



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة زيان عاشور - الجلفة

Université Ziane Achour – Djelfa

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Biotechnologie végétale

Thème

**Effet d'un stress thermique (froid) sur la physiologie
d'une plante. Cas de *Triticum durum* Desf.**

Présenté par: - SAHI Basma

- NEDIL katia

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Président :	ADLI Benziane	MCA	UZA Djelfa
Promoteur:	DEHBI Faouzia	MAA	UZA Djelfa
Examineur :	TOUIL Souhila	MCB	UZA Djelfa

Année universitaire : 2021/2022



Remerciement

Tous d'abord, nous tenons à remercier **DIEU** notre créature pour nous avoir donné la force et le courage à accomplir ce travail.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui on voudrait témoigner toute nos reconnaissances.

On voudrait tout d'abord adresser toute nos gratitude à nos encadreur de ce mémoire :

Madame **Dehbi Faouzia** pour son soutien, sa motivation, ses précieux conseils, ses encouragements, son sincère travail et la qualité de son encadrement, Tout au long de l'élaboration de ce travail.

On présente tous nos chaleureux remerciements à l'ensemble de nos enseignants au sein de département des Sciences Biologie.

On remercie également les membres de jury de ce mémoire, qui ont bien voulu accepter de porter leurs jugements sur ce travail que nous souhaitons à la mesure de leurs satisfactions.

Sans oublier d'exprimer nos sincères remerciements et nos profondes gratitude à nos chers parents, qui nous ont beaucoup encouragés et supportés.

Et enfin on remercie tous nos enseignants depuis le cycle primaire jusqu'à l'université et on exprime nos profondes reconnaissances à nos familles, nos amis, à toutes celles et à tous ceux qui ' ont aidés à la réalisation de ce travail de près ou de loin.

Grand merci à tous



Dédicace

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents, ma tendre mère **Torkia** et mon généreux père **Said** qui m'ont apporté leur support moral tout au long de ma démarche et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mon encadreur : **Madame Dehbi faouzia** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*A mes frères **Ayoub** et mon petit ange **Abd elouahab**.*

*A mes sœurs **Bouthaina** qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles, **Amina** et **Chahrazed**.*

*A ma binôme **Katia** pour sa attente et sa sympathie.*

A tous ce que j'aime et ceux qui m'aime.



Dédicace

A mes chers parents, la raison pour laquelle j'ai réalisé cette réussite et j'ai atteint mon objectif en espérant de trouver les mots qu'il faut pour exprimer mon amour, mon respect, ma reconnaissance et ma gratitude pour leurs sacrifices, leurs motivations, leurs encouragements et leurs efforts fournis jour et nuit pour mon éducation, ma formation et mon bien être, merci papa, merci maman.

*A mon encadreur : Madame **Dehbi Faouzia**, que je remercie de tout mon cœur pour tout le soutien qu'il m'a apportée depuis le commencement de ce travail et durant toute l'année, je veux dire une fière chandelle, j'aurais tant aimé vous voir en cette journée l'importance de voir les fruits de vos efforts.*

A mes chers frères : Mohamed et Abd errahim et Abd elhak

Je vous remercie énormément pour les mots que vous avez trouvés pour me conseiller et me guider et afin de me donner la force et le courage de continuer malgré tous les obstacles que j'ai rencontrés au cours de toute cette année. Je dédie aussi ce travail à mes belles amies : Maissoune ,Abir , Zineb , Zahra et Samia .

*Je dédie aussi à ma binôme : **Sahi Basma**.*

Et en dernier lieu, je présente chaleureusement mes sincères remerciements pour tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et qui m'ont aidé durant tout mon cursus.

Que dieu vous bénisses.



Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification de blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.)	13
Tableau 2 :Températures qui causent des dommages au blé aux stades de croissance printaniers. Symptômes et effet sur le rendement des dommages causés par le gel printanier (Klein, 2006).	48

Liste des figures

Figure 1: Production, utilisation et stocks mondiales des céréales (FAO, 2022).....	6
Figure 2: Les zones céréalières de l'Algérie (http://madrp.gov.dz/agriculture/statistiques-agricoles/).....	7
Figure 3: Plantes de blé dur (Sadouki et Boutouchent , 2017).....	8
Figure 4: Les graines de blé dur (Sadouki et Boutouchent , 2017).....	8
Figure 5: Origine géographique des blés cultivés (Dubcovsky et Dvosak, 2007).....	9
Figure 6: Origine génétique du blé dur (Debiton, 2010).....	10
Figure 7: Lieux de production, routes d'échanges et d'utilisation du blé dur dans le monde (Ammar, 2015).	11
Figure 8: Evolution de la production mondiale du blé 2017-2020 (CIC/ USDA/Statcan, 2019).....	11
Figure 9: La production du blé en Algérie durant la période 2016 à 2020 (UNA, 2020).....	12
Figure 10: Une graminée typique de blé dur (Sadouki et al., 2018).....	14
Figure 11: Épillet et fleur de blé (Flandrin ,1949).....	14
Figure 12: Structure schématique d'un grain de blé (coupe longitudinale).....	15
Figure 13: Les stades du développement de blé dur (Masle, 1980).....	16
Figure 14: Culture de céréale au stade de tallage (Boyeldieu ,1999).....	17
Figure 15: Le cycle de développement de la plante de blé dur (Bouزيد, 2021).....	18
Figure 16: Réponse de la plante aux différents stress abiotiques (Sha Valli Khan et al., 2014) ...	25
Figure 17: Pertes agricoles dues aux facteurs biotiques et abiotiques au niveau planétaire (Ashraf et al., 2012).....	26
Figure 18: Principaux stress environnementaux aux quels les plantes sont confrontées (d'après Schulze et al., 2002).....	31
Figure 19: les facteurs environnementaux causant le stress abiotiques (https://biodevas.fr/glossaire/stress-abiotique).....	32
Figure 20: Principaux effets d'une forte salinité sur les plantes (Parida et Das,2005).....	33
Figure 21: Cytotoxicité potentielle, directe ou indirecte, induite par les ROS, entraînant des altérations du cycle cellulaire, des anomalies chromosomiques, des modifications de la ploïdie, des mutations et des lésions, aussi des effets transgénérationnels (Soares et al. 2019).	35
Figure 22: Plants de blé sous gel (Alexandre ,2021).....	43
Figure 23: Evolution de la résistance au froid du blé d'hiver en fonction des stades de développement (Gate,2008).....	45
Figure 24 blé de printemps deux jours après un gel (RAP,2021).....	46

Figure 25: Semis de céréales du printemps affecté par la neige et le gel (une journée après un gel de -4 °C) (RAP, 2021)	46
Figure 26: Seuils d’alerte vis-à-vis des accidents climatiques en fonction des stades (Arvalis,2021)	47
Figure 27: Niveaux maxima de résistances au froid et variabilité génétique chez différentes espèces (Deswarte, 2019).....	50
Figure 28: Résistance des céréales aux basses températures (Chambre d’Agriculture de Lozère - www.lozere.chambagri.fr).....	51
Figure 29 : I ’Evolution de la résistance au froid du blé en fonction du stade végétatif (Gate, 1995).....	52

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des tableaux

Liste des figures

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralités sur les céréales et le blé dur

I. Généralités sur les céréales 5

I.1- Les céréales dans le monde..... 5

I.2- Les céréales en Algérie 5

I.3-Importances économiques et production des céréales 6

II. Généralités sur le blé dur (*triticum turgidum* l. var. *durum*)..... 7

II.1-Définition du blé dur 7

II.2-Origine géographique du blé dur..... 8

II.3-Origine génétique de blé dur 9

II.4- Importance et production du blé dur dans le monde et en Algérie..... 10

II.5-Caractéristiques botaniques et morphologiques du blé dur (*Triticum durum*)..... 13

II.6 -Le cycle de développement du blé 15

1. La période végétative 16

1.1- La phase germination – levée 16

1.2- La phase levée – tallage 17

2. La période reproductrice 17

2.1- La phase montaison – gonflement 17

2.2- La phase épiaison – floraison..... 18

III. Les contraintes de la culture de blé dur 18

III.1 -Les conditions climatiques..... 19

III.2 -Les techniques culturales 20

III.3- Les variétés	20
IV. Les différentes approches de sélection du blé dur	21
IV.1- La sélection sur le terrain.....	22
IV.2 -La sélection assistée par des marqueurs	23

Chapitre II : Les effets de basses températures sur le blé

Introduction	25
I. NOTION DE STRESS.....	27
1. Le froid.....	28
2. Le gel	28
3. Acclimatation	28
4. Endurcissement	28
5. Adaptation.....	29
6. Résistance, Evitement et Tolérance	29
7. L'esquive.....	30
II. LES TYPES DES STRESS.....	30
II.1-LES STRESS ABIOTIQUES.....	32
II.1-1- Le stress hydrique	32
II.1-2- Le stress salin	33
II.1-3- Le stress nutritif	34
II.1-4- Le stress photo-oxydatif.....	34
II.1-5- Le stress thermique	35
II.1-5-1- Le stress provoqué par les hautes températures.....	36
II.1-5-2- Le stress provoqué par le froid (basses températures, gel).....	36
III. EFFETS DES BASSES TEMPERATURES SUR LE BLE DUR :.....	37
III. 1- Effet sur les membranes.....	38
III. 2- Effet sur la photosynthèse	39
III. 3- Effet sur la transpiration.....	40
III. 4- Effet sur la respiration.....	41

III. 5- Effets sur les cellules	41
III. 6- Effet sur la biochimie et la physiologie du blé	42
III. 7- Effets du froid sur les stades de croissance (phénologie) du blé	43
III. 7-1- Impact du froid sur les semis	44
III. 7-2- Impact du froid lors de la germination.....	44
III. 7-3- Impact du froid après la levée	45
III. 7-4- Impact du froid Au cours de la montaison.....	46
III. 7-5- Impact du froid de l'Élongation de la tige à l'épiaison.....	46
III. 7-6- Impact du froid à la floraison.....	47
III. 7-7- Impact du froid au stade laiteux.....	47
III. 7-8- Impact du froid au stade pâteux :.....	47
IV. LA RESISTANCE AU FROID	49
IV. 1-Acclimatation (endurcissement) au froid :	50
V. STRATEGIES ET MECANISMES DE LA TOLERANCE AU FROID.....	52
V. 1- Réponses (adaptations) morphologiques	52
V. 2-(Réponses) Adaptation biochimiques et physiologiques	53
V. 2-1- Stabilisation de la membrane cytoplasmique	53
V. 2-2- Réductions du stress oxydatif	53
V. 2-3- Synthèse d'osmo-protecteurs	54
V. 2-4- Synthèses des protéines cryoprotectrices ou (de protéines spécifiques)	55
V. 2-5- régulations de l'expression de gènes	56
VI .LA SELECTION DU BLE DUR POUR LES BASSES TEMPERATURES	56
Conclusion.....	61
Références bibliographique:	66
Annexe :	79
Résumé	
الملخص	
Abstract	

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

En Algérie, la céréaliculture demeure le pivot de l'agriculture (CIC, 2000). Les céréales sont l'aliment de base de la population (Rachdi, 2003) et la principale source calorique soit 60% dont 71% d'apport protéique (Padilla et Oberti, 2000 cités par Kellou, 2008).

Le blé dur a toujours été au cœur des enjeux politiques, économiques et sociaux de premier rang. C'est l'espèce la plus cultivée occupant 41% de la sole céréalière (Adamou *et al.*, 2005 ; Anonyme, 2009).

Désormais sa production reste très insuffisante pour satisfaire la demande de ce produit de large consommation (Bernardi et Gommès, 2004). L'Algérie demeure toujours parmi les grands importateurs de céréales en particulier le blé.

La faiblesse des rendements est expliquée en partie par le matériel végétal peu performant et souvent inadapté, par les techniques culturales appliquées inadéquates et en grandes parties par les stress abiotiques.

Une grande partie de la céréaliculture est concentrée dans les zones arides et semi arides aux conditions climatiques sévères et se caractérisant par un régime pluviométrique irrégulier, des hivers froids, des gels printaniers très fréquents et des vents chauds et secs en fin de cycle de culture. Ce qui explique la fluctuation de la production d'une année à l'autre (Selmi, 2000 ; Rabi, 2017).

Abbassene (1997) ; Bensedik et Benabdelli (2000) ; Bouzerzour *et al.* (2000) attribuent cette faible production aux grandes variations de la pluviométrie et des températures. Cependant, Mekhlouf *et al.* (2006) ; Mekhlouf (2008) révèlent que ce sont plutôt les basses températures hivernales et printanières qui handicapent le plus cette spéculation.

Dans ce cadre, se pose le problème du froid (basses températures et gel) qui est un facteur climatique clé à surmonter. Le froid influe négativement sur la croissance de la plante, donc tout le métabolisme de celle-ci est freiné sinon arrêté, il y a influence directe sur l'absorption et l'assimilation et également sur la circulation de la sève. Le froid est responsable de nombreux troubles physiologiques, morphologiques et moléculaires (Payot, 1979).

Ainsi, en raison du caractère imprévisible des contraintes abiotiques, basses températures principalement la tolérance s'avère la stratégie la plus efficace dans les situations de stress sévère et prolongé. Lors de cette tolérance ont lieu des modifications de structures ou de fonctions qui

augmentent la probabilité de survie et de production des céréales lors de ces conditions (Schulze *et al.*, 2008).

La résistance au froid un caractère variétale conditionné par le génotype de la plante et l'environnement dans lequel elle évolue. Ce dernier dépend du stade de la plante. Cette résistance dépend en fait du froid lui-même ; un abaissement lent de la température jusqu'à -15°C par exemple peut être supporté par la plante tandis que un abaissement brutal de +10°C à -10°C sera fatal au blé sur l'épi. Les gelées tardives peuvent provoquer la coulure (Soltner, 1990).

Les dégâts de ce stress dépendent de la durée et l'intensité du froid, de la vitesse de congélation et de décongélation, des différences anatomiques et du contenu cellulaire (Hoshino et Tahir, 1987).

La plus parts des études effectuées sur le blé dur concernant son amélioration génétique de la résistance ou tolérance au stress abiotique avaient pour objectifs l'augmentation des rendements. Actuellement l'approche adoptée est basée sur les l'amélioration génétique de la tolérance au stress. Cette amélioration exige d'identifier et d'étudier les caractères phénologiques, morpho physiologiques et biochimiques liés au rendement en condition de stress

L'effet des basses températures hivernales a fait l'objet de nombreuses études dans les pays dont le climat est plus rigoureux où cette contrainte est plus fréquente (Single et Marcellos, 1973 ; Fowler, 1978 ; Havaux et Lannoye, 1982 ; Fletcher, 1983 ; Paulsen et Heine, 1983 ; Sutka, 1994 ; Pearce *et al.*, 1996 ; Mekhlouf *et al.*, 2006 ; Mekhlouf, 2008). Les résultats des diverses études indiquent que les variétés résistantes mettent en œuvre divers mécanismes d'ordre morphologiques, phénologiques, physiologiques ou biochimiques pour éviter ou tolérer et réduire les effets du stress (Araus *et al.*, 1998 ; Passioura, 2002).

Richard *et al.* (1997) suggèrent dans ce contexte que les approches physiologiques sont les plus recommandées pour sélectionner dans de tels environnements.

Pour Danyluk (1996), il est essentiel de comprendre les mécanismes physiologiques et moléculaires impliqués dans la résistance au froid et au gel.

Song *et al.*, (2008) rapportent que la compréhension des mécanismes par lesquels les plantes perçoivent et traduisent les signaux de stress afin de déclencher les réponses adaptatives est essentielles pour la maîtrise de l'ingénierie de tolérance des plantes cultivées aux contraintes abiotiques.

La connaissance de ces réponses, basées sur la traduction des signaux de stress, est très importante afin d'améliorer la réponse des céréales et plus particulièrement le blé dur aux basses températures.

Dans ce contexte, nous avons particulièrement mis l'accent sur les changements induits par le froid (gel et basses températures) sur le métabolisme du blé dur (*Triticum durum*, Desf.), leur physiologie ainsi que leur biochimie. Et l'ensemble de modifications de structures ou de fonctions qui augmentent la probabilité de survie et de la production du blé dur dans de telles conditions

Le présent travail est une revue de littérature des principaux travaux relatifs au froid et ses effets sur les céréales et particulièrement le blé dur et les mécanismes de la tolérance au froid.

Le manuscrit comporte deux chapitres en plus d'une introduction générale et une conclusion.

1. Le premier chapitre présente une description générale des céréales et du blé dur en mettant l'accent sur leurs intérêts et importances économiques, Les contraintes de la culture du blé dur et les techniques de sa sélection dans ces milieux de production.
2. Le deuxième chapitre aborde
 - Les différents stress abiotiques qui affectent le blé dur,
 - Le froid (gel et basses températures) et ses effets sur la culture le blé dur.
 - Et enfin la sélection pour les basses températures avec quelques conseils pratiques
Pour atténuer l'effet du froid.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES CEREALES ET LE BLE DUR

Chapitre I : GENERALITES SUR LES CEREALES ET LE BLE DUR

I. Généralités sur les céréales

Le terme céréale désigne les graminées cultivées pour la production de leur grain, à l'exception du sarrasin qui fait partie de la famille des polygonacées (Benabdallah, 2016). Ces plantes appartiennent essentiellement à la famille des Poacées (ex graminées) auxquelles on associe parfois d'autres plantes, appelées par certains pseudo-céréales (Cruz *et al.*, 2019),

Depuis leur domestication, au Néolithique, les céréales ont constitué pour l'homme une ressource alimentaire riche en éléments nutritifs, peu volumineuses, facile à conserver et à transporter et bien adaptées aux milieux et aux climats les plus variés (Cruz *et al.*, 2019).

