 8
BARC074	(GA) 13(GATA) 7(GA) 9
BARC076	(TATC) 7
BARC077	(ATCT) 6+18
BARC078	(TC) 27(TATC) 43
BARC079	(TAGA) 10+(TC) 9
BARC080	(GAA) 12
BARC093	(TTC) 10+3
BARC001	(TAA)8
BARC003	(CCT)17
BARC005	(TTA)5+8
BARC006	(TTA)24
BARC007	(TTC)6+3
BARC008	(TTA)15+11
BARC009	(TAA)3+3+(TTG)6
BARC010	(GAA)13
BARC011	1 (TAA)9+(TTA)12
BARC013	(TTC)5+3+2
BARC014	(TAA)18+12
BARC016	(TTG)9
BARC019	(TAA)18
BARC020	(TAA)21
BARC021	(TAA)19
BARC023	(TAA)9
BARC025	(TAA)22+(GAA)10
BARC026	(ATT)8
BARC027	(TAA)8
BARC028	(ATT)9

Une autre étude a été menée par Somers and Isaac, 2004 sur un autre type de marqueur SSR (wmc) en relation avec le stress abiotique (Tableau.07) chez 14 variétés de blé dur et tendre (locales et introduites)

Tableau 09 : Les marqueurs microsatellites et les amorces utilisées correspondantes dans cette étude (Somers et Isaac, 2004).

Marqueur	Primer
Wmc603 SSR-7A	F : ACAAACGGTGACAATGCAAGGA R : CGCCTCTCTCGTAAGCCTCAAC
Wmc9 SSR-7A	F : AACTAGTCAAATAGTCGTGTCCG R : GTCAAGTCATCTGACTTAACCCG
Wmc596 SSR	F : TCAGCAACAAACATGCTCGG R : CCCGTGTAGGCGGTAGCTCTT

Cette étude a aussi révélé l'importance du chromosome 7A dans la tolérance au stress hydrique chez le blé dur. Ainsi que les marqueurs Xwmc9, Xwmc596 et Xwmc603 montrent un polymorphisme chez les deux cultivars algériens de blé. (*Triticum durum* et *Triticum aestivum*) en comparaison avec les cultivars roumains.

Ce même type de marqueurs a été aussi étudié par Bousba et *al.*, 2013, avec l'utilisation d'un autre type de marqueurs obtenus par le site genebank (Wms) (Tableau. 8) le génotype a été réalisé sur quarante variétés de blé dur de diverses origines (Locales et introduites).

Tableau.10: Description des marqueurs SSR utilisés dans l'étude de la tolérance au stress hydrique chez le blé dur (Bousba et *al.*, 2013).