I.1- Les céréales dans le monde

Au début du XXI^{ème} siècle, les céréales fournissent encore près de la moitié des rations alimentaires de l'humanité et seront sans doute amenées à jouer un rôle fondamental face aux défis démographiques et environnementaux du siècle (Ammar, 2014).

Les céréales constituent environ 30% des sources énergétiques alimentaires dans les pays développés, contre plus de 50% dans les pays en voie de développement, atteignant parfois 90% dans certains pays d'Afrique (Benkadour, 2013)

Les céréales sont cultivées essentiellement pour leurs graines alimentaires, les espèces les plus cultivées sont le blé, le riz et le maïs ; à cela s'ajoute l'orge, le seigle, avoine, le sorgho, etc. Les blés sont présents partout dans le monde où 2 espèces sont particulièrement cultivées : le blé dur (*Triticum durum* Desf) c'est le blé de semoulerie par excellence ; le blé tendre (*Triticum aestivum*) (FAO, 2018)

La récolte de blé a lieu à différentes époques de l'année quelque part dans le monde : en mars en Inde, en mai en Chine, en juillet-août aux USA et Europe, Algérie, en Canada, en hiver en Argentine et Australie (Gharib, 2007).

I.2- Les céréales en Algérie

Les céréales, socle historique de la diète méditerranéenne, occupent encore aujourd'hui une place prépondérante à la fois dans la production agricole et agroalimentaire de l'Algérie et dans la consommation alimentaire des ménages (Rastoin et Benabderrazik, 2014)

La céréaliculture constitue la principale activité, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement emblavées représentent 3,6 millions d'hectares, soit 50% des terres labourées (MADR, 2007) et 80% de la surface agricole utile du pays (Missoumi, 2012). Ces cultures constituent la consommation de base qui est estimée à environ 205 à 228 kg par habitant et par an (Ait Abdallah-Djennadi *et al.*, 2010). Badrani (2004) rapporte que la production totale des céréales est très variable d'une année à une et est loin de couvrir la demande qui est de plus en plus importante, elle est d'ordre de 6.5 millions de tonnes. L'Algérie achète annuellement plus de 5% de la production céréalière mondiale, cette situation risque de durer plusieurs années, faute de rendements insuffisants et des besoins de consommation sans cesse croissants devant une forte évolution démographique (Chellali, 2007).

I.3-Importances économiques et production des céréales

a- Dans le monde

Selon la FAO (2021) la production mondiale des céréales estimée 2796 millions de tonnes, 723 millions d'hectares de céréales sont cultivés dans le monde, soit 52 % des terres arables, 14% de la surface agricole mondiale et 5 % des terres apparues du monde. En effet l'utilisation mondiale de céréales en 2021/2022 est de 2789 millions de tonnes avec notamment un record d'utilisation pour le riz, des hausses étant également pour maïs et le blé.

Selon les stocks mondiaux de céréales à la fin de la campagne de 2022 augmenter de 2.4 pour cent (figure 01) (FAO, 2022).



Figure 1: Production, utilisation et stocks mondiaux des céréales (FAO, 2022)

b- En Algérie

En Algérie, le secteur des céréales occupe une place vitale en termes socio-économiques et parfois politique (Ammar ,2014). Sur le marché mondial, l'Algérie demeure toujours parmi les grands importateurs de céréales (en particulier le blé dur et le blé tendre) faute de la faible capacité de la filière nationale à satisfaire les besoins de consommation croissants de la population. En effet, la production locale de céréales ne couvre qu'un peu plus de 30% des besoins du pays (figure 02) (Ammar ,2014)

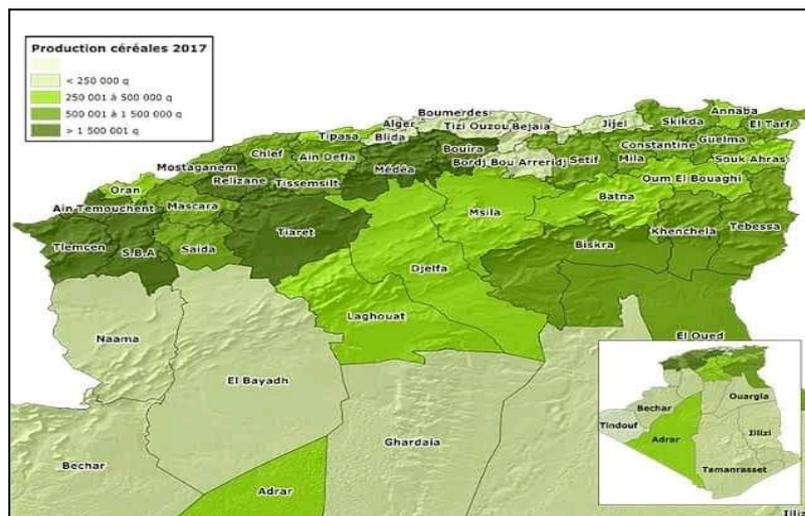


Figure 2: Les zones céréalières de l'Algérie

(<http://madrp.gov.dz/agriculture/statistiques-agricoles/>)

II. Généralités sur le blé dur (*triticum turgidum l. var. durum*)

II.1-Définition du blé dur

Le blé est une plante annuelle herbacée appartient à la classe des angiospermes, sous classes des monocotylédons et la famille des Poaceae, il fait partie du genre *Triticum* (Cook *et al.*, 1991). Aujourd'hui, deux espèces dominent la production mondiale, il s'agit du blé tendre (*Triticum aestivum*) et le blé dur (*Triticum durum* Desf) (Anne-laure, 2007).

La production de blé est facile car il s'adapte à des sols et des climats variés. L'existence de variétés adaptées à différents milieux et résistantes à de nombreuses maladies permet de cultiver le blé dans de nombreux pays, ses périodes de semis et de récoltes dans l'année sont différentes. Plus de vingt mille variétés de blé existent et des centaines de nouvelles variétés sont créées chaque année (Anne-laure, 2007) (figure 03 et 04)



Figure 3: Plantes de blé dur (Sadouki et Boutouchent , 2017)

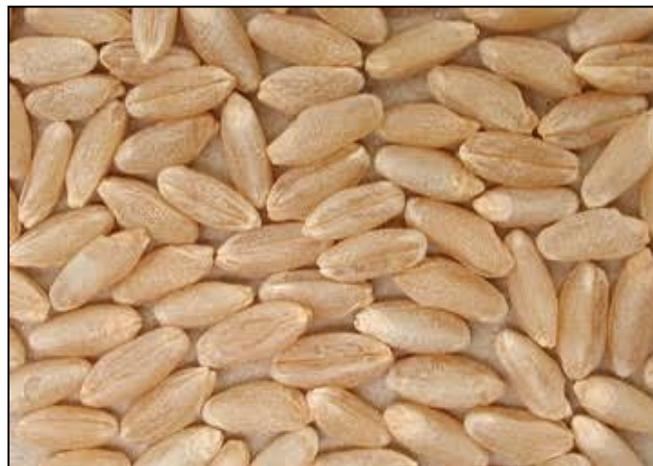


Figure 4: Les graines de blé dur (Sadouki et Boutouchent , 2017)

II.2-Originé géographique du blé dur

L'aire de distribution du blé dur est le sud-ouest de l'Asie et les Balkans. Sa domestication, suite aux découvertes archéologiques, remonterait au VII^e millénaire avant JC (Harlan, 1975).

Il était cultivé comme mélange avec l'orge et l'engrain dans l'ancienne Egypte. actuellement, la culture du blé dur est concentrée dans les pays du bassin méditerranéen, les Dakotas des Etats-Unis, le Canada, et l'Argentine (Harlan, 1975).

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 (figure 05).

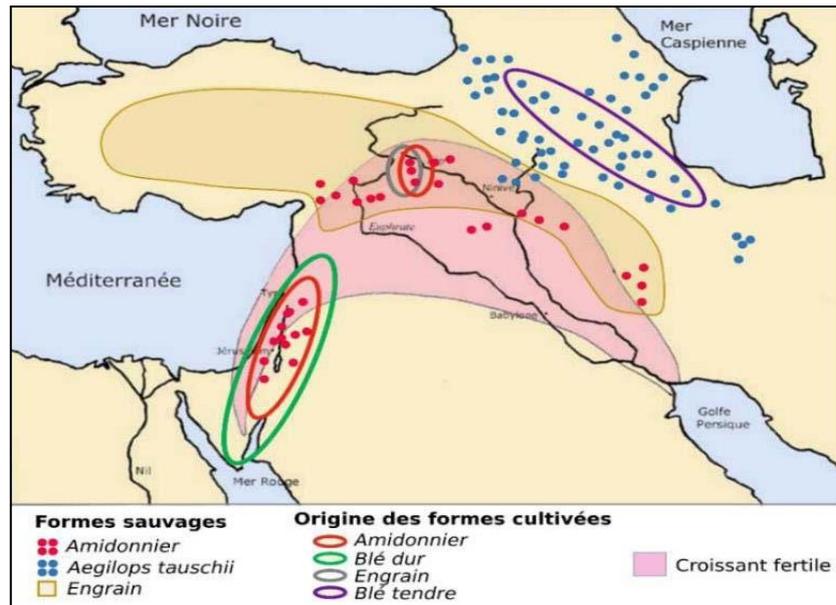


Figure 5: Origine géographique des blés cultivés (Dubcovsky et Dvosak, 2007)

II.3-Origine génétique de blé dur

L'origine génétique du blé dur remonte au croisement entre deux espèces ancestrales *Triticum monococcum* et une graminée sauvage du nom *Aegilops spelta*. Le blé dur (*Triticum durum* Desf) est appelé ainsi en raison de la dureté de son grain (Feillet, 2000). Le nombre chromosomique de base est de $2n = 4x = 28$, (donc fait partie du groupe des espèces tétraploïdes).

Le croisement naturel de *Triticum monococcum* (porteur du génome A) \times *Aegilops spelta* (porteur du génome B) a permis l'apparition d'un blé dur sauvage de type AABB (*Triticum turgidum ssp.dicocoides*) qui a ensuite progressivement évolué vers *Triticum turgidum ssp.dicococcum* puis vers *Triticum durum* (blé dur cultivé) (figure 06) (Feillet, 2000)

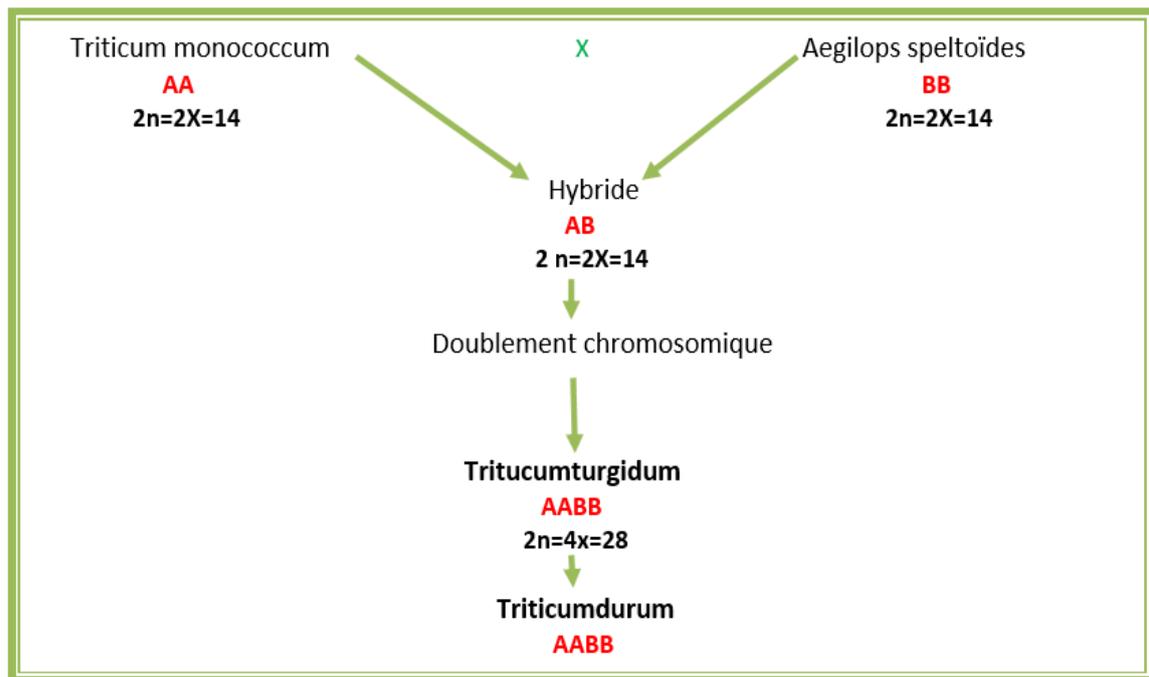


Figure 6: Origine génétique du blé dur (Debiton, 2010)

II.4- Importance et production du blé dur dans le monde et en Algérie

a- Le blé dur dans le monde

Selon FAOstat (2018) La production mondiale de blé dur ne constitue en moyenne que quelques 5% de la production totale mondiale. Au cours des 3 dernières années, elle a dépassé les 700 millions de tonnes (IGC 2014 ; FAO stat, 2015). La culture du blé dur est plutôt concentrée dans le pourtour méditerranéen, les plaines intérieures des USA, le Canada et le nord du Mexique, la Russie, le Kazakhstan, l'Australie, l'Inde et l'Argentine (figure 07) (Elias et Manthey, 2005).

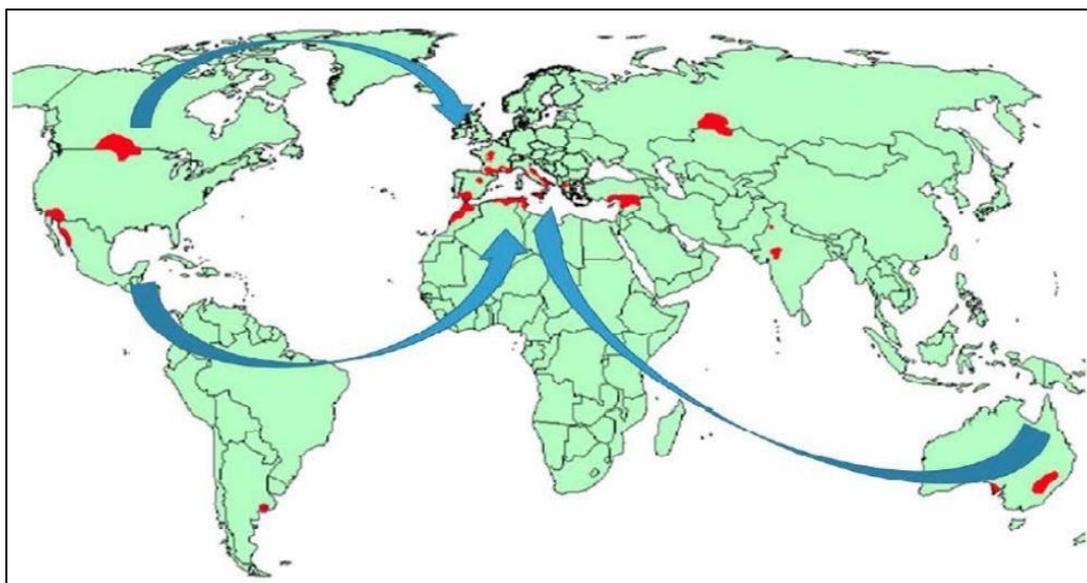


Figure 7: Lieux de production, routes d'échanges et d'utilisation du blé dur dans le monde (Ammar, 2015).

La récolte mondiale de blé dur en 2019, de 35,6 millions de tonnes, a été marquée par une forte baisse pour la plupart des pays producteurs et fournisseurs du marché mondial (excepté le Mexique) alors que la production des principaux pays consommateurs et acheteurs du marché a indiqué une hausse globale (figure 08). Les zones de production les plus touchées par la baisse sont : L'Union Européenne (dont la France en particulier mais aussi l'Espagne et l'Italie), Canada et les USA (CIC, 2019).

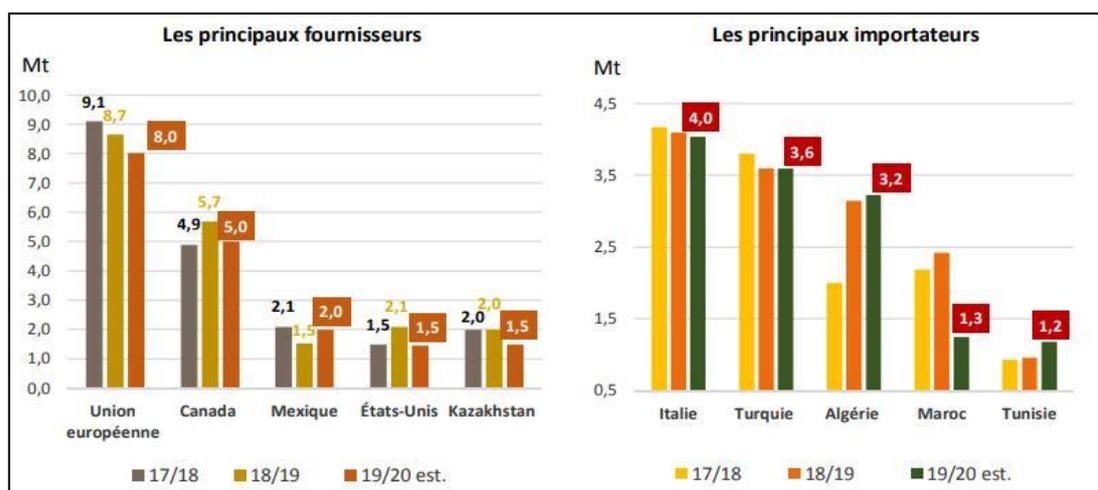


Figure 8: Evolution de la production mondiale du blé 2017-2020 (CIC/ USDA/Statcan, 2019).

La production du bassin méditerranéen varie considérablement car elle est dépendante de la pluie (Ammar, 2015). En Afrique du Nord et en Europe du Sud, les rendements sont fortement influencés par la sécheresse. Les besoins en blé dur des pays du bassin méditerranéen sont

supérieurs à ce qu'ils produisent, ce qui fait que chaque année, plus de 5 millions de tonnes sont importés. L'Italie est le principal importateur de blé dur avec une moyenne de 4,0 millions de tonnes. La Turquie et l'Algérie suivent avec des moyennes respectives, de 3.6 et 3.2 et 2.0 millions de tonnes (CIC/ USDA/Statcan, 2019).

b- Le blé dur en Algérie

La production des céréales en Algérie est conduite en extensif, elle constitue la principale activité, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement semées représentent 3,6 millions d'hectares et n'ont pas évoluées depuis plus d'un siècle (MissoumI, 2012), la superficie occupée par le blé dur est, en moyenne, de 1.3 millions d'hectares, durant la période 2010-2015 (MADR, 2017).

Le blé dur fait partie des céréales d'hiver en demeurant l'aliment de base des régimes alimentaires algériens et revête une importance stratégique dans la nutrition humaine et l'alimentation animale. Il occupe une place privilégiée dans l'agriculture algérienne (Boulai *et al.*, 2007). Ces régimes alimentaires sont basés principalement sur la consommation du couscous, des pâtes, du pain, et du frik (Benbelkacem *et al.*, 1995).

La production du blé pour la campagne 2019 /2020 est estimée à plus de 6 millions tonnes (UNA, 2020). Ceci revient à l'augmentation des surfaces exploitées d'environ 20% par rapport à l'année 2018. La capacité de production de blé a doublé ces dernières années et est passée à 6millions de tonnes en 2018 et 2019, contre 4.2 millions de tonnes en 2017, et environ 3,3 millions de tonnes en 2016 (figure 09) (UNA 2020).

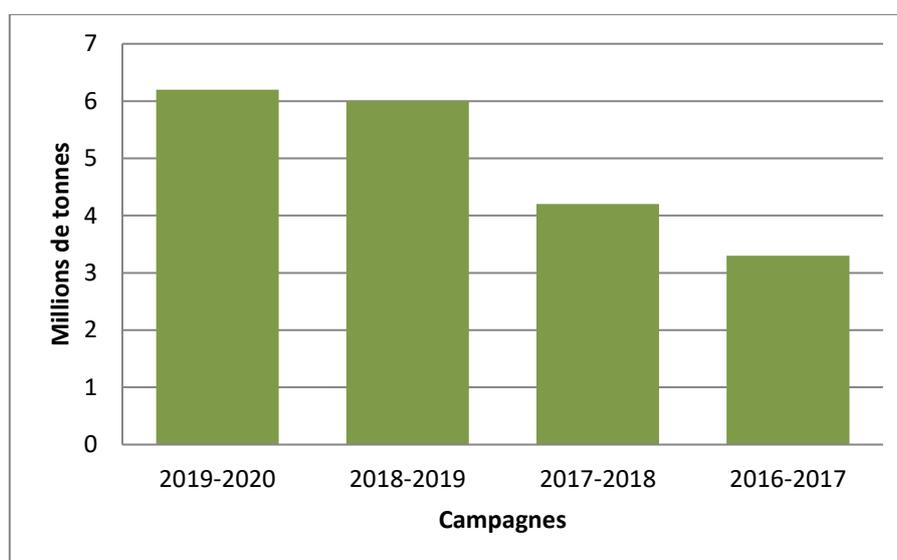


Figure 9: La production du blé en Algérie durant la période 2016 à 2020 (UNA, 2020)

II.5- Caractéristiques botaniques et morphologiques du blé dur (*Triticum durum* Desf)

a- Caractéristiques botanique et taxonomique

Le blé dur (*Triticum durum* Desf) est une monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la famille des Poaceae. La classification retenue est celle citée par Feillet (2000).

Tableau 1 : Classification de blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Embranchement	Spermaphytes
S/Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum turgidum sp durum</i>

(Feillet, 2000)

b- Caractéristiques morphologiques

b -1- Appareil végétatif

Le système aérien de la plante se développe en produisant un certain nombre de talles, qui se développent en tiges cylindriques formées par des nœuds séparés par des entre-nœuds. Chaque tige porte à son extrémité une inflorescence (Morsli, 2010).

Deux systèmes radiculaires se forment au cours de développement :

- Un système primaire qui ce sont des racines séminales qui fonctionnent de la germination au tallage.
- Un système secondaire, de type fasciculé, les racines partent des nœuds les plus bas et sont presque toutes au même niveau appelée (plateau de tallage) (figure 10) (Morsli, 2010)

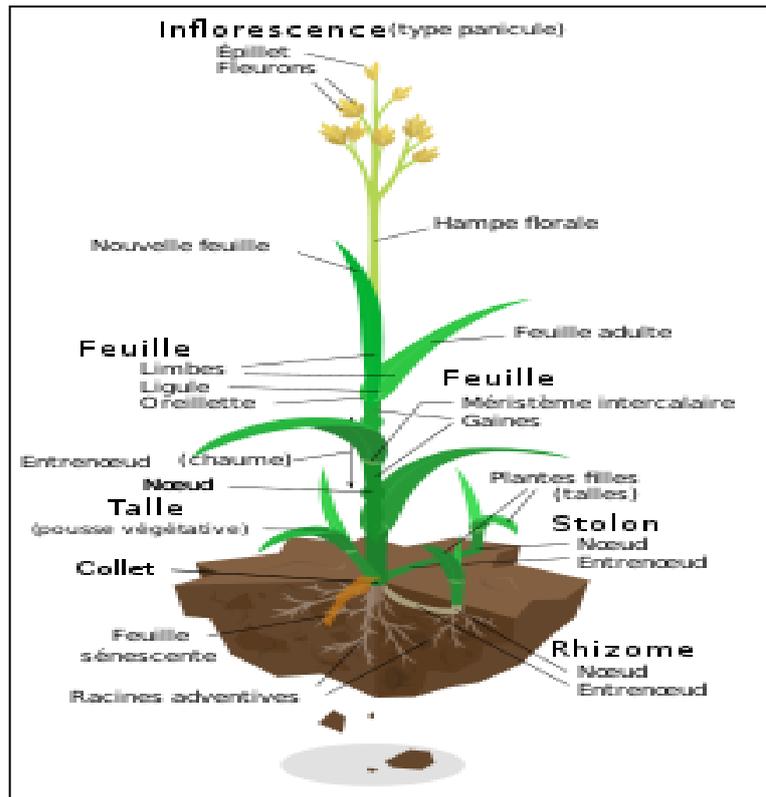


Figure 10: Une graminée typique de blé dur (Sadouki et al., 2018)

b-2- Appareil reproducteur

Les fleurs sont groupées en inflorescences de type épi, ce dernier est composé d'épillets, qui est une petite grappe d'une à cinq fleurs enveloppées chacune par deux glumelles (figure 11) (Moule, 1971). L'épi est constitué d'un axe appelé rachis sur lequel sont fixés les épillets (Belaid, 1996). Le blé est une plante monoïque à fleurs parfaites, qui se reproduisent par voie sexuée et par l'autofécondation (espèce autogame). Il existe un pourcentage faible (< 3%) de pollinisation croisée (Mekoussi, 2015)

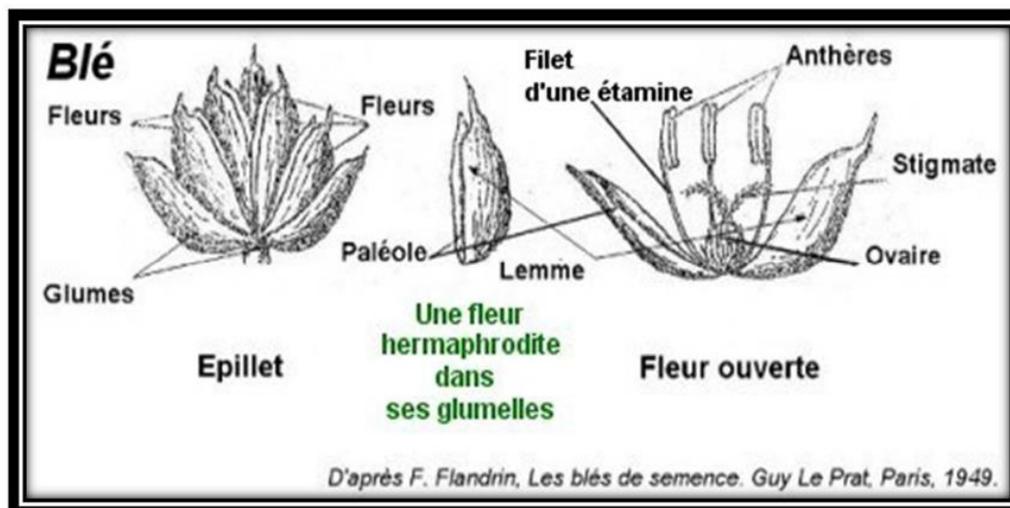


Figure 11: Épillet et fleur de blé (Flandrin, 1949)

b-3- Le grain de blé

Le grain de blé est constitué de trois grandes parties : le germe, l'albumen et les enveloppes (figure 12). Il est constitué majoritairement d'amidon qui représente environ 70% de la matière sèche du grain et qui est situé dans l'albumen (Pomeranz, 1988). Les protéines représentent entre 10 et 15% de la matière sèche et se retrouvent dans tous les tissus du grain de blé avec une concentration plus importante dans le germe et la couche d'aleurone (Pomeranz, 1988). Les pentosanes (polysaccharides non amylacés) représentent quant à eux entre 2 et 3% de la matière sèche et sont les principaux constituants des parois cellulaires de l'albumen (70 à 80%) (Pomeranz, 1988).

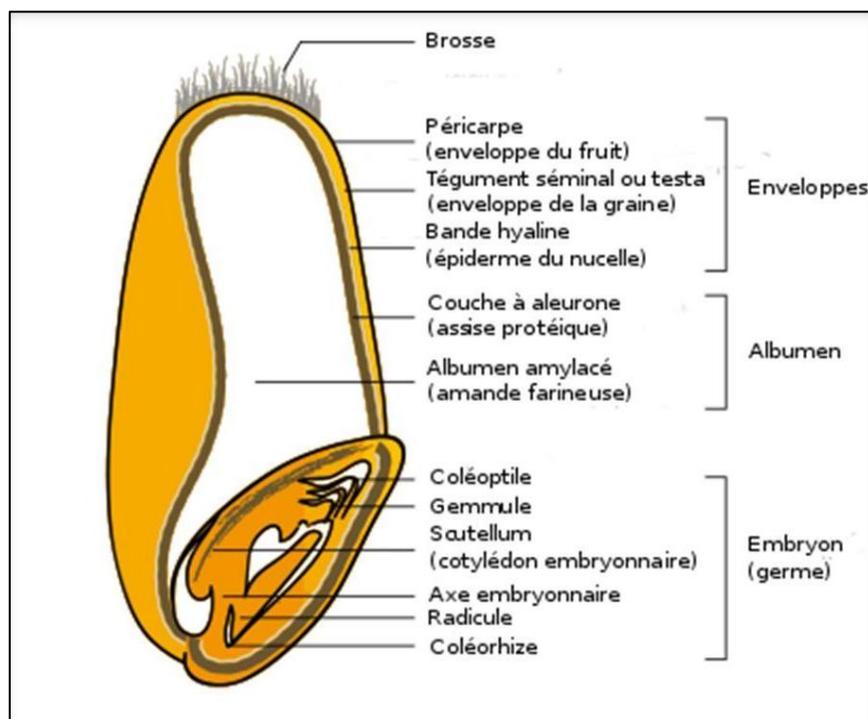


Figure 12: Structure schématique d'un grain de blé (coupe longitudinale)

(Adapté de Surget *et* Barron, 2005)

II.6 -Le cycle de développement du blé

Afin de caractériser le cycle de développement du blé, différentes échelles de notation ont été développées, portant soit sur des changements d'aspect externe, soit sur les modifications d'aspect interne des organes reproducteurs.

L'échelle de Jonard et Koller (1950) utilisée pour reconnaître les stades par des changements d'aspect externe (Levée - Montaison).

L'échelle de Zadoks *et al*, (1974) utilisée pour reconnaître les stades par des modifications d'aspect interne (différentiation de l'épi : Stade épi 1 cm) (Gate, 1995). Le cycle biologique du blé est une succession de périodes subdivisées en phases et en stades (figure, 13)

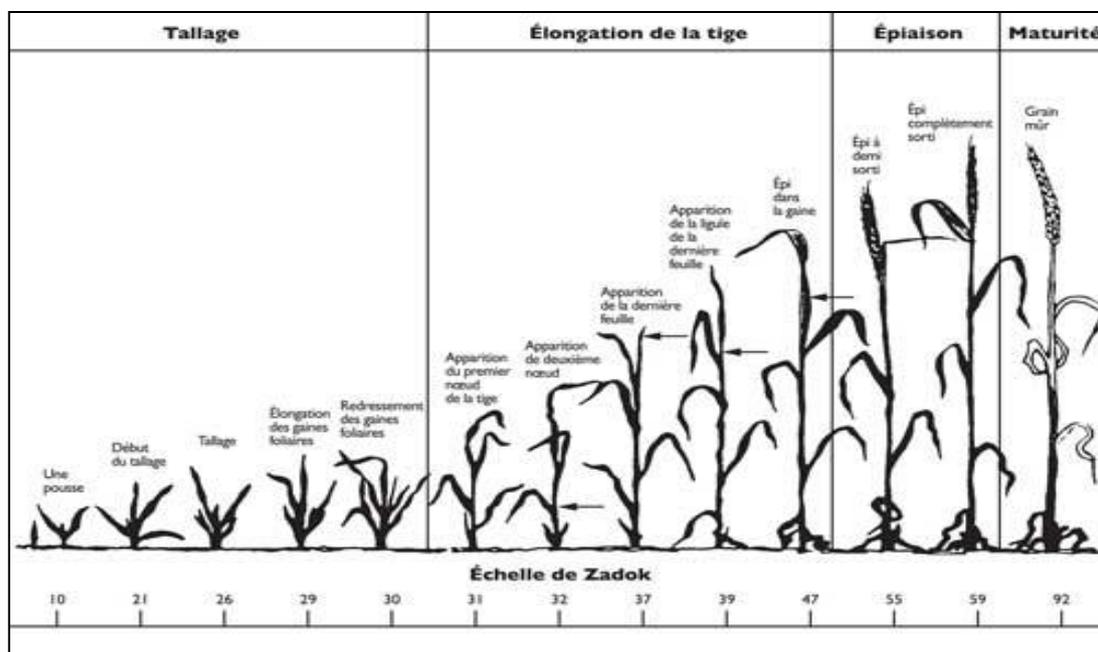


Figure 13: Les stades du développement de blé dur (Masle, 1980).

1. La période végétative

Elle se caractérise par un développement strictement herbacé. Elle se divise en deux phases :

1.1- La phase germination – levée

Les conditions requises étant réalisées (température, humidité, etc.), le grain de blé va germer (Claire, 2013). La germination de la graine se caractérise par l'émergence du coléorhize donnant naissance à des racines séminales et de la coléoptile qui protège la sortie de la première feuille fonctionnelle (Masle-Meynard, 1980). La levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol (Gate, 1995).

Au sein d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis sont visible

Durant la phase semis levée, l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système racinaire primaire et des réserves de la graine. (Gate, 1995).

1.2- La phase levée – tallage

La production de talles commence à l'issue du développement de la troisième feuille (Moule, 1971). L'apparition de ces talles se fait à un rythme régulier à celui de l'émission des feuilles. A partir des bourgeons situés à l'aisselle des talles primaires initiées à la base du brin maître, les talles secondaires peuvent apparaître et être susceptibles d'émettre des talles tertiaires. Le nombre de talles produites dépend de la variété, du climat, de l'alimentation minérale et hydrique de la plante, ainsi que de la densité de semis (Masle-Meynard, 1980).

La fin du tallage représente 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-nœuds (figure, 14) (Gate, 1995).

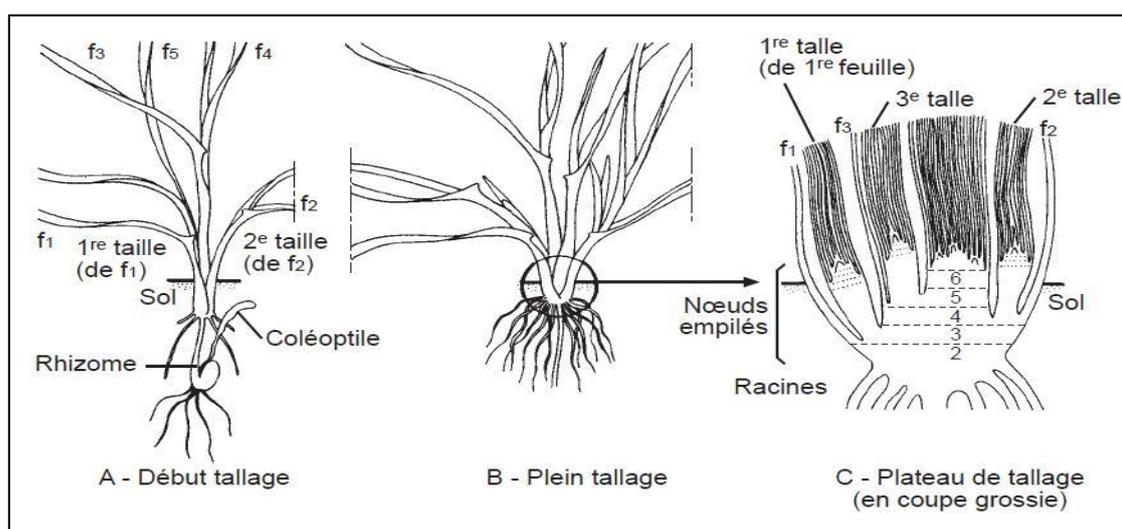


Figure 14: Culture de céréale au stade de tallage (Boyeldieu ,1999)

2. La période reproductrice

2.1- La phase montaison – gonflement

La période reproductrice se caractérise par la formation et la croissance de l'épi. Elle s'étend du stade épi-1cm, montaison, au stade de la floraison. À cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus (Clement - Grancourt et Prats, 1971).