Marker	Forwrd primer (5'→3')	Reverse primer (5'→3')
WMC54	TATTGTGCAATCGCAGCATCTC	TGCGACATTGGCAACCACTTCT
Wmc63	GTGCTCTGGAAACCTTCTACGA	CAGTAGTTTAGCCTTGGTGTGA
WMC78	AGTAAATCCTCCCTTCGGCTTC	AGCTTCTTTGCTAGTCCGTTGC
WMC105	AATGTCATGCGTGTAGTAGCCA	AAGCGCACTTAACAGAAGAGGG
WMC_150	CATTGATTGAACAGTTGAAGAA	CTCAAAGCAACAGAAAAGTAAA
WMC_153	ATGAGGACTCGAAGCTTGGC	CTGAGCTTTTGC GCGTGTGAC
WMC_165	CACACTCGCAGATTTTCTAT	TCGGTTACACTGGAAGTGGTCT
WMC167	AGTGGTAATGAGGTGAAAGAAG	TCGGTCGTATATGCATGTAAAG
WMC168	AACACAAAAGATCCAACGACAC	CAGTATAGAAGGATTTTGAGAG
WMC177	AGGGCTCTCTTAATTCTTGCT	GGTCTATCGTAATCCACCTGTA
WMC179	CATGGTGGCCATGAGTGGAGGT	CATGATCTTGC GTGTGCGTAGG
WMC235	ACTGTTCTATCCGTGCACTGG	GAGGCAAAGTTCTGGAGGTCTG
WMC307	GTTTGAAGACCAAGCTCCTCCT	ACCATAACCTCTCAAGAACCCA
WMC322	CGCCCCACTATGCTTTG	CCCAGTCCAGCTAGCCTCC
WMC445	AGAATAGGTTCTTGGGCCAGTC	GAGATGATCTCCTCCATCAGCA
WMS06	CGT ATC ACC TCC TAG CTA AAC TAG	AGC CTT ATC ATG ACC CTA CCT T
WMS108	ATT AAT ACC TGA GGG AGG TGC	GGT CTC AGG AGC AAG AAC AC
WMS118	GAT GGT GCC ACT TGA GCA TG	GAT TG TCA AAT GGA ACA CCC
WMS135	TGT CAA CAT CGT TTT GAA AAGG	ACA CTG TCA ACC TGG CAA TG
WMS149	CAT TGT TTT CTG CCT CTA GCC	CTA GCA TCG AAC CTG AAC AAG
WMS169	ACC ACT GCA GAG AAC ACA TAC G	GTG CTC TGC TCT AAG TGT GGG
WMS198	TTG AAC CGG AAG GAG TAC AG	TCA GTT TAT TTT GGG CAT GTG
WMS30	ATC TTA GCA TAG AAG GGA GTG GG	TTC TGC ACC CTG GGT GAT TGC
WMS304	AGG AAA CAG AAA TAT CGC GG	AGG ACT GTG GGG AAT GAA TG
WMS375	ATTGGCGACTCTAGCATATACG	GGGATGTCTGTTCCATCTTAGC

Chapitre 03 : Utilisation de marqueurs moléculaires en amélioration de blé dur

Les résultats de cette recherche montrent que ces marqueurs ont été associés avec la tolérance à la sécheresse chez le blé dur avec l'enregistrement d'un polymorphisme de ces marqueurs et la présence ou l'absence de ces marqueurs chez les génotypes tolérants à la sécheresse.

Marqueurs types RAPD

Plusieurs chercheurs ont détecté des marqueurs moléculaire de types RAPD liées aux stress abiotiques, parmi ces études on a ce qui ont été sélectionné à partir du site (NBCI). Ces marqueurs RAPD ont été étudiés chez les mutants du blé tendre, sur une population générée après l'induction d'une mutation afin de développer des génotypes tolérant à la sécheresse. Dibi et *al.*, (2010), ont détectés un total de 100 allèles chez 15 marqueurs moléculaires de type RAPD, avec un taux de polymorphisme allant jusqu'à 78% (polymorphes) et 22% ont été monomorphes.

Conclusion

Au cours de ce travail nous avons pu, en un premier lieu, avoir une connaissance sur les caractères morfo-physiologiques, phénologiques, biochimiques et cytogénétiques assez importantes sur le génome du blé dur en appliquant des techniques cytogénétiques conventionnelles telles que la coloration au réactif de Schiff qui permet de faire le dénombrement chromosomiques des espèces au niveau des méristèmes racinaires du blé.

Les efforts de recherche sur le blé sont à la mesure de l'importance de blé dans le monde et en Algérie. Les stress biotiques et abiotiques sont les principales contraintes qui menacent considérablement la culture et la production de cette céréale

La deuxième partie de ce travail a consisté à l'étude des stress biotiques et abiotiques qui constituent les principales contraintes qui menacent considérablement la culture et la production de cette céréale. Chez les variétés de blé dur testées, il a été observé, d'après la bibliographie, l'existence d'une grande variabilité pour la plupart des paramètres mesurés.

L'effet du stress hydrique a toujours été bien marqué entre les plantes prises pour témoins et celles stressées chez les différentes variétés étudiées tant au niveau morphologique, physiologique, biochimique et moléculaire.

Les biotechnologies représentent les différentes techniques qui permettent l'amélioration génétique des céréales, dont le but est améliorer le rendement et augmenter la productivité. L'amélioration des plantes consiste à créer de nouvelles variétés capables de donner un rendement meilleur dans les conditions de culture extrêmes par l'exploitation de la variabilité génétique depuis le polymorphisme morphologique jusqu'à l'utilisation du marquage moléculaire en réalisant des hybridations inter et intra spécifiques.