La montaison débute à la fin du tallage. Elle se distingue par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales.

La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine (Clement - Grandcourt et Prats, 1971).

2.2- La phase épiaison – floraison

Elle est marquée par la méiose pollinique et l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation. Cette phase est atteinte quand 50 % des épis sont à moitié sortis de la gaine de la dernière feuille (Gate, 1995). Elle correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de grains par épi (Masle-Meynard, 1980). La figure 15 résume le cycle biologique du blé dur.

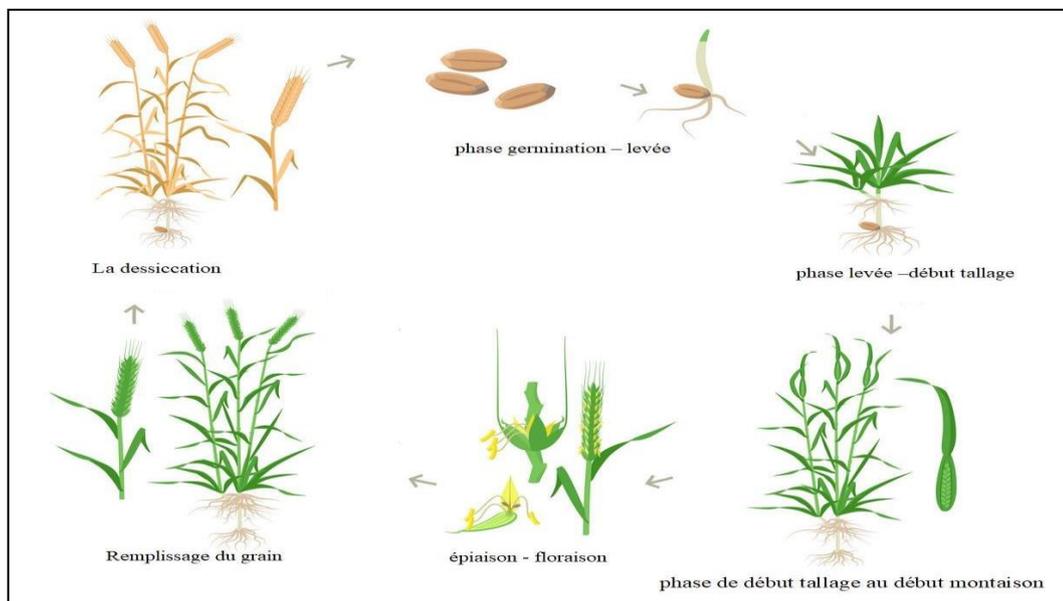


Figure 15: Le cycle de développement de la plante de blé dur (Bouزيد, 2021)

III. Les contraintes de la culture de blé dur

La culture de blé dur est conduite en zone semi-aride et se trouve confrontée à plusieurs contraintes d'ordre climatiques, pédologiques, culturelles, économiques qui ont une incidence sur le niveau de la production (Baldy, 1992).

Le degré de déficit de la balance commerciale agricole depuis près d'un demi-siècle, démontre que l'Algérie présente un profil de dépendance alimentaire structurel qui interpelle sérieusement sur le devenir de la sécurité alimentaire du pays (Nelson et al., 2009).

III.1 -Les conditions climatiques

La culture de blé dur est soumise aux effets d'un climat fortement variable (Baldy, 1974 ; Annichiarico *et al.*, 2002 ; 2006).

Les stress de nature hydriques et caloriques (gel et hautes températures) affectent la croissance et le développement de la plante tout au long de son cycle (Baldy, 1992 ; Bouzezour et Monneveux, 1999, Mourret *et al.*, 1988 ; in Bouzezour *et al.*, 2002).

La pluviométrie reste un facteur prédominant qui conditionne fortement les récoltes (Feliachi, 2000). L'irrégularité des précipitations d'automne rend l'opération préparation du sol difficile et l'installation de la culture se fait souvent dans des conditions médiocres (Abbassene, 1997).

Le manque d'eau se fait sentir à partir du mois de mars et devient assez prononcé dès le mois d'Avril (Bouzezour *et al.*, 2002). La rareté des pluies printanières engendre toujours une mauvaise récolte (Feliachi, 2000). Selon Abbassene (1997), les cultivars se développent peu, au cours de la période où se concentrent plus de 70% des eaux de pluies qui sont de ce fait non valorisées. Bouzezour *et al.*, (2002) estiment que l'épiaison qui se réalise au cours du mois d'avril est plus intéressante pour éviter le stress hydrique.

Le manque d'eau est plus à craindre dès le mois de Mai, à partir duquel les pluies se font rares et les températures de plus en plus fortes, dont les effets sont accentués le plus souvent par des vents chauds et desséchants en fin de cycle (Hachemi, 1979). Ceci se traduit par une forte demande climatique qui accroît les besoins en eau de la plante au moment où se détermine le rendement (Baldy, 1974; Kribaa, 1990).

La période sans déficit hydrique est l'hiver mais les basses températures incitent peu la plante à tirer profit de l'humidité disponible dans le sol en cette période.

Les gelées tardives du printemps constituent une autre contrainte pour les céréales localisées en zones d'altitudes. Ces dernières coïncident généralement avec le stade méiose-épiaison, stérilisant le grain de pollen et détruisant l'ovaire naissant (Abbassene, 1997).

On constate que le stress hydrique agit en interaction avec d'autres stress abiotiques tels que les basses et hautes températures et aussi l'excès de luminosité comme l'ont signalé Monneveux et Belhassen (1996).

III.2 -Les techniques culturales

La faiblesse des rendements, due essentiellement aux contraintes du milieu, pousse l'agriculteur à prendre le moins de risque en ce qui concerne les techniques culturales. Il réduit le plus souvent l'itinéraire technique de plusieurs opérations culturales pour diminuer les charges (Moris *et al*, 1991). On signale à ce sujet le peu de souci accordé à la préparation du sol et celle du lit de semence, opérations qui interviennent certes après cinq mois de sécheresse, mais qui conditionnent le rendement en grain (Mouret *et al*, 1991). Ces contraintes constituent un handicap majeur à l'amélioration des rendements.

L'amélioration des techniques de production est centrée, de plus en plus, autour de l'efficience d'utilisation de l'eau (Richards *et al.*, 2002 ; Chenaffi *et al.*, 2006).

Aussi, les techniques traditionnelles de labour exposent le sol aux phénomènes d'érosions hydrique et éolienne, détruisent la matière organique, dégradent la structure des sols et réduisent la productivité des cultures (Bouzerzour *et al.*, 2006).

III.3- Les variétés

L'amélioration de la production en blé dur est liée au potentiel de production du matériel végétal utilisé. En effet des résultats satisfaisants peuvent être obtenus en zones plus favorables, suite à l'adoption de techniques culturales appropriées et l'utilisation de variétés plus performantes (Benbelkacem, 1996).

La faiblesse des rendements réalisés en blé dur est attribuée en partie au matériel génétique utilisé.

Le matériel d'introduction, au haut potentiel génétique très exigeant éprouve des difficultés d'adaptation aux conditions très variables du milieu de culture (Bouzerzour et Djekoun, 1996). Il ne présente pas toujours les caractéristiques recherchées par les agriculteurs, dont le système de production dominant est l'association céréaliculture - élevage. Ces caractéristiques sont une production de paille et de grain acceptable, même en années difficiles (Ceccarelli *et al*, 1992).

En effet, les variétés nouvelles se caractérisent par une réduction de la hauteur, suite à l'introduction des gènes de nanisme qui semble s'accompagner aussi d'une réduction du système racinaire (Hurd, 1974; Berger et Planchon, 1990; Subira *et al.*, 2016). La masse et le volume racinaire plus réduit de ce matériel relativement aux variétés locales semblent expliquer en partie ce comportement (Benlaribi *et al.* 1990). Compte tenu des contraintes rencontrées, Hachemi

(1979) suggère qu'il est nécessaire d'identifier les caractères morpho-physiologiques qui doivent caractériser une variété idiotype pour s'adapter à ces zones assez spécifiques.

L'amélioration doit donc s'orienter vers la recherche de variétés plus stables, plus performantes (Benbelkacem, 1996) en ce qui concerne les productions de grain et de paille, et plus adaptées vis-à-vis des aléas climatiques majeurs (évitement du gel, une plus grande tolérance à une sécheresse de nature intermittente) (Benlaribi *et al* 1990).

Blum *et al.* (1999) ; Araus *et al.* (2002) suggèrent la recherche d'indicateurs de la capacité de la plante à faire une bonne utilisation de l'eau, sous stress hydrique, est un préalable à la réalisation de progrès en matière d'amélioration du rendement sous contrainte hydrique.

Ainsi l'emploi de variétés adaptées, suite à leur cycle de développement plus court, esquivant les contraintes climatiques de fin de cycle, ou bien possédant une résistance intrinsèque, permet aussi de donner une certaine régularité à la production (Giunta *et al.*, 1993; Passioura, 2002).

Fellah *et al.*, (2002) ; Bahlouli *et al.*, (2005) déclarent que la sélection pour la tolérance induit, certes, une baisse des rendements sous contrainte, mais cette baisse est cependant moins importante chez les génotypes tolérants comparativement à celle notée chez les génotypes sensibles

IV. Les différentes approches de sélection du blé dur

Choisir ses variétés, est une des premières décisions du sélectionneur et de l'agronome, engage largement le résultat final. L'amélioration variétale des céréales a connu depuis longtemps une attention particulière. L'objectif d'amélioration fixé est compromis entre les objectifs de production, de qualités technologiques et de résistance aux maladies et l'adaptation aux différentes zones agro-écologiques (Benmahammed *et al.*, 2010 ; Adjabi *et al.*, 2014 ; Salmi *et al.*, 2015 ; Fellahi *et al.*, 2016). Les variétés peuvent également avoir un effet indirect, sur les performances de la céréale en ayant des comportements différents vis-à-vis des facteurs potentiels expliquant la variabilité du rendement (Amokrane, 2001).

L'amélioration génétique du blé dur des zones sèches reste basée sur la recherche d'une meilleure tolérance aux stress abiotiques, pour adapter la plante à la variabilité du milieu de production (amokrane, 2001). Sous les conditions agro climatiques de culture, le blé subit tout au long de son cycle , de nombreuses contraintes qui influent de manière variable sur le potentiel de production. Bouzerzour et Benmahammed (1994) rapportent que la variation des rendements des

céréales des zones semis arides tire son origine en grandes parties des effets de ces contraintes abiotiques.

IV.1- La sélection sur le terrain

La production céréalière des zones pluviales sèches est faible et très irrégulière dans l'espace et le temps (Ceccarelli *et al.* 1991).

La stabilité du comportement des génotypes, face à la variation des milieux, ou adaptabilité, est une caractéristique indispensable qui doit exister chez les nouvelles obtentions (Ben mahammed *et al.*, 2010 ; Haddad *et al.*, 2016).

Ainsi, la recherche d'une meilleure adaptation à la variation environnementale est devenue une nécessité pour stabiliser les rendements des régions où le blé est cultivé (Ben mahammed, 2005).

La variation des rendements en grains est engendrée par la sensibilité des nouveaux cultivars aux divers stress climatiques qui caractérisent le milieu de production. Richard *et al.* (1997) proposent dans ce contexte que les approches physiologiques sont les plus recommandées pour sélectionner le blé dans ces environnements.

La recherche basée sur les mécanismes qui contrôlent la tolérance et l'adaptation et la tolérance des génotypes est de plus en plus adoptée. Seulement cette sélection est confrontée à des difficultés qui résident dans le grand nombre de facteurs (Araus *et al.* 1998). Ces derniers agissent à plusieurs niveaux organisationnels, partant de la cellule jusqu'à l'échelle de la plante entière. Il est difficile d'identifier celui qui est le plus opérant et qui permet de faire le meilleur progrès possible dans un environnement donné (Acevedo, 1992, Araus *et al.* 1998).

Les caractères qui favorisent l'adaptation sont nombreux et variables en fonction des environnements

Le caractère le plus utilisé en sélection est le rendement. Cette sélection directe s'est révélée le plus souvent inefficace dans l'identification de génotypes adaptés (Roseille et Hamblin, 1981). Elle reste inefficace en ce qui concerne la stabilité. Les caractères qui favorisent l'adaptation sont nombreux et variables en fonction des environnements (Richard *et al.*, 1997).

La sélection pour la hauteur de la plante est une importante caractéristique d'adaptation aux contraintes de l'environnement. Selon Subira *et al.* (2016) et Rabti *et al.*, (2020) une hauteur

importante induit la production d'une biomasse importante, ce qui est désirable, mais ceci au détriment du rendement en grain. Par contre, une réduction importante de la hauteur améliore, le nombre d'épis et le rendement mais au détriment de la longueur du système racinaire et la production de la paille (Berger et Planchon, 1990).

Belkherchouche (2015) suggère que la sélection doit tenir compte de la taille de l'épi, de la durée de vie des glumes, de la longueur et de la densité des barbes, du rendement par m² et par épi, du poids de 1000 grains, du poids spécifique et de la longueur du dernier entre-nœud et du col de l'épi.

Abbassenne *et al.* (1998) rapportent que la tardivité fait courir le risque du déficit hydrique et des hautes températures de fin de cycle. Selon Lafitte et Courtois (2002), Les génotypes précoces sont plus productifs sous contraintes hydrique et thermique en fin de cycle.

IV.2 -La sélection assistée par des marqueurs

La découverte des marqueurs moléculaires de l'ADN nucléaire ouvre une nouvelle aire pour la sélection classique (Upov, 1994). En rendant possible l'identification et l'étiquetage de certains gènes, cela permet de rendre plus efficace la gestion et la manipulation de la variabilité génétique pour construire des génotypes cumulant des gènes ou des associations de gènes favorables (Upov, 1994).

Grâce aux marqueurs nucléaires il devient en effet possible d'une part, de mieux lire le génotype à travers le phénotype et d'autre part, de contrôler les recombinaisons entre locus en cause (Gallais, 1994; Najimi *et al.* 2003). Ceci est d'autant plus intéressant que les marqueurs moléculaires sont relativement peu influencés par la fluctuation environnementale (Gallais, 1994; Najimi *et al.* 2003).

Ils sont aussi indépendants de l'organe mesuré ou analysé et du stade de développement du sujet concerné (Gallais, 1994 ; Najimi *et al.* 2003). Paterson *et al.* (1991) montrent l'existence de QTL (quantitative traits loci) spécifiques pour l'adaptation à certains milieux. Pour obtenir donc des variétés stables il faut accumuler dans un même fond génétique le maximum de QTL d'adaptation.

La sélection assistée par des marqueurs devient de plus en plus un complément nécessaire aux schémas de sélection classique d'amélioration des céréales (Hospital, 2001).

Chapitre II

LES EFFETS DE BASSES TEMPERATURES SUR LE BLE

Chapitre II : LES EFFETS DE BASSES TEMPERATURES SUR LE BLE

Introduction

Une plante accomplit sa croissance maximale et donne un bon rendement, lorsqu'elle pousse dans des conditions d'environnement optimales. Les conditions optimales diffèrent d'une espèce à l'autre, et lorsqu'un ou plusieurs facteurs de l'environnement s'écartent suffisamment de l'optimum dans un sens ou dans l'autre, de sorte que la croissance et la productivité soient réduites, la plante est considérée comme étant stressée (Coude- Gaussen et Rogno, 1995).

Le plus souvent, les végétaux sont soumis aux contraintes de l'environnement entre autres: le vent, la sécheresse (Giraud et *al* 2008), la lumière (Nam et *al.*, 2003; Giraud et *al* 2008), la salinité, (Luhua et *al.*,2008), les hautes ou les basses températures (Larkindale et Vierling ,2007; Juan et *al* 2008), les métaux lourds (Klein et *al.*,2008).

Sha Valli Khan et *al.* (2014) résument les réponses des plantes aux différents stress abiotiques dans la figure 16.

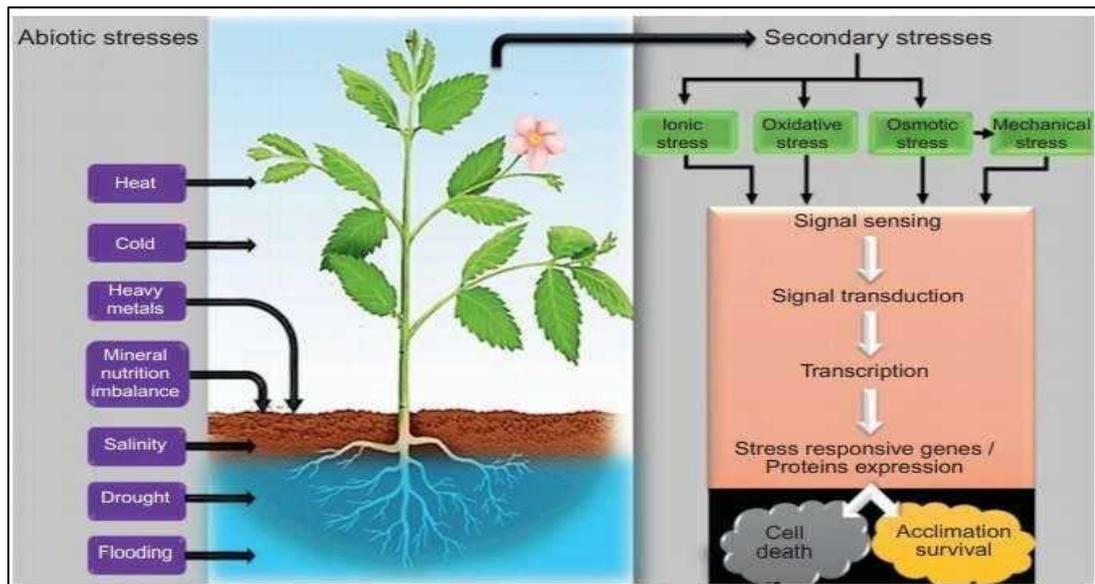


Figure 16: Réponse de la plante aux différents stress abiotiques (Sha Valli Khan et al., 2014)

Les stress environnementaux nés de la fluctuation des facteurs abiotiques et biotiques affectent les conditions de croissance et le rendement végétal figure 16 (Ashraf *et al.*, 2012).

Contrairement aux animaux qui peuvent se déplacer lorsque les conditions de vie deviennent défavorables, les plantes ont développé des stratégies d'adaptation fondées sur

le contrôle et l'ajustement de leurs systèmes métaboliques (Subramanyam *et al.*, 2008). Les plantes déclenchent plusieurs mécanismes qui les font résistantes avec la formation de nouvelles molécules et des mécanismes moléculaires de tolérance (Desclos *et al.*, 2008 ; Ishida *et al.*, 2008).

Les végétaux perçoivent les signaux environnementaux et les transmettent à la machinerie cellulaire pour activer des mécanismes de réponses. La connaissance de ces réponses, basées sur la transduction des signaux de stress, est donc la base des études visant à améliorer la réponse des plantes cultivées aux différents stress (Laurent et Ahmed 1999). La voie de transduction du signal commence par sa perception au niveau de la membrane végétale, suivie par la production de seconds messagers et de facteurs de transcription. Ces facteurs de transcription contrôlent alors l'expression des gènes impliqués dans la réponse au stress, incluant des changements morphologiques, biochimiques et physiologiques (Stitt et Hurry 2002).

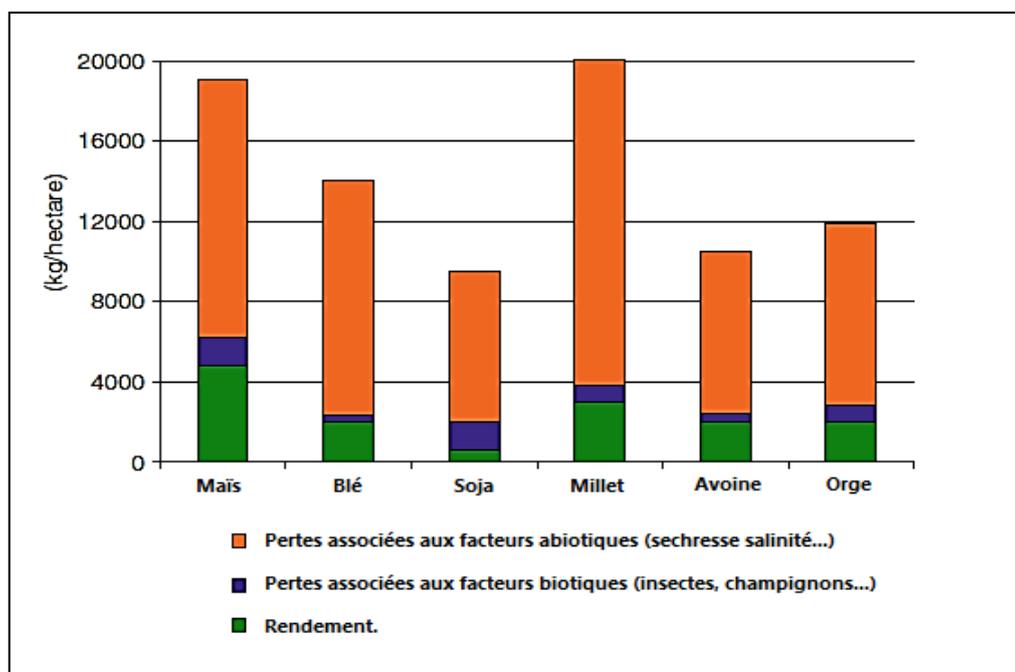


Figure 17: Pertes agricoles dues aux facteurs biotiques et abiotiques au niveau planétaire (Ashraf *et al.*, 2012).

Dans ce chapitre nous aborderons les stress abiotiques en mettant l'accent sur le stress thermique et plus précisément le stress froid (basses températures et gel). Ce stress a été largement étudié (Riva-Roveda et Périlleux, 2015) et mérite plus d'attention. D'après Yadav (2010), le stress dû au froid est l'une des causes majeures des pertes agricoles. Les conséquences de ce type de stress sont variées voire très sévères menant à la destruction totale de la plante.

I. NOTION DE STRESS

En 1935, Hans Selye fut le premier à avoir utilisé le terme stress. Il l'a défini comme une « réponse non spécifique de l'organisme à toute sollicitation ». D'origine anglaise, le mot « stress » était employé en mécanique et en physique signifiant « force, poids, tension, charge ou effort ».

Le terme « stress » définit l'ensemble des perturbations biologiques provoquées par une agression quelconque sur un organisme (Bouchoukh, 2010). C'est un processus qui induit une contrainte potentiellement néfaste sur un organisme vivant (Bouchoukh, 2010).

Le stress chez les plantes apparaît avec des significations différentes en biologie, le terme stress est attribué à n'importe quel facteur environnemental défavorable pour une plante (Levitt, 1982).

Selon Jones et Jones, (1989), le stress est une force ou une influence hostile qui tend à empêcher un système normal de fonctionner (Hopkins, 2003).

En biologie végétale, Le terme « stress » représente les facteurs responsables des perturbations, et des changements, plus ou moins brusque par rapport aux conditions normales de la plante subies au cours de son développement (Bouchoukh, 2010).

Selon Lambers et *al.* (2008), le stress est un facteur environnemental qui tend à réduire la vitesse de certains processus physiologiques, de sorte qu'elle devient inférieure à la vitesse maximale que la plante pourrait soutenir dans des conditions non stressantes ».

Benkoli et Bouzeghaia (2016) rapportent que le stress signifie la déviation dans le développement et les fonctions normales de la physiologie des plantes, il est perçu au niveau cellulaire puis transmis à la plante entière. Le changement dans l'expression des gènes qui s'ensuit modifie la croissance et le développement, et influence les capacités reproductives de la plante, causant ainsi des dommages aux plantes.

Si le stress devient sévère et/ou persiste une longue période, il peut induire la mort des plantes (Guo et David ho, 2008).

Hopkins (2003) résume le stress étant l'ensemble des conditions qui provoquent des changements des processus physiologiques résultant éventuellement en dégâts, dommages, blessures, inhibition de la croissance ou de développement.

1. Le froid

Charrier (2011) le définit comme étant un état thermodynamique pour lequel les molécules ont une faible énergie cinétique et l'on considère généralement qu'une température inférieure à 5°C est froide, du moins en biologie.

Le froid n'est qu'une grandeur relative soumise à l'appréciation de l'observateur (Charrier, 2011).

2. Le gel

Le gel est un terme, n'est utilisée que lorsque la température est inférieure à la température de cristallisation de l'eau pure. En deçà de cette température, l'eau passe de l'état liquide (arrangement désordonné des molécules) à l'état solide (arrangement ordonné par établissement de 4 liaisons hydrogènes par molécule d'eau formant une structure cristalline) sous forme de glace ou de neige (Charrier, 2011).

3. Acclimatation

C'est l'adaptation morphologique et physiologique des plantes « à l'état d'individu » pour compenser la baisse de la performance suite à la réponse initiale au stress.

L'acclimatation se produit en réponse aux changements environnementaux grâce à des changements dans l'activité ou la synthèse de nouveaux constituants biochimiques tels que des enzymes, souvent associés à la production de nouveaux tissus. Ces changements biochimiques, déclenchent alors une cascade d'effets observés à d'autres niveaux d'organisation, comme des changements dans le taux ou la sensibilité à l'environnement d'un processus spécifique (par exemple, la photosynthèse), le taux de croissance des plantes entières, et la morphologie des organes ou de la plante entière.

L'acclimatation au stress se produit toujours dans la vie d'un individu, généralement dans un intervalle de quelques jours à plusieurs semaines ; comme elle peut être démontrée en comparant des plantes génétiquement semblables qui sont exposées à des environnements différents.

4. Endurcissement

La plante est capable de s'endurcir au froid si elle rencontre des températures fraîches au préalable. Cet endurcissement peut être rapide, 1 ou 2 jours à des températures proches du gel

suffisent pour élever le niveau de résistance au froid de la plante. Il est d'autant plus efficace que les températures sont froides sans être létales. Plus les conditions favorables à l'endurcissement se prolongent, plus la résistance progresse (Deswarte, 2019).

5. Adaptation

L'adaptation est la réponse évolutive résultant de modifications génétiques dans les populations qui tendent à compenser la baisse de rendement (performances) causée par le stress.

Les mécanismes physiologiques de la réponse sont souvent similaires à celles de l'acclimatation, parce que les deux exigent des changements dans l'activité ou la synthèse des constituants biochimiques et provoquer des changements dans les taux des différents processus physiologiques, le taux de croissance et la morphologie etc...

L'adaptation, diffère de l'acclimatation en ce qu'elle exige des changements génétiques dans les populations et par conséquent nécessite généralement de nombreuses générations pour se produire. On peut étudier l'adaptation en comparant des plantes génétiquement distinctes poussant dans un environnement identique.

6. Résistance, Evitement et Tolérance

Divers termes sont utilisés pour caractériser le comportement (réponse) des plantes en fonction des mécanismes et stratégies déclenchées chez celles-ci pour survivre dans des conditions environnementales extrêmes.

a- La tolérance

La tolérance est « la capacité à supporter une contrainte interne engendrée par un stress appliqué à l'extérieur ».

Autrement dit, elle correspond aux changements physiologiques et biochimiques qui réduisent l'impact de la contrainte sur le protoplasme ou réparent les dommages causés par le stress. Exemple, la capacité de survivre à une faible teneur en eau dans les cellules.

Aussi la tolérance C'est la capacité de maintenir une activité métabolique. Cette activité assure l'intégrité fonctionnelle aux structures cellulaires et autorise la reprise des activités de la plante dès que les conditions de croissance redeviennent plus normales.

b- L'évitement

Prend forme grâce au maintien, par divers mécanismes, d'un état interne satisfaisant. Cet état permet à la plante de continuer ses activités métaboliques sans être fortement perturbée par le milieu extérieur qui peut être très stressant (Levitt,1980).

En d'autres termes l'évitement est « la capacité de prévenir un stress appliqué à l'extérieur de produire une contrainte interne équivalente ». Exemple, la capacité à maintenir une forte teneur en eau cellulaire, même lorsque le Ψ externe est faible.

c- La résistance

La résistance au stress est définie comme étant « la capacité à endurer un stress appliqué à l'extérieur ». Exemple, la capacité de survivre à un faible Ψ externe (Ψ = potentielhydrique).

La résistance peut être réalisée soit par l'évitement, soit par la tolérance au stress, ou bien une combinaison des deux, à divers degrés

7. L'esquive

Est la situation où la plante, grâce à un rythme de développement spécifique, réussit à s'harmoniser à l'environnement de production, en échappant partiellement ou complètement au stress (Levitt,1980).

II. LES TYPES DES STRESS

Deux types de stress peuvent affecter les plantes à savoir :

a- Les stress biotiques

Causés par des organismes vivants (champignons, bactéries, virus, nématodes, insectes, etc.). Afin d'y faire face, la plante met en place un système de défense qui fait intervenir une chaîne de réactions telle que les protéines végétales défensives Figure 17 (Shilpi et Narendra, 2005).

b- Les stress abiotiques

Causés par des facteurs environnementaux tels que la sécheresse, le gel, les déficiences en nutriment, le vent, etc... (Figure 18) (Marion , 2016)

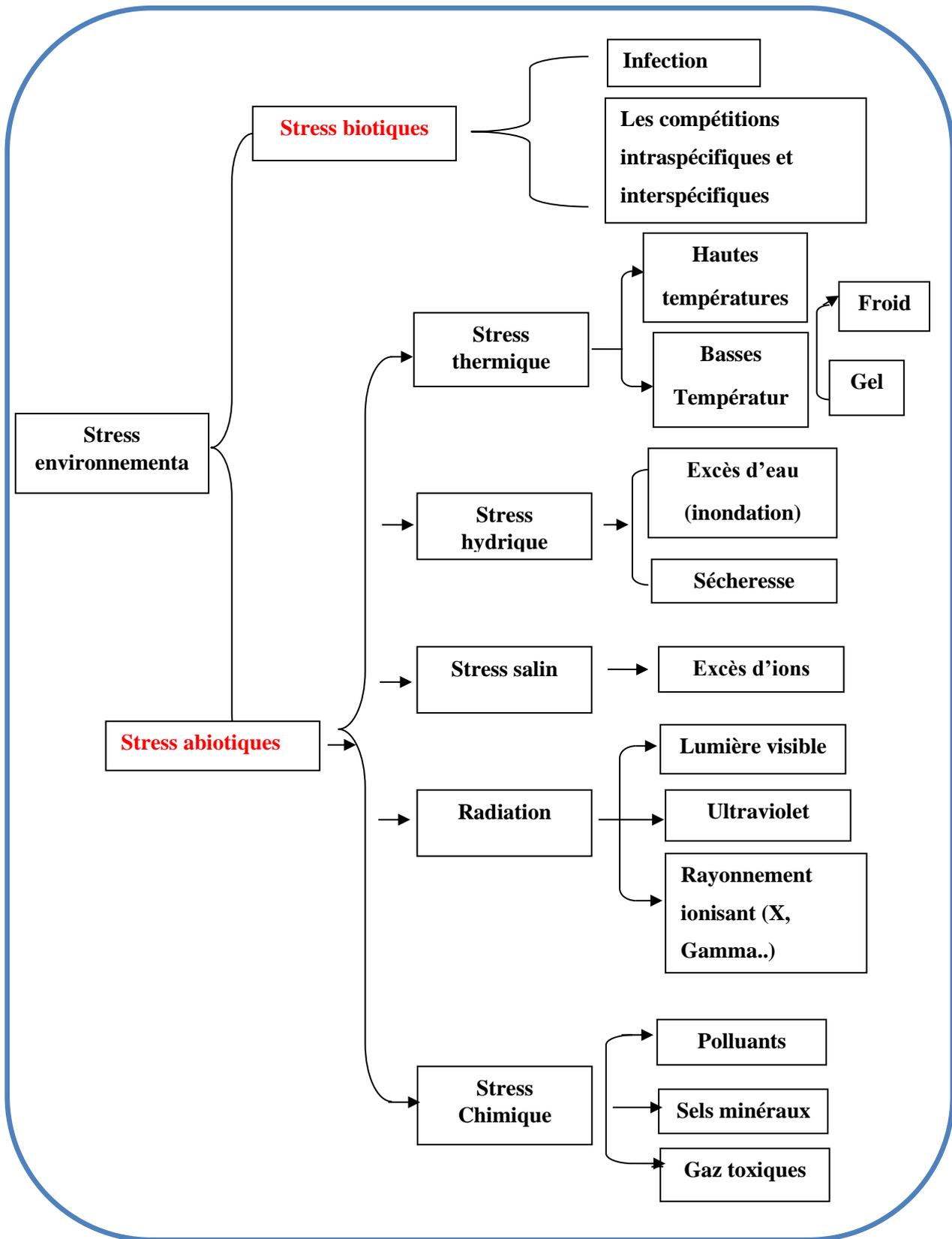


Figure 18: Principaux stress environnementaux auxquels les plantes sont confrontées (d'après Schulze et al., 2002)

II.1-LES STRESS ABIOTIQUES

Les stress abiotiques sont des processus impliqués dans l'élaboration du rendement d'une culture, ils sont influencés par deux types de facteurs, à savoir, les facteurs génétiques (intrinsèque à la plante) et les facteurs environnementaux (Chahbar, 2008). Ces contraintes environnementales peuvent être classées divisées principalement en trois groupes selon leur nature : la composition en éléments minéraux du sol (stress salin), les contenus hydriques du sol et de l'air (stress hydrique), et les chocs thermiques (figure 19) (Chahbar, 2008). Le stress peut déclencher plusieurs réponses à plusieurs niveaux de la plante (Shilpi et Narendra., 2005).