Aujourd'hui, avec le marquage moléculaire, de nouvelles perspectives s'ouvrent pour le sélectionneur, l'utilisation des marqueurs pour augmenter la précision dans l'évaluation de valeurs génotypiques se pose plus en termes de coût par rapport à d'autres méthodes qui peuvent permettre aussi d'augmenter cette précision. Si une technique comme les RFLP ou RAPD se banalisent, alors leur utilisation redonnerait beaucoup plus d'importance à la sélection individuelle sur le phénotype. Mais après chaque sélection, il faudra réévaluer les liaisons entre marqueurs et QTLs.

Dans le cadre d'un travail futur, il serait souhaitable :

D'appliquer cette étude sur plusieurs stades de cycle de vie.

- Vérifier les résultats sur des essais en plein champ ;
- Doser les paramètres morpho-physiologiques liés à la tolérance à tel ou tel stress ;
- Elargir l'étude à plusieurs variétés, locales de préférence ;
- S'intéresser à l'étude du rendement et de ses composantes et à leur déterminisme génétique.
- de compléter le travail par des études de biologie moléculaire pour identifier les gènes responsables.

Améliorer la qualité par l'étude des protéines de réserve et de leur déterminisme génétique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- 1) **Adrain J. 1996.** Composition et valeur nutritionnelle du pain .In : GUINET R., GODON B., 1996. La panification française. paris, Lavoisier, p.p .481-489. (Collection sciences et Technique agroalimentaires).
- 2) **Amokrane A., Bouzerzour H., Benmahammed A. & Djekoun A. 2002.**Caractérisation des Variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. Sciences et Technologie. Univ. Mentouri. Constantine. N° spécial D:33 -38 p.
- 3) **Aouali S., Douici-Khalfi A. 2009.** Recueil des principales maladies fongiques des céréales en Algérie : symptômes, développement et moyens de lutte ; ITGC, EL Harrach, Alger. 56p.
- 4) **Armand et Germain. 1992.** Le blé élément fondamentaux, (Ed) presses université laval, p26-30.
- 5) **Bajji M. 1999.** Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur : caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de Variants somaclonaux sélectionnés In vitro. Thèse de doctorat. Univ . Louvain.
- 6) **Baldy G. 1974.**Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques et de leurs influences sur la production des principales zones céréalières .document du projet céréale ,170p.
- 7) **Baldy, C. 1984.** Utilisation efficace de l'eau par la végétation en climats méditerranéens. Bull. Soc. Botan. Fr 131 (2, 3, 4) (Actual. Botan.) 491-499.
- 8) **Bammoune A. 1997.** Contribution à l'étude de quelques caractères morpho-physiologiques, biochimiques et moléculaires chez des variétés de blé dur (*Triticum turgidum* ssp *durum*.) pour l'étude de la tolérance à la sécheresse dans la région des hauts plateaux de l'Ouest Algérien. Thèse de Magister, pp 1-33.
- 9) **Ben Naceur M., Gharbi M S., Paul R. 1999.** L'amélioration variétale et les autres actions contribuant à la sécurité alimentaire en Tunisie en matière de céréales. Sécheresse.10 :27- 33p.
- 10) **Ben Rejeb K., Abdelly C., Savouré A. 2012.** La proline, un acide aminé multifonctionnel impliqué dans l'adaptation des plantes aux contraintes environnementales. Biologie Aujourd'hui, 206 (4) : 291-299.
- 11) **Ben Salem M., Boussem H., Slama A. 1997.** Évaluation de la résistance à la contrainte hydrique et calorique d'une collection de blé dur : recherche de paramètres précoces de sélection. Sixièmes Journées scientifiques du réseau Biotech.-Génie Génétique des

plantes, Agence francophone pour l'enseignement supérieur et la recherche (AUPELF / U R E F). Orsay. Sécheresse. 2 : 75- 83 p.