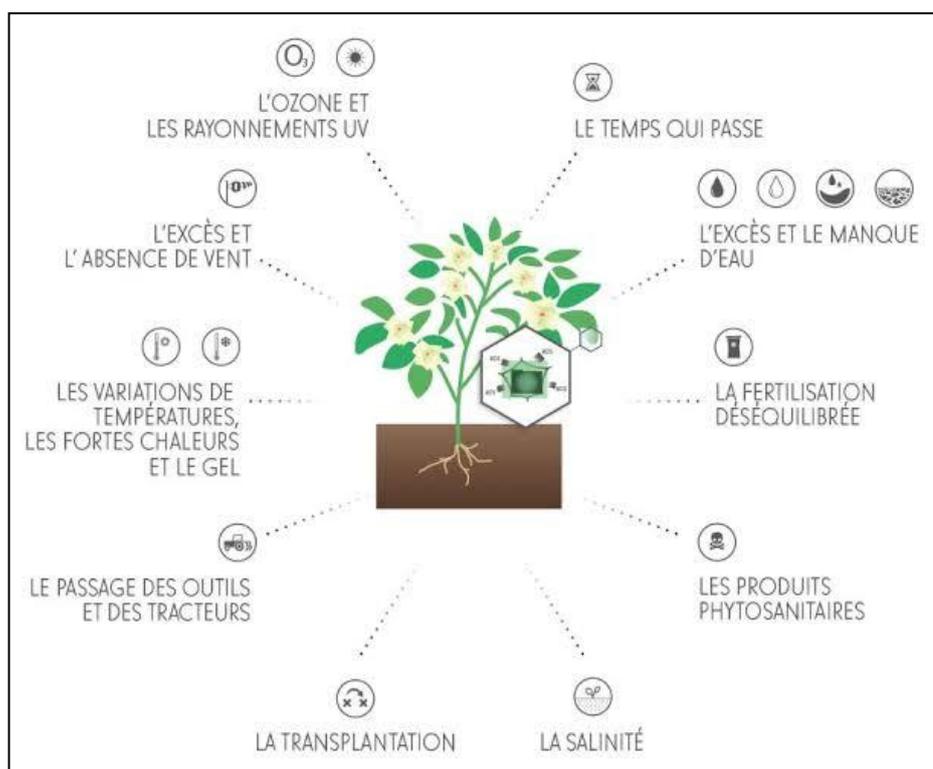


Figure 19: les facteurs environnementaux causant le stress abiotiques

(<https://biodevas.fr/glossaire/stress-abiotique>)

II.1-1- Le stress hydrique

Le déficit hydrique comme étant les circonstances dans lesquelles les plantes accusent une réduction de croissance et de production soit suite à une alimentation hydrique insuffisante ou soit à un excès d'eau dans les sols. D'après Passioura (2004), 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 (Lamaze et al., 1994).

L'effet de ce stress dépend de son degré, sa durée, du stade de développement de la plante, le génotype et son interaction avec l'environnement (Yokota *et al.*, 2006).

II.1-2- Le stress salin

La salinité surgit en raison de l'augmentation des concentrations de sels comme le chlorure de sodium, le carbonate de sodium, le sulfate de sodium ou les sels du magnésium desquels les sels dominants sont les chlorures de sodium ou les sulfates de sodium ou un mélange des deux (Sun *et al.*, 2007).

La salinité du sol ou de l'eau est donc causée par la présence d'une quantité excessive de sels. Généralement un taux élevé de Na^+ et Cl^- cause le stress salin. Le stress salin a un triple effet : il réduit le potentiel hydrique, cause un déséquilibre ionique ou des perturbations en homéostasie ionique et provoque une toxicité ionique. (Hayashi et Murata, 1998 in Parida et Das, 2005). La salinité est l'un des facteurs limitant pour la croissance des plantes. Ses effets sur les végétaux sont multiples et complexes (figure 20) : arrêt de la croissance, dépérissement des tissus sous forme de nécroses marginales, suivi par une perte de turgescence, chute des feuilles et mort de la plante (Zid, 1982).

Les conséquences de la salinité incluent aussi la toxicité par les ions (Pang *et al.*, 2007), Le déficit hydrique (Desclos *et al.*, 2008), la déficience et le déséquilibre nutritifs (Chen *et al.*, 2007).

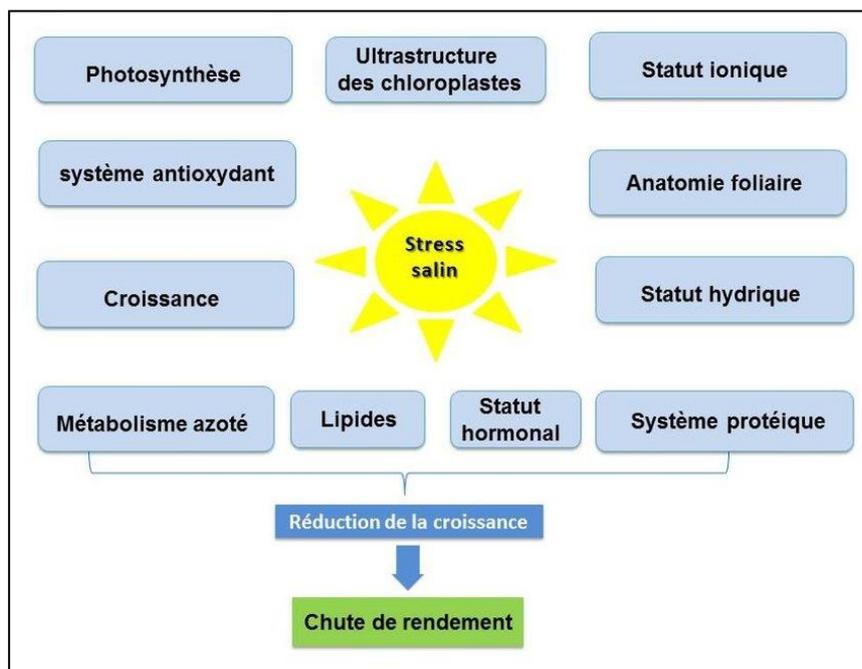


Figure 20: Principaux effets d'une forte salinité sur les plantes (Parida et Das, 2005)

II.1-3- Le stress nutritif

Les plantes peuvent être affectées par un stress nutritif qui est dû à plusieurs facteurs menant à l'insuffisance nutritive ou l'approvisionnement excessif en éléments essentiels comme N, P, K, Ca, Mg, S, Fe (Schulze et *al.*,2005 ; Koprivova et *al.*,2008). Le stress nutritif s'accompagne des désordres métaboliques diminuent la croissance et le rendement des plantes (Lynch et Brown, 2001 ; Kant et *al.*, 2008).

La croissance et le métabolisme des plantes sont également affectés par les métaux lourds (Klein et *al.*, 2008).

Pour palier a ce stress nutritif, les plantes ont développé plusieurs mécanismes qui répondent à l'absorption et à l'accumulation des métaux lourds essentiels et non essentiels (Cobbet et Goldsbrough, 2002).

Les mécanismes de tolérance aux métaux lourds incluent la liaison de ces métaux aux parois cellulaires, la réduction de leur transport à travers les membranes cellulaires, l'efflux actif des métaux, la compartimentation, la chélation et la séquestration des métaux lourds par des ligands particuliers tels que les phytochélatines et les métallothionines (Cobbet et Goldsbrough, 2002 ; Ramos et *al.*,2008).

Le développement de la tolérance au stress nutritif des plantes cultivées peut aider à étendre l'agriculture aux sols pauvres (Rubio et *al.*,2008).

II.1-4- Le stress photo-oxydatif

Le stress lumineux est l'une des contraintes environnementales importantes qui limitent la photosynthèse et l'efficacité de la productivité végétale (Das,2004 : Doi et shimazaki,2008).

L'efficacité photosynthétique sera réduite due à la formation de l'AOS (Active Oxygen Species), qui peut endommager l'appareil photosynthétique et les composants du chloroplaste (López-martín et *al.*,2008 ; Parent et *al.*, 2008).

Un stress oxydatif peut être aussi le résultat de plusieurs stress abiotiques tels que la salinité, le stress hydrique, le froid, la chaleur et les métaux lourds, qui engendrent la production rapide et massive des ROS. La surproduction de ces composants entraîne des dommages qui affectent les lipides, les protéines et les acides nucléiques, engendrant ainsi un stress oxydatif pour la plante (figure 21) (Pandey et *al.*, 2016 : Soares et *al.*, 2019).

Afin de pallier à ce stress, les plantes ont développé des mécanismes de tolérance comme la synthèse des enzymes antioxydants (Mittler *et al.*, 2004 ; Schopfer *et al.*, 2008).

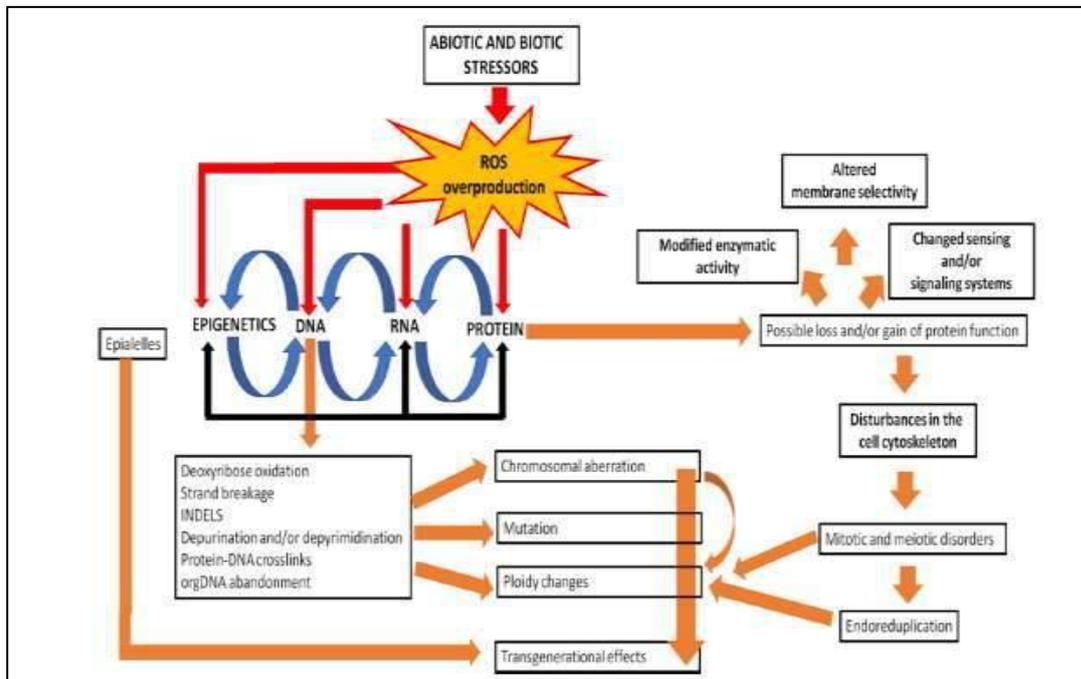


Figure 21: Cytotoxicité potentielle, directe ou indirecte, induite par les ROS, entraînant des altérations du cycle cellulaire, des anomalies chromosomiques, des modifications de la ploïdie, des mutations et des lésions, aussi des effets transgénérationnels (Soares *et al.* 2019).

II.1-5- Le stress thermique

Le stress thermique est l'ensemble des modifications de la physiologie des végétaux lorsque la température s'élève ou s'abaisse au-delà des conditions habituelles. Il diffère selon les espèces et la forme et ampleur du changement de température (Brinis, 2015).

Le stress thermique influence généralement l'activité photosynthétique (Kilasi *et al.* 2018), provoque la réduction de la teneur en eau et agit négativement sur la division, la croissance cellulaire (Hasanuzzaman *et al.* 2013) et sur les membranes conduisant à la rupture de l'activité cellulaire ou à la mort (Santoro *et al.*, 1992).

En outre, la perturbation des processus fondamentaux (comme l'assimilation du carbone, la respiration ou la transpiration) peut entraîner des défauts de développement végétatif tels que des organes moins nombreux, plus petits et/ou malformés (Takeoka *et al.* 1991 ; Maestri *et al.* 2002).

L'effet du stress thermique sur le développement et la physiologie de la plante dépend de l'intensité, la durée et l'amplitude de variation de la température (Wahid *et al.* 2007 ; Zinn *et al.* 2010)

II.1-5-1- Le stress provoqué par les hautes températures

Selon Schoffl *et al.*, (1986) le stress thermique correspond à une élévation de la température approximativement de 10°C au-dessus de la température normale de croissance.

L'élévation de la température empêche la plante à absorber les éléments nutritifs et l'eau, et de les utiliser (Rawson *et al.* (1993). Ces derniers notent une réduction du nombre de plantes levées par unité de surface, suite aux effets des hautes températures lors de la période du semis. En effet, une réduction de la longueur de la coléoptile est enregistrée et la plante ne peut, alors, s'ancrer en profondeur et devient sensible aux effets du stress thermique.

Hauchinal *et al.* (1993) ont observé une réduction du rendement grain des semis tardifs, liée à une diminution du nombre d'épis et du poids moyen du grain, causée par les effets des hautes températures en fin de cycle. Une accélération du développement et une réduction des dimensions des organes constitutifs de la plante sont aussi notés sous l'effet du stress thermique. Ainsi, on enregistre un effet négatif sur la productivité de la plante (Tashiro et Wardlaw 1990 ; Wardlaw et Moncur 1995).

Haddad (2010) signale que l'élévation de la température, tard au cours du cycle de développement de la plante et particulièrement après l'anthèse, est une contrainte à l'augmentation des rendements en zone semi-aride qui engendre une accélération de la sénescence foliaire et l'arrêt de la croissance du grain.

Les hautes températures provoquent aussi une dénaturation des protéines membranaires par la fonte des lipides membranaires qui conduit à la rupture des membranes et à la perte du contenu cellulaire (Abrol et Ingram, 1997)

II.1-5-2- Le stress provoqué par le froid (basses températures, gel)

La température est un des facteurs environnementaux qui influencent énormément la croissance et le développement des plantes. Le froid, y compris le refroidissement (0-15°C) et le gel (< 0°C), est un stress abiotique qui détruit le développement et la productivité des végétaux (Guoet *al.*, 2018 ; Liu *et al.*, 2018). Les fluctuations de température et l'arrivée d'un gel imprévu

entraînent souvent des dommages importants aux plantes (Liu et *al.*, 2018), le ralentissement de la croissance, voire même une destruction des végétaux exposés (Belhassen et *al.*, 1995).

L'abaissement brutal de la température provoque de nombreuses perturbations. affecte la rigidité de la membrane cellulaire (Orvar et *al.*, 2000 ; Yamazaki et *al.*, 2003), perturbent la stabilité des protéines ou des complexes protéiques et abaissent également l'activité des enzymes. Ces processus, conduisent à l'altération de la photosynthèse (Siddiqui et Cavicchioli, 2006; Ruelland et *al.*, 2009; Kosová et *al.*, 2015).

Les températures gélives quant à elles, induisent un stress similaire à celui causé par la sécheresse (Thomashow, 1998). En effet, les températures en dessous de 0°C provoquent la déshydratation des cellules en formant de la glace dans les espaces intercellulaires. Ce phénomène est appelé nucléation (Zachariassen et Kristiansen, 2000). Le noyau de glace attire vers lui les molécules d'eau qui se cristallisent autour, et augmentent le volume de la glace. Ceci provoque le transfert de l'eau du cytoplasme vers l'espace extracellulaire d'où une déshydratation des cellules (Sharma et *al.*, 2005). En plus de la déshydratation, les cristaux de glace peuvent créer des lésions au niveau des membranes, la membrane plasmique perd sa spécificité et il y a arrêt du fonctionnement cellulaire (Thomashow, 1998). La réversibilité du phénomène n'a lieu que si la structure cellulaire n'est pas fortement endommagée. Les cellules intactes se réhydratent et redeviennent fonctionnelles

Selon Yadav (2010), le froid est la limitation majeure de la distribution des espèces végétales. Le stress dû au froid est l'une des causes majeures des pertes agricoles, ses conséquences dépendent du degré de sévérité et du temps d'exposition (Bourion et *al.*, 2003).

Les plantes doivent être capables d'appréhender les fluctuations transitoires aussi bien que les changements saisonniers de température et de répondre à ces changements en ajustant activement leur métabolisme pour y faire face (Bourion et *al.*, 2003).

III. EFFETS DES BASSES TEMPERATURES SUR LE BLE DUR :

Le terme basses températures couvre une large gamme de niveaux de températures (Gazeau, 2002). Le stress au froid est causé par les températures gélives inférieures à 0 °C ainsi que par les basses températures comprises entre 0 °C et 15 °C. Il induit l'altération de plusieurs fonctions biochimiques, physiologiques et métaboliques de la plante.

Le stress engendré par les conditions hivernales est multifactoriel (Charrier ,2011). En hiver, les plantes subissent un effet prolongé des basses températures (Chilling : températures positives et inférieures à cinq degrés) et, plus transitoirement, un effet du gel (Freezing : températures négatives) (Charrier ,2011). En réalité, ce que l'on définit comme stress dû au gel est une contrainte supplémentaire due à la formation de glace engendrée par le stress des basses températures.

Lorsqu'il y a gel, au stress strictement thermique s'ajoute d'autres stress secondaires tels que stress osmotique, hydrique, mécanique (Charrier ,2011).

Les dégâts des basses températures sont fonction du temps (durée) d'exposition au froid (Yadav, 2010), de son intensité (du degré de sévérité) du froid, de la vitesse de gel et de dégel, des différences anatomiques et du contenu cellulaire. Les cellules contenant le moins d'eau sont celles qui sont les plus tolérantes (Hoshino et Tahir, 1987).

III. 1- Effet sur les membranes

L'abaissement de la température, au-dessous de 0 °C engendre des perturbations physiques et biochimiques au niveau cellulaire. La conséquence, de l'effet du gel est le rétrécissement des cellules qui engendre un arrêt du fonctionnement des membranes voire leur rupture (Santoro et *al.*, 1992)

Plusieurs études ont montré que la membrane est le premier site de perception du froid (Solanke et Sharma, 2008). Cette perception est le résultat de la rigidité membranaire (Orvar et *al.*, 2000 ; Yamazaki et *al.*, 2003), d'une modification qualitative et quantitative des lipides membranaires.

Des modifications au niveau du cytosquelette cellulaire sont aussi observées sous l'effet du froid ; ces modifications exprimées par des réarrangements au niveau des microfilaments d'actine résultent de la modification de la fluidité membranaire (Solanke et Sharma, 2008).