- 12) **Benbelkacem A. 2000.** Evaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* L. var *durum*) cultivées en Algérie options méditerranéennes : 6 p 105-110.
- 13) **Benhania Z. 2013.** Etude de la fabrication de la farine et contrôle de sa qualité. Mémoire de master, université KasdiMerbah Ouargla, Algérie. p ; 52.
- 14) **Benlarabi M., & Monneveux P. 1988.** Etude comparée du comportement en situation de déficit hydrique de deux variétés algériennes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) adaptées à la sécheresse. C.R Acad. Agric. France., 74 (5): 73-83
- 15) **Bensari M., Calme S J., Viala G. 1990.** Répartition du carbone fixé par photosynthèse entre l'amidon et le saccharose dans la feuille de soja : influence d'un déficit hydrique : Plant physiol. Biochimie. 28 : 113-124 p.
- 16) **Bogard M. 2011.** Analyse génétique et écophysiological de l'écart à la relation teneur en protéines - rendement en grains chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) .pratique de la conduite des céréales d'automne (blé et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). Ed., ITGC., INRA., ICARADA., 176p.
- 17) **Bonjean A. 2001.** Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.). Dossier de l'environnement de l'INRA, n°21.
- 18) **Boudour L. 2006.** Étude des ressources phytogénétiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.) algérien : analyse de la diversité génétique et des critères d'adaptation au milieu. Thèse Doctorat d'Etat. Université Mentouri Constantine, 142p.
- 19) **Bouzerzour H., Benmahammed A. & Djekoun A. 2002.** Caractérisation des variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. Sciences et Technologie. Univ. Mentouri. Constantine. N° spécial D:33 -38 p.
- 20) **Calvel R. 1980.** La panification : pâte, fermentation, mise en forme. La boulangerie moderne, Paris, EYROLLES, pp. 112-142.
- 21) **Cauderon. 1979.** Etudes des relations physiologiques chez le blé : cytogénétique et biochimique .Journées d'études .Biochimie et génétique du blé .INRA. Paris .Pp30-33.
- 22) **Cornic G. 2008.** Effet de la contrainte hydrique sur la photosynthèse foliaire: De l'utilisation expérimental des relations A/Ci et ACc, article, 36 p.
- 23) **Couplan F. 2002.** Dictionnaire, étymologie de botanique. 2ème édition : Masson & Cie Editeurs : pp 97-223.

- 24) **Crête P. 1965.** Précis de botanique .Tome II, systématique des angiospermes .2^{ème} édition, Paris : 11-38.
- 25) **Cretois A. 1985.** Valeur technologique de quelques variétés de blé. Bull. Industries des céréales N°20, 26, 32.
- 26) **De Vienne D. 1999.** Les marqueurs moléculaires en génétique et biotechnologies végétales, Ed, INRA, p 195..
- 27) **Doussinault G., Pavoine M T., Jaudeau B., Jahier J., 2001.** Évolution de la variabilité génétique chez le blé. Dossier de l'environnement de l'INRA, n 21.
- 28) **El hassani TA., Persoons E. 1994.** Agronomie moderne. Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. (éd). AUPELF-UREF : 544 p.
- 29) **El Jaafari S., Paul R. 1993.** Accumulation foliaire de proline et résistance à la sécheresse chez le blé (*Triticum aestivum* L). *Arch Int Physiol Biochem Biophys* 101 : B8.
- 30) **Erchidi A E., Benbella M., Talouizte A. 2000.** Relation entre certains paramètres contrôlant les pertes en eau et le rendement en grain chez neuf variétés de blé dur soumises au stress hydrique. Options méditerranéennes. Série A (Séminaires méditerranéens). 40 : 279 - 82 p.
- 31) **Ezzahiri B. 2001.** Les maladies du blé Identification, facteurs de développement et méthodes de lutte. Transfert de technologie en Agriculture. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA 77, 4p.
- 32) **Feldman M., Sears E. 1981.** Les ressources génétiques naturelles du blé. Pour la science, 41, pp 79-89.
- 33) **France Agrimer. 2013.** Marché du blé dur : Monde, Europe, France. France Agrimer, Ed : Février <2013. 48 p.
- 34) **Gallais A., & Bannerot H. 1992.** Amélioration des espèces végétales cultivées : objectifs et critères de sélection. INRA éditions. 759 p.
- 35) **Gate P., Bouthier A., Casablanca H., Deleens E. 1993.** Caractères physiologiques décrivant la tolérance à la sécheresse des blés cultivés en France. Interprétation des corrélations entre le rendement et la composition isotopique du carbone des grains. In : Tolérance à la sécheresse des céréales en zone Méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale. Ed. INRA, Montpellier (France), 64 : 61-73.
- 36) **Gate P., Bouthier A., Woznica K., Manzo M E. 1990.** La tolérance des variétés de blé tendre d'hiver à la sécheresse : premiers résultats I.T.C.F. Perspectives agricoles, 145 : 17-23.

- 37) **Gueorguiv D ., Arifi. 1978.** Corrélation entre la tallage et l'épiaison du blé dur .AL AWAMIA. Revue.Marrocaïne N° 55, 57- 53.
- 38) **Guettouche R. 1990.** Contribution à l'identification des caractères morpho physiologiques d'adaptation à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). Thèse diplôme d'agronomie approfondie.
- 39) **Hamada Y., 2002.** Evaluation de la variabilité génétique et utilisation des espèces tétraploïdes du genre *Triticum* en amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) Thèse Magistère, I.S.N Université Mentouri .Constantine. Algérie.
- 40) **Hamadache A. 2013.** Eléments de phytotechnie générale : Grandes Culture- Tom I : Le blé. 1ère édition. Mohamed Amrani. 49-69.
- 41) **Harrath N. 2003.** Analyse génétique de l'intégrité cellulaire et de la vitesse de dessèchement foliaire chez le ble dur (*Triticum durum* Desf.) . Thèse de magister. Institut des sciences de la nature, centre universitaire Larbi Ben Mhidi , OEM, 50 Pages.
- 42) **Hireche Y. 2006.** Réponse de la luzerne (*Medicagosativa* L) au stress hydrique et à la profondeur de semis. Mémoire de magister, Département d'Agronomie. Université EL-Hadj Lakhdar, Batna. 83p.
- 43) **Hopkins W G. 2007.** Physiologie végétale. Deuxième édition. pp 460-464.
- 44) **Hsissou D. 1994.** Sélection In vitro et caractérisation de mutants de blé dur tolérants à la sécheresse. Thèse de doctorat. Univ. Catholique de Louvain.
- 45) **Jean-François., Morot-Gaudry. 1997.** Assimilation de l'azote chez les plantes: aspects physiologique, biochimique et moléculaire. INRA, Paris, 119-235.
- 46) **Jlibene M. 2011.** Options génétiques d'adaptation du blé tendre au changement climatique. Variétés à résistance multiple : Sécheresse, Cécidomyie, Septoriose, Rouilles brune et jaune. Institut National de la recherche Agronomique Edition. DIC. 63p.
- 47) **Kiani P. 2007.** Analyse génétique des réponses physiologiques du tournesol (*Helianthusannus* L.) soumis à la sécheresse. Thèse Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- 48) **Lamaze T., Tousch D., Sarda X., Grignon C., Depigny-This D., Monneveux P., Belhassen E. 1994.** Résistance de plantes a la sécheresse : mécanismes physiologiques. Le sélectionneur Français, 45: 75-85.
- 49) **Lepoivre P. 2003.** Phytopathologie: Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. De Boeck Supérieur, 27-28.