Les membranes cellulaires présentent une sensibilité aux changements de la température qui peuvent agir sur leur composition lipidique, modifier leurs propriétés physiques et influencer les propriétés des protéines associées (Penet et *al.*, 2007). Ainsi, perturbent la stabilité des protéines ou des complexes protéiques et abaissent également l'activité des enzymes.

Aussi sous stress au froid, la diffusion simple de molécules à travers la membrane est

ralentie, et, les lipides membranaires vont également exercer des contraintes plus ou moins importantes sur les protéines membranaires (Wolfe, 1978). La contrainte infligée par la rigidification des lipides restreint la possibilité de réarrangement tridimensionnel nécessaire à l'accomplissement de leur activité biologique (Wolfe, 1978). Lyons (1973) explique que les mouvements des lipides se trouvent ralentis, la viscosité augmente au sein de la bicouche et la membrane passe d'un état liquide pour s'approcher de l'état de gel (Charrier, 2011). Cet état rigidifié va limiter les échanges à l'intérieur de la bicouche lipidique et, surtout, entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule (Lee, 1975). Des protéines membranaires à activité enzymatique comme l'ATPase vont également être perturbée par cette rigidification de la membrane (Grisham et Barnett 1973 ; Upchurch, 2008).

Par ailleurs, l'effet sur la perméabilité membranaire dépend de la vitesse et de la durée du refroidissement. Lors d'un refroidissement lent et maintenu, la membrane est dans un état contracté qui restreint le passage de petites molécules, diminuant sa perméabilité à l'eau d'un tiers (Blok et al., 1976). Une perméabilité diminuée au niveau des racines provoque un déséquilibre de la balance absorption/transpiration engendrant un stress hydrique (Sachs, 1864 ; Molish, 1896).

Mais si le stress froid est brutal et non uniforme, on peut enregistrer des fractures au sein de la membrane et une fuite potentielle. Dans cas, la perméabilité est augmentée et les cellules peuvent se retrouver en état de pseudo-plasmolyse (Levitt, 1980).

III. 2- Effet sur la photosynthèse

Les basses températures engendrent un déséquilibre au niveau de la photosynthèse (Ensminger et al., 2006 ; Huner et al., 1993) voire même son altération (Siddiqui et Cavicchioli, 2006; Ruellandet et al., 2009; Kosová et al., 2015).

En lumière saturante, la réponse à la concentration interne en CO₂ montre que le froid provoque une réduction de l'efficacité de carboxylation (CE ; pente initiale de la courbe) qui reflète l'activité de phosphoénolpyruvate carboxylase (PEPC). L'assimilation maximale est fortement réduite (de l'ordre de 80 % à 14 °C, comparativement à 25 °C) ; elle témoigne d'une diminution d'activité de la pyruvate phosphatédikinase (PPDK) qui régénère le PEP et de la ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/ oxygénase (Rubisco). Ces baisses d'activité enzymatique sont corrélées à une diminution de l'abondance des protéines, mais la PEPC diminue peu comparativement aux deux autres (Naidu et al., 2003).

Le froid semble en effet provoquer un déséquilibre entre la disponibilité des protéines d'origine nucléaire ou chloroplastique, qui se reflète également dans la composition en protéines des photosystèmes (Nie et *al.*, 1991). Le contrôle s'exercerait davantage au niveau post-traductionnel (stabilité et/ou dégradation des protéines) qu'au niveau transcriptionnel. La diminution de l'abondance de la Rubisco est en partie compensée par une augmentation de son activation à la lumière (Kingston-Smith et *al.*, 1997).

Les dégâts occasionnés par le froid aux photosystèmes se manifestent par une chlorose, due à une diminution de la teneur en chlorophylles des feuilles (Nie et *al.*, 1991; Caffarri et *al.*, 2005).

Le froid occasionne également l'accumulation de pigments non photosynthétiques qui font office de filtre pour les photosystèmes en excès d'énergie ; il s'agit d'anthocyanes vacuolaires qui provoquent le rougissement des feuilles (Pietrini et *al.*, 2002).

Les ROS vont s'accumuler car les enzymes du métabolisme antioxydatif sont peu actives à basse température (Miller et *al.*, 2008).

Ces ROS peuvent réagir avec différentes classes de molécules (Charrier, 2011) :

- AND : avec lesquels ils induisent des mutations (Breen & Murphy, 1995)
- Lipides : par peroxydation des doubles liaisons des acides gras insaturés (Esterbauer et *al.*, 1988 ; 1991)
- Protéines : en créant des ponts interprotéiques ou déstabilisant les structures secondaires, tertiaires ou quaternaires (Esterbauer et *al.*, 1991).

III. 3- Effet sur la transpiration

La transpiration végétale est un mécanisme essentiel qui permet le maintien de l'équilibre hydrique chez les plantes. Ce mécanisme est continu et est défini comme l'émission d'eau à l'état de vapeur par les feuilles dans l'atmosphère. En revanche, les plantes absorbent la quantité d'eau qui y correspond par les racines (<https://www.travailleravecnature.com/apprentissage-art-floral-62>).

L'abaissement de la température s'accompagne aussi d'une réduction de la transpiration.

Melkonian et *al.* (2004) mentionnent que le froid induit un stress hydrique en provoquant une chute rapide de la conductance hydraulique racinaire. Cet effet est le résultat d'une augmentation de la viscosité de l'eau et de l'altération des membranes cellulaires qui perturbent le transport radial symplastique de l'eau dans les racines.

L'abaissement de la température s'accompagne aussi d'une réduction de la transpiration qui se manifeste sur la plante par un flétrissement (Melkonian et *al.*, 2004). Ce processus de refroidissement induit une redistribution du contenu cellulaire en eau.

Et que la régulation ultérieure de l'ouverture des stomates et de l'absorption de l'eau par les racines permet une récupération partielle ou totale, selon les génotypes (Melkonian et *al.*, 2004).

Lorsque les tissus cellulaires sont soumis à des températures au-dessous de point de congélation, l'eau intra et inter cellulaire prend des températures inférieures à zéro avant de devenir glace. Une température de -10 °C engendre la formation de la glace à l'extérieur de la cellule et induit un flux d'eau vers l'extérieur de la cellule, qui se déshydrate puis prend masse suite à la formation de la glace (Pearce, 2001).

Le mouvement de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur de la cellule dépend du degré d'osmolarité de la solution cellulaire et du nombre de cycles de gel- dégel. La cellule est donc soumise à des effets de stress mécaniques et de déshydratation au cours du processus de congélation (Thomashow, 1998 ; Sharma et *al.*, 2005).

III. 4- Effet sur la respiration

Le rôle de la respiration est de fournir une source d'énergie utilisable (ATP) par toutes les réactions du métabolisme cellulaire.

Le passage de la température de 20 C° à 0 C° induit une diminution de la respiration allant jusqu'à 80% (Bakumenko et *al.*, 1977).

III. 5- Effets sur les cellules

Lorsque la température franchit le seuil des 0°C, des cristaux de glace se forment entre les cellules de la plante si la température descend progressivement, ce qui est le cas pour les gelées noires par exemple, les gelées d'hiver. A l'inverse, la formation des cristaux se fait directement dans la cellule, si la température baisse brutalement. C'est le cas des gelées dites blanches ou de

printemps. Dans le premier cas, la cellule a le temps d'expulser une partie de son eau hors de l'enveloppe. Elle se déshydrate et les tissus sont ainsi capables de résister.

Au dégel, l'eau intercellulaire est réabsorbée et la cellule se remet à fonctionner. Lorsque la cellule est déshydratée, ses fonctions sont perturbées : l'intensité respiratoire diminue, les échanges cellulaires stoppés, les déchets toxiques produits par la cellule s'accumulent, les protéines sont modifiées. Ces fonctions reprennent dès que la cellule se réhydrate et il n'y a pas d'incidence sur la plante si le stress a été de courte durée (moins de quelques jours). Dans le second cas, la cellule assiste à une chute brutale de la température et n'arrive pas à expulser son eau.

La formation des cristaux de glace, petits et nombreux, se fait au sein du cytoplasme et des vacuoles. Ces derniers provoquent la destruction des cellules, et par voie de conséquence des tissus, ou même cas extrême, de la plante.

(<https://www.letelegramme.fr/ar/viewarticle1024.php?aaaammjj=20010215&article=2313952&type=ar>)

III. 6- Effet sur la biochimie et la physiologie du blé

L'abaissement de la température, au dessous de 0°C engendre des perturbations physiques et biochimiques au niveau cellulaire (Bakumenko *et al.*, 1977). Le profil biochimique d'une plante soumise au stress thermique sera différent de celui d'une même plante n'ayant pas subi le stress (Bourdu, 1984). La température exerce une influence sur la vitesse des réactions chimiques (Côme *et al.*, 1992) et, par conséquent, biologiques (Charrier 2011)

Chez les plantes sensibles, un effet seuil existe, en deçà duquel, la constante catalytique chute rapidement. Ce seuil est différent selon les enzymes et espèces mais se situe généralement dans une gamme de températures comprises entre 5 et 12°C (Lyons et Raison, 1970).

Les dégâts apparents du gel sont toujours la conséquence d'effets internes se manifestant au niveau cellulaire. Ces perturbations internes peuvent être d'ordre physique ou biochimique. Dans un cas comme dans l'autre, ces perturbations peuvent être plus ou moins réversibles selon l'intensité et la brutalité du gel (Hiver, 2003).

Les dégâts du gel peuvent être issus d'effets strictement physiques. En ce cas, ce sont les entrées et surtout les sorties d'eau au travers des membranes qui sont mises en jeu. Le gel s'accompagne également d'effets biochimiques dont certains d'entre eux permettent la mise en

place de mécanismes adaptatifs (Hiver ,2003).

La déshydratation des cellules s'accompagne d'un accroissement de leur concentration en sucres, sels et substances organiques (Bakumenko et *al*, 1977).

III. 7- Effets du froid sur les stades de croissance (phénologie) du blé

Le gel est un phénomène naturel aléatoire qui, avec le changement climatique, peut s'avérer dévastateur (figure 21). Les gels de printemps peuvent avoir des conséquences néfastes sur la production en cours et peut avoir lieu à n'importe quelle phase du développement du blé (RAP, 2021). Comprendre les différents types de gel et les dégâts qu'ils peuvent provoquer incite fortement à s'orienter vers des moyens de prévention (BASF France SAS division Agro – 22).



Figure 22: Plants de blé sous gel (Alexandre ,2021)

L'effet du gel sur les cultures de céréales, et plus sur le blé dur, dépend du stade de croissance de la culture au moment où survient le gel. Le gel peut endommager les tiges, la tige, les feuilles et les épis en développement (Wostem, 2020). En effet la sensibilité au gel et au temps (période d'exposition) froid est fonction de la culture et de son stade de développement (Gate, 2008 ; Yadav, 2010). La sensibilité au gel est différente selon si le point de croissance se situe en dessous ou au dessus du niveau du sol (RAP, 2021).

L'intensité des dégâts est fonction des éléments météorologiques, et en particulier des conditions d'apparition du froid (Gate, 2008). Plus les températures baissent rapidement et fortement, plus les dégâts seront importants. De même, Le vent accentue les effets du froid, en favorisant l'évaporation , À l'opposé, une chute de neige au début d'un cycle froid va protéger le blé des gelées. la neige offre d'isolant thermique (Gate,2008)

Selon le même auteur le nombre et l'amplitude des cycles gel-dégel sont aussi préjudiciables que l'intensité du gel. En effet, un dégel trop rapide de la plante peut induire des lésions irréversibles entraînant des morts cellulaires.

Le plus souvent, quand l'intensité du gel est très forte, en situation plutôt sèche, celui-ci s'installe progressivement : la plante s'endurcit au froid et devient moins vulnérable. Dans le cas d'un cycle gel-dégel rapide en condition humides, la rapidité et l'intensité des mouvements d'eau dans la plante (rétraction et sortie quand l'eau gèle), puis augmentation du volume au moment du dégel) sont plus nuisibles, surtout si la plante n'a pas pu s'endurcir par un froid préalable (Deswarte,2019)

Les cycles gel/dégel font plus de dégâts que l'intensité du gel lui-même (Deswarte,2018)

III. 7-1- Impact du froid sur les semis

Selon yadav (2010), les semis constituent le stade le plus sensible au froid. Pour Rap (2021) les céréales tolèrent bien les conditions froides entourant la période des semis. Les graines non germées résistent bien à des températures glaciales. Aussi, la semence, sèche, présente une résistance au froid maximale, notamment parce qu'elle est très peu hydratée (Deswarte, 2019).

Les principaux symptômes liés au froid se résument principalement à des lésions de surface, jaunissement des feuilles, dessiccation, destruction des tissus, accélération du vieillissement de la plante, diminution de sa durée de vie et production de l'éthylène (Yadav 2010).

III. 7-2- Impact du froid lors de la germination

C'est surtout au moment de la germination que le blé peut être affecté par le gel; si la température est bien en dessous du point de congélation, il serait possible de perdre des plants (RAP, 2021). Lorsque le sol n'est pas saturé d'eau pendant plusieurs jours, les semences en germination s'accommodent de températures du sol aux environs de 4 °C (RAP, 2021). Les risques de gel sont moins importants sur un sol sec (Gate, 2008).

Selon Gate (2008), si un gelée -8°C (à l'échelle du champ en moyenne) survient au stade coléoptile ou au moment de la sortie du limbe de la première feuille, les dégâts peuvent être particulièrement sévères.

Dans les régions à climat continental, les blés semés tard peuvent subir de sévères dégâts de gel des levées.

Le blé est sensible au froid du semis jusqu'à la mi-montaison, mais deux stades sont particulièrement sensibles en hiver : la levée et l'émission des feuilles et des talles (Gate,2008)

Gate (2008) rapporte aussi qu'il arrive que le gel affecte un semis n'ayant pas encore levé. Dans ce cas, le coléoptile peut être détruit. L'impact sur les rendements sera important figure 23.

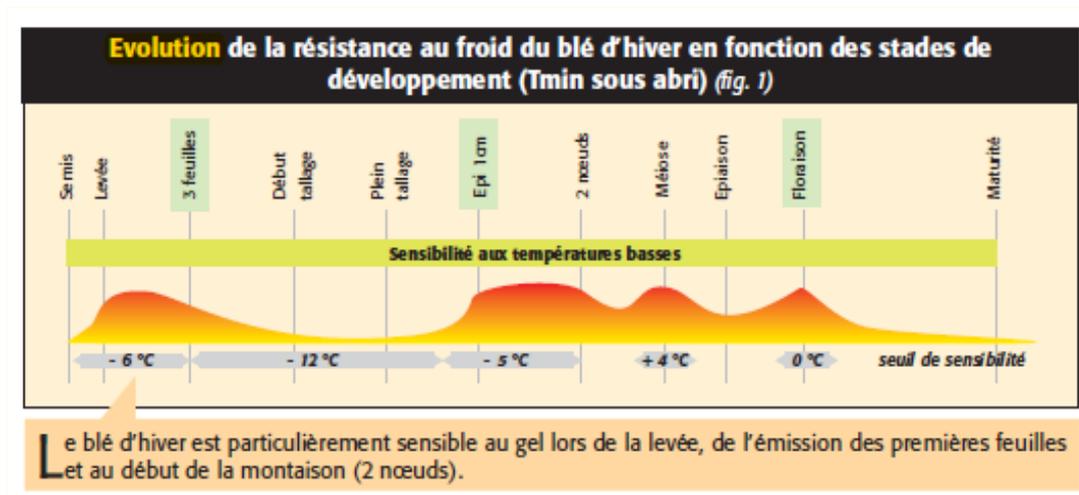


Figure 23: Evolution de la résistance au froid du blé d'hiver en fonction des stades de développement (Gate,2008)

III. 7-3- Impact du froid après la levée

Les jeunes plants jusqu'au stade de la première feuille peuvent être vulnérables au gel (figure 24). La température gélive se situe autour de -2 °C pour des expositions prolongées,

Aussi, Les principaux symptômes liés au froid se résument principalement à des lésions de surface, dessiccation, destruction des tissus, accélération du vieillissement de la plante, diminution de sa durée de vie et production de l'éthylène (figure 25) (RAP, 2021).

Si le froid entraîne le gel de l'eau à l'intérieur de la cellule. Cela cause la mort des cellules qui éclatent. On voit alors des blessures sur le végétal dont certaines parties se fendent et ces blessures peuvent provoquer ensuite la mort entière de la plante (RAP, 2021).



Figure 24 blé de printemps deux jours après un gel (RAP,2021)



Figure 25: Semis de céréales du printemps affecté par la neige et le gel (une journée après un gel de -4°C) (RAP, 2021)

RAP (2021) rapporte que même lorsque la partie aérienne est affectée par une forte gelée, les réserves de la semence et la vigueur de la plantule assurent généralement une reprise et la repousse et toutes les céréales ne présentent pas la même sensibilité au gel.

III. 7-4- Impact du froid Au cours de la montaison

La sensibilité au gel des céréales augmente progressivement, jusqu'à arriver au seuil de 0°C lors de la méiose pollinique et la floraison. Plus l'épi est haut dans la tige, plus la sensibilité au gel est forte, avec destruction totale ou partielle de l'épi et des épillets (Decarrier et *al*, 2021).

Selon RAP (2021), à ce stade une température de -4°C pour plus de deux heures peut causer des dommages aux points de croissance, mais au tallage, il faudrait une température de -11°C pour affecter le nombre de talles et causer d'autres dommages.

III. 7-5- Impact du froid de l'Élongation de la tige à l'épiaison

Un gel pendant l'élongation de la tige peut endommager la tige, les feuilles ou l'épi en développement et tuer la première talle. Une tige affaiblie est plus sensible à la verse, à taller de nouveau et à produire des épis endommagés ou perdus (Wostem, 2020).