- 50) **Madr. 1992.** le secteur agricole et les perspectives de sa promotion et de son développement .rapport général de commission national consultative sur l'agriculture ,292p.
- 51) **Massele M J. 1981.** Relation entre croissance et développement pendant la montaison d'un peuplement de blé d'hiver. Influence des conditions de nutrition. *Agronomie*, 13 : 365-370.
- 52) **Matweef M. 1946.** Valeur industrielle des blés durs Tunisiens et méthodes utilisées pour appréciation. *Annales du Service Botanique et Agronomique de Tunisie*. Vol, 19.pp. 4-23.
- 53) **Mazouz L. 2006.** Etude de la contribution des paramètres phéno morphologiques dans l'adaptation du blé dur (*Triticum durum Desf.*) dans l'étage bioclimatique semi aride. Thèse de Magister. *Dept Agr, Fac Sci, UHL, Batna, Algérie*.110p.
- 54) **Mebtouche, K. 1998 :** Caractérisation technologique de quelques lignées de blé dur In : Céréaliculture N°32. Revue technique et scientifique de l'ITGC. Alger, pp 27-33.
- 55) **Mekhlouf A. 1998.** Etude de la transmission héréditaire des caractères associés ou rendement en Grains de leur efficacité en sélection chez le blés dur (*Triticum durum Desf.*) Thèse de magister .INA.EL harrach .67p .
- 56) **Mekliche H L. 1983.** Etude agronomique, analyses diallèles et cytogénétique de quatre variétés de blé tendre cultivées en Algérie. Thèse de Magister. I.N.A. El-Harrach, 150 p.
- 57) **Moreau J M. 2011.** Lutte contre les maladies. Livre Blanc « Céréales » ULg Gembloux Agro-bio et CRA-W Gembloux. Février. 12 p.
- 58) **Neffar F. 2013.** Analyse de l'expression des gènes impliqués dans la réponse au stress abiotiques dans différents géotypes de blé dur (*Triticum durum*) et d'orge (*Hordeum vulgare*) soumis à la sécheresse. Thèse doctorat en Sciences, Université Sétif. 86p.
- 59) **Oukarroum A. 2007.** Vitalité des plantes d'orge (*Hordeum vulgare L.*) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Thèse doctorat.
- 60) **Picard B., Branlard G., Oury F X., Rousset M. 1992.** Etude de la diversité génétique du blé tendre. I. Comparaison de distances biochimiques, agro morphologiques et généalogiques. *Agronomie* 12 : 611-622.
- 61) **Potus J ., Galey C ., Vignau C ., Garcia R ., Poiffait A., Nicolas J. 1994.** Les oxydoréductases en panification. *Industries des céréales*, n° 115, p.p . 3-10.

- 62) **Prats H. 1960.** Vers une classification des graminées .Revue d'Agrostologie .Bull. Soc Bot. France : 32-79.
- 63) **Ramade F. 2003.** Eléments d'écologie, Ecologie fondamentale. 3ème édition. Paris. 690p.
- 64) **Santoni S., Faivre –Rampant P., Prado E., Prat D. 2000.** Marqueurs moléculaires pour l'analyse des ressources génétiques et l'amélioration des plantes. Cah. Agri. 9(4) : 3311-3327.
- 65) **Saraoui T. 2011.** Etude de la variabilité morphologique population f2 blé dur (*Triticum durum* Desf.) utilisation d'un indice de sélection. Mémoire de magister. Université Hadj lakhdar batna, p6-8.
- 66) **Sayoud R., Ezzahiri B., Bouznad Z. 1999.** Les maladies des céréales et des légumineuses alimentaires au Maghreb, Guide Pratique. Projet Maghrébin sur la Surveillance des Maladies et le Développement de Germoplasme Résistant des céréales et des Légumineuses Alimentaires. PNUD RAB/91/007 Maroc-Algérie -Tunisie. Trames Ed, Algérie. 64p.
- 67) **Sayoud. 2004.** exploitation et synthèse des résultats d'enquêtes- 1992 -2004- projets PNUD et MERS (actualisés jusqu'en 2006).
- 68) **Slama A., Ben Salem M., et Zid D. 2004.** La proline est-elle un osmorégulateur chez le blé dur. Communication aux 15es Journées biologiques. Forum des sciences biologiques. Association tunisienne des sciences biologiques.
- 69) **Soltner D. 2005.** Les grandes productions végétales. 20ème Edition. Collection science et techniques agricoles.
- 70) **Tahri E., Belabed A., Sadki K. 1997.** Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Bulletin de l'Institut Scientifique. Rebat.21: 81 - 89 p.
- 71) **Ykhlef N. 2001.** Photosynthèse, Activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* ; Desf). Thèse de doctorat. Univ. Mentouri .Constantine
- 72) **Zahri S., Farih A., Badoc A., Douira A. 2014.** Statut des principales maladies, cryptogamiques foliaires du blé au Maroc en 2013. Journal of Applied Biosciences 77, 6543–6549.

Résumé :

Résumé:

Le blé est une culture importante en termes de consommation humaine dans de nombreux pays, et il fait partie des trois principales céréales avec le riz et le maïs, et il est le troisième de l'importance de la récolte mondiale.

Cette étude vise à connaître le comportement des variétés de blé dur au niveau morphologique, physiologique, biochimique, cytogénétique et moléculaire vis-à-vis du stress hydrique ; ainsi que l'effet de cette contrainte sur les composantes du rendement durant le développement de la plante.

L'amélioration du rendement chez le blé est un défi constant pour l'agriculteur en raison du stress biotiques et abiotiques imposés par les conditions de culture dans le bassin méditerranéen qui limitent la production.

Les techniques adoptées pour réaliser ces objectifs vont de l'amélioration des paramètres morpho physiologiques liés au rendement, à l'utilisation des marqueurs biochimiques en passant par une caractérisation cytogénétique jusqu'à arriver à l'utilisation de marqueurs moléculaires en faisant une cartographie du génome afin de développer des variétés plus efficaces qui arrivent à réaliser de bonnes performances de rendement dans des conditions de stress biotiques et abiotiques.

Dans la première partie, nous avons examiné les différentes caractéristiques physio-morphologiques, biochimiques et cytogénétiques du blé dur.

Dans la deuxième partie, nous avons examiné l'effet des limitations abiotiques et biologiques et les mécanismes physiologiques et biochimiques de la tolérance des plantes au stress hydrique.

Dans la troisième partie, nous avons examiné les utilisations des techniques des marqueurs moléculaires dans l'amélioration et le développement des plantes.

Mots-clés : blé dur, stress biotique, stress abiotique, marqueurs moléculaires, cytogénétique, morphologie, physiologie, biochimie.

Abstract:

Wheat is an important crop in terms of human consumption in many countries, and it is among the three major cereals along with rice and maize, and it is the third largest in the global harvest.

This study aims to know the behavior of durum wheat varieties at the morphological, physiological, biochemical, cytogenetic and molecular level vis-à-vis water stress; as well as the effect of this constraint on the components of yield during plant development.

Improving yield in wheat is a constant challenge for the farmer due to the biotic and abiotic stresses imposed by the growing conditions in the Mediterranean basin which limit production.

The techniques adopted to achieve these objectives range from the improvement of morpho-physiological parameters linked to yield, to the use of biochemical markers through cytogenetic characterization until arriving at the use of molecular markers by mapping the genome. in order to develop more efficient varieties which manage to achieve good yield performances under biotic and abiotic stress conditions.

In the first part, we examined the different physio-morphological, biochemical and cytogenetic characteristics of durum wheat.

In the second part, we examined the effect of abiotic and biological limitations and the physiological and biochemical mechanisms of plant tolerance to water stress.

In the third part, we examined the uses of molecular marker techniques in the improvement and development of plants.

Keywords: durum wheat, biotic stress, abiotic stress, molecular markers, cytogenetics, morphology, physiology, biochem

ملخص :

يُعَدُّ الذُّمَحُ محصولًا مهمًا من حُبِّ الثَّلَاثِ سِنَّةِ الْبَشَرِيِّ نَعْدُ من البلدان، وهو من بَنِّ الْبُحْبُوبِ الثَّلَاثَةِ الرَّئِيسَةِ إِلَى جَانِبِ الْأَرْزِ وَالذَّرَّةِ، وهو ثالثُ أَكْبَرِ مَحْصُولِ نَا الْإِعْلَامِ.