III. 7-6- Impact du froid à la floraison

Un gel pendant la floraison peut causer la stérilité (Yadav, 2010) entraînant une diminution du nombre de grains produits (Wostem ,2020).

Le gel a un impact sur la survie d'un individu mais également sur sa capacité de reproduction (Sakai et Larcher, 1987).

III. 7-7- Impact du froid au stade laiteux

Un gel au stade laiteux peut causer une perte de poids des grains et une perte de grains, entraînant donc une perte de rendement (Wostem, 2020). Klein (2006) a observé des barbes blanches et épis blancs ; accompagnés des dommages aux tiges inférieures, de décoloration des feuilles et grains rétrécis ; rugueux ou décolorés.

III. 7-8- Impact du froid au stade pâteux :

Au début du stade pâteux, la culture peut tolérer un gel de -6°C pendant environ une heure avant que les grains se ratatinent (Klein, 2006). Un gel à la fin du stade pâteux n'entraîne généralement que des pertes minimales (Wostem ,2020).

La figure 26 résume l'influence (ou seuil de tolérance) du froid sur les différents stades de développement du blé.

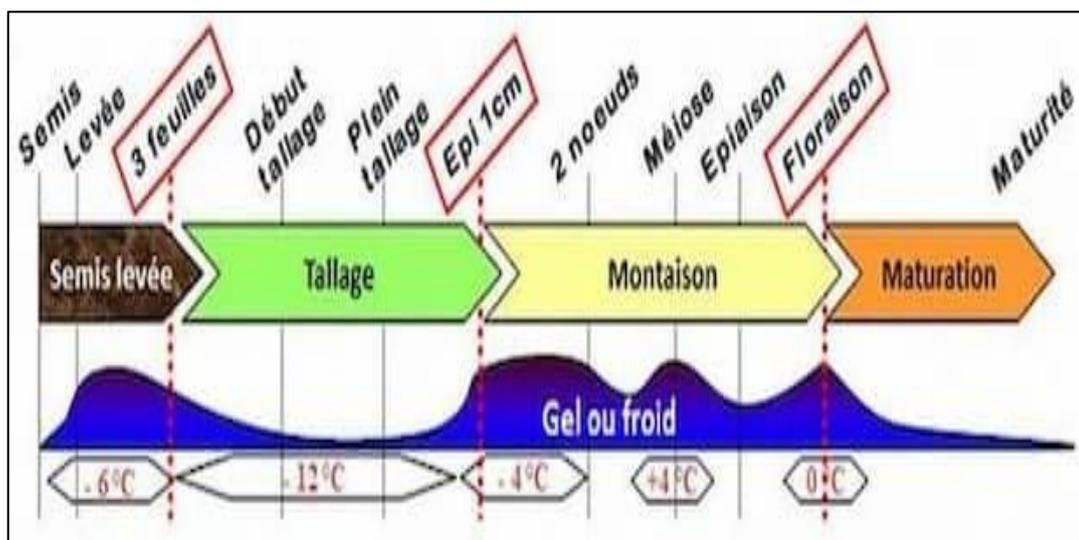


Figure 26: Seuils d'alerte vis-à-vis des accidents climatiques en fonction des stades (Arvalis,2021)

Klein (2006) résume dans le tableau 02 les températures approximatives causant les dégâts au blé

Tableau 2 : Températures qui causent des dommages au blé aux stades de croissance printaniers. Symptômes et effet sur le rendement des dommages causés par le gel printanier (Klein, 2006).

Stade de Croissance	Température approximative causant lésions (2 heures)	Symptômes primaires	Effet sur le rendement
Tallage	-11°C	Chlorose foliaire; Brûlure de l'extrémité des feuilles; Odeur d'ensilage; Teinte bleue des champs	Léger à modéré
Montaison	-4°C	Mort du point de croissance; Jaunissement ou brûlure des feuilles; Lésions; Division ou courbure de la tige inférieure ; Odeur	Modéré à sévère
Nœud	-2°C	Stérilité des fleurs; Épillet coincé dans le nœud; Dommages à la tige inférieure; Décoloration des feuilles; Odeur	Modéré à sévère
Épi émerge	-1°C	Stérilité des fleurs; Barbes blanches ou épis blancs; Dommages à la tige inférieure; Décoloration des feuilles	Sévère
Floraison	-1°C	Stérilité des fleurs; Barbes blanches ou épis blancs; Dommages à la tige inférieure; Décoloration des feuilles	Sévère
Stade laiteux	-2°C	Barbes blanches ou épis blancs; Dommages aux tiges inférieures Décoloration des feuilles; Grains rétrécis; rugueux ou décolorés	Modéré à sévère
Stade pâteux	-2°C	Grains ratatinés; décolorés; Mauvaise germination	Léger à modéré

IV. LA RESISTANCE AU FROID

La résistance au froid se définit par la capacité de supporter des basses températures sans dommages, les plantes sensibles au gel meurent de froid dès que la glace se forme dans leurs tissus (Hoshino et Tahir, 1987). Les plantes résistantes au gel, leurs tissus résistent à la glace et ne meurent qu'à la suite de la perte d'eau ainsi engendrée.

La résistance au gel est essentiellement déterminée par le point de congélation respectif des différentes cellules de tissu végétale. Ce qui explique la diversité dans la résistance au gel des divers organes de la plante (Masle-Meynard, 1980).

Sakai et Larcher (1987) ; Malone et Ashworth (1991) mentionnent que chez les plantes, des stratégies d'évitement et de tolérance à la formation de glace sont rencontrées. En limitant la présence de points de nucléation, la cristallisation est empêchée, ce qui permet au cytosol d'être dans un état de surfusion (voir annexe phénomène de surfusion)

Toute aussi importante que cette résistance est la capacité de régénération de chaque plante et de ses organes, de plus l'état d'activité et la phase de développement déterminent la résistance au gel, elle est plus élevée durant la phase de repos hivernal après une endurance au froid et plus faible au début de la croissance (Baldy, 1986).

Les dégâts de ce stress dépendent de la durée, l'intensité du froid, la vitesse de congélation et décongélation, des différences anatomiques et du contenu cellulaire. Les cellules contenant le moins d'eau sont celles qui sont les plus tolérantes (Hoshino et Tahir, 1987).

Plus le gel est important et rapide (brutal), il intervient au niveau intracellulaire en provoquant des lésions irréversibles pour les organes touchés (Rodrigo, 2000). Pour que les plantes se protègent davantage, le gel extracellulaire est favorisé. Il permet à la cellule de se servir du dégagement de chaleur latente provoqué par la cristallisation pour maintenir sa température. Il permet également au cytoplasme de la cellule de se réhydrater, en utilisant la force de succion de la glace pour alimenter l'apport de molécules d'eau venant cristalliser sur la glace extracellulaire formée (Wolfe et Bryant, 2001).

La résistance au froid fluctue fortement au cours des premiers mois du cycle de son développement (Deswarte, 2019). La semence, sèche, présente une résistance au froid maximale parce qu'elles sont très peu hydratées (Gate, 2008). Lors que la plantule germe, la résistance au froid chute fortement, pour atteindre un minimum, que l'on situe environ au stade coléoptile

(Deswarte, 2019). A partir de ce moment, la résistance au froid augmente à nouveau, pour atteindre un maximum courant tallage (stade 3-4 feuilles) (entre -10°C et -30°C selon les espèces et les variétés). Elle décroît alors à nouveau, pour laisser la culture de plus en plus exposée en fin de tallage et début de montaison et épiaison (Deswarte, 2019).

Toutes les cultures ne présentent pas la même sensibilité au gel : l'orge de printemps semée à l'automne est l'espèce la plus à risque. Viennent ensuite l'avoine, le blé dur, l'orge d'hiver et le blé tendre. Le triticale et le seigle sont potentiellement les plus résistantes (figure 27).

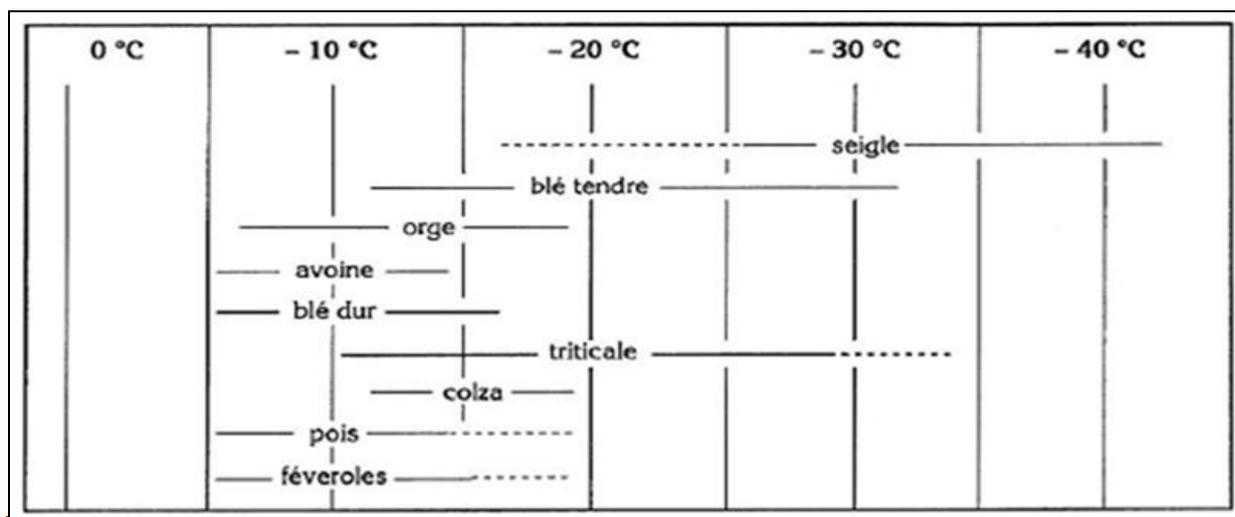


Figure 27: Niveaux maxima de résistances au froid et variabilité génétique chez différentes espèces (Deswarte, 2019)

IV. 1-Aclimatation (endurcissement) au froid :

L'acclimatation (endurcissement) au froid est assurée par l'exposition des plantes pendant une certaine durée de temps à de basses températures non gélives (Thomashow, 1999). Dans les conditions en champs, ce phénomène a naturellement lieu en automne lorsque les températures commencent à baisser autour de 10°C (Fellah et *al.* 2002).

Selon Deswarte (2018) l'endurcissement est un processus physiologique long et progressif.

Ceci permet aux plantes d'adapter progressivement leur métabolisme au froid de l'hiver et de tolérer le gel (Thomashow, 1999). Toutefois les plantes ne répondent pas toutes de la même façon aux basses températures. Sharma et *al.* (2005) les ont subdivisé en trois catégories : les plantes sensibles au froid endommagées par des températures inférieure à 10°C , les plantes sensibles au gel et enfin les plantes tolérantes au gel. La majorité des plantes dont les céréales d'hiver (blé, orge, seigle) sont capables de tolérer les basses températures et le gel (Thomashow,

1999). En effet certaines variétés de blé d'hiver après une phase d'acclimatation, peuvent atteindre une TLSO (température létale pour 50 pour cent des plantes) (Sharma et al, 2005).

Ainsi l'endurcissement au froid conduit à un ensemble de modifications biochimiques et moléculaires qui permet le fonctionnement normal des cellules sans dommages physiologiques (Thomashow, 1999).

Pour résister au froid, les céréales doivent s'endurcir. Si ce phénomène ne se déroule pas correctement, la résistance est baissée jusqu'à -6°C . Le processus d'endurcissement dépend des facteurs externes favorables (températures, lumière) et internes à la plante. L'endurcissement démarre dès que les températures moyennes journalières sont en dessous des 15°C , et va durer environ quatre semaines. Cet endurcissement de la plante sera d'autant plus efficace que les températures seront proches de 0°C (sans pour autant avoir de températures négatives létales) (Deswarte, 2018).

Cette résistance au froid est également caractéristique des variétés. Par exemple, un blé peut avoir une résistance qui fluctue de -12°C à -32°C pour les variétés les plus résistantes. Enfin, les variétés vont présenter également des différences sur la vitesse d'endurcissement, aussi, sur des champs à gelées fortes et précoces, il faut préférer des variétés qui s'endurcissent rapidement. Chambre d'Agriculture de Lozère - www.lozere.chambagri.fr.

La figure 28 présente les seuils de résistance des céréales aux basses températures

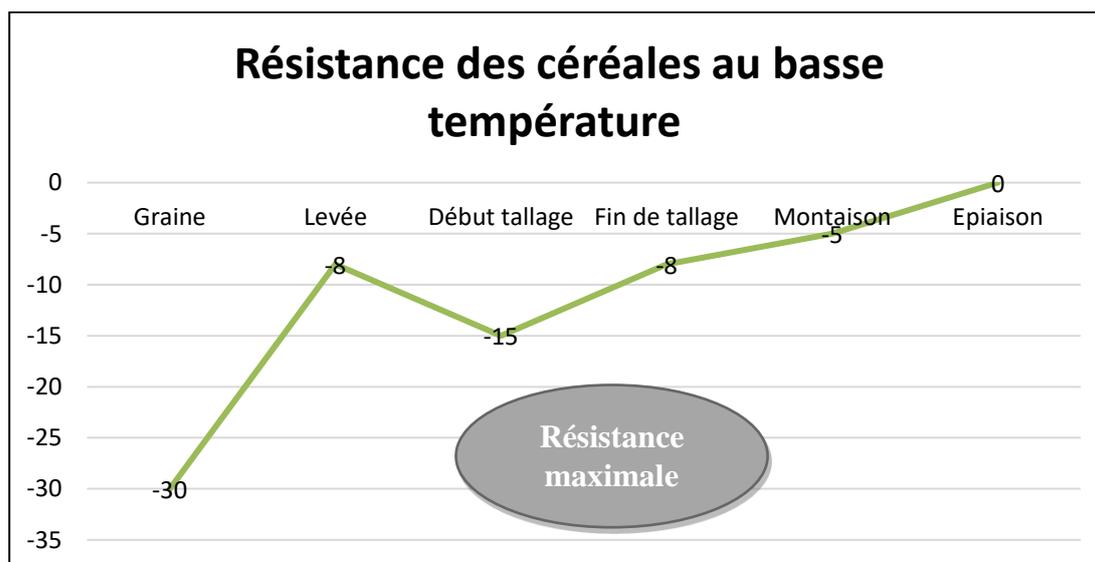


Figure 28: Résistance des céréales aux basses températures (Chambre d'Agriculture de Lozère - www.lozere.chambagri.fr)

Le choix de la variété et de la date de semis doivent donc viser, surtout dans les zones à risque, une acquisition rapide de la résistance au froid et une durée de cette résistance la plus longue possible.

L'historique est également important : l'âge des plantes, la croissance avant le gel, ou encore la fragilisation par un traitement herbicide, peuvent expliquer des différences de comportement entre les parcelles.

V. STRATEGIES ET MECANISMES DE LA TOLERANCE AU FROID

Une plante doit posséder les mécanismes nécessaires à la mise en place des modifications physiologiques, biochimiques et moléculaires permettant l'adaptation requise pour contrer le stress de basses températures (Levitt, 1980).

V. 1- Réponses (adaptations) morphologiques

La culture du blé dur et tendre, est sujette aux effets des basses températures de la levée au stade épisaison (Baldy, 1993). Au cours du cycle, l'intensité du stress varie, ainsi que le degré de sensibilité de la plante qui est fonction du stade végétatif considéré (Figure 29). Le terme basses températures engendre une large gamme de niveaux (Gazeau, 2002).

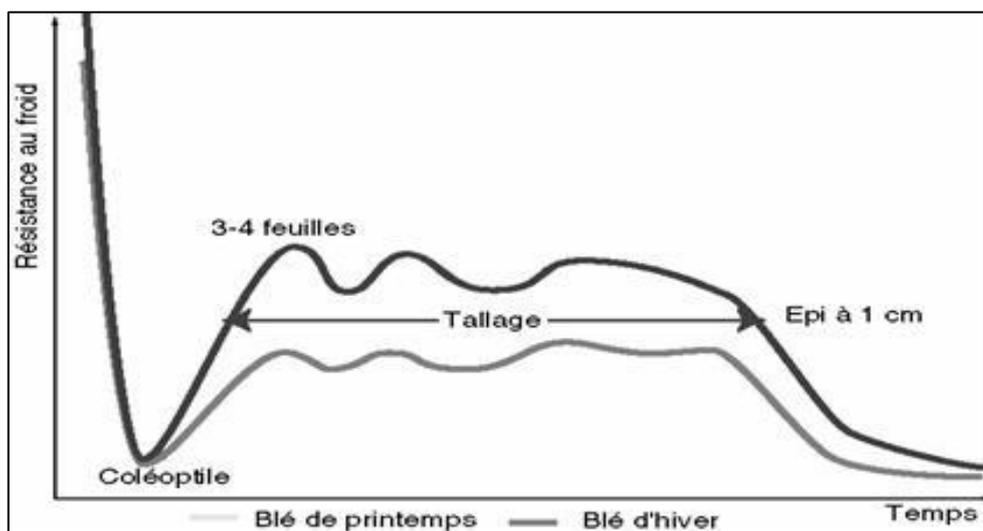


Figure 29 : I 'Evolution de la résistance au froid du blé en fonction du stade végétatif (Gate, 1995).

Au cours de la levée, c'est le nombre de plants produit par unité de surface qui est réduit (Gate, 1995). Pendant la période de tallage c'est le nombre de talles qui est affecté (Strak et *al.* 1986; Gate et *al.* 1990).

Au cours de la montaison, on assiste à une régression des talles montantes en épis (Grignac, 1981). L'amplitude entre les moyennes de températures minimales et maximales amplifie les dégâts du froid sur les plantes (Gazeau, 2002).

Les dommages sont plus accentués lorsque le froid