تَهْدَفُ هَذِهِ الدِّرَاسَةُ إِلَى نَهْمِ سِرْوَكِ أَصْنَافِ الذُّمَحِ الصَّلْبِ عَلَى الْمَسْتَوَى الْمَوْرِنُولُوجِيِّ وَالنَسُولُوجِيِّ وَالْكُمِّيَّةِ الْخُويِّ وَالخُويِّ وَالخُويِّ وَالخُويِّ نَامًا مُتَعَلِّقًا بِالْجِهَادِ الْمَائِي. وَلِذَلِكَ نَتَلَوُّ هَذَا الْقُدْرَةَ عَلَى مَفَوْنَاتِ الْمَحْصُولِ أَثْنَاءَ نَطْوَرِ النَّبَاتِ.

عُدَّ نَحْسُنُ إِنْجَاحِ الذُّمَحِ نَحْدًا مَسْتَمِرًّا لِلْمَزَارَعِ بِسَبَبِ الضَّغْوَطِ الْحَوَّةِ وَغَرِّ الْحَوَّةِ النَّبَاتِ تَحْتِهَا ظُرُوفِ الزَّمَانِ حَوْضِ الْبَحْرِ الْأَبْيَضِ الْبَحْرِيَّةِ وَالْبُنَاتِ مِنْ النَّتَاجِ. تَرَاوَحَ النَّقَائِدُ الْمَعْتَمَدَةُ لَتَحْتَقِ هَذِهِ الْأَهْدَافُ مِنْ تَحْسُنِ الْمَعْلَمَاتِ الْمَوْرِنُولُوجِيَّةِ النَّسُولُوجِيَّةِ الْمُرْتَبِطَةِ بِالْمَحْصُولِ، إِلَى اسْتِخْدَامِ الْوَسَامَاتِ الْبُوكُمِّيَّةِ مِنْ خَالِلِ الْبُوكُمِّيَّةِ الْخُويِّ إِلَى اسْتِخْدَامِ الْوَسَامَاتِ الْجَزَائِيَّةِ عَنِ طَرُقِ رَسْمِ خَرَائِطِ الْجَزَائِرِ. مِنْ أَجْلِ نَطْوَرِ أَصْنَافِ الْبُنَاتِ كَفَاءَةً تَمَكَّنْتَ مِنْ تَحْتَقِ أَدَاءِ مَحْصُولِ جَدِّ نَا ظِلَّ ظُرُوفِ الْجِهَادِ الْحَوَّةِ وَغَرِّ الْحَوَّةِ. نَا الْجَزَاءُ الْأَوَّلُ، دَرَسْنَا الْخِصَائِصَ الْبُنَاتِيَّةَ وَالخُويِّ وَالنَسُولُوجِيَّةَ وَالْكُمِّيَّةَ الْخُويِّ وَالخُويِّ وَالخُويِّ وَالخُويِّ الْمَخْتَلِفَةَ لِلذُّمَحِ الصَّلْبِ. نَا الْجَزَاءُ الثَّلَاثُ، دَرَسْنَا تَأَثَّرَ الْقُوَدِ الْأَحْيَاءِ وَالْبُوكُمِّيَّةِ وَاللَّاتِ النَّسُولُوجِيَّةِ وَالْكُمِّيَّةِ الْحَوَّةِ الْحَوَّةِ لَتَحْمَلِ النَّبَاتِ لِجِهَادِ الْمَائِي.

نَا الْجَزَاءُ الثَّلَاثُ، دَرَسْنَا اسْتِخْدَامَاتِ نَقَائِدِ الْوَسَامَاتِ الْجَزَائِيَّةِ نَا تَحْسُنِ وَنَطْوَرِ النَّبَاتِ.

الْفَلَمَاتِ الْمُنْتَجِيَّةِ: الذُّمَحِ الصَّلْبِ، الْجِهَادِ الْحَوِّي، الْجِهَادِ الْأَحْيَاءِ، الْوَسَامَاتِ الْجَزَائِيَّةِ، الْوَرَاثَةِ الْخُويِّ، عِلْمِ الْبُنَاتِ، عِلْمِ وَظَائِفِ الْعَضَاءِ، الْكُمِّيَّةِ الْحَوَّةِ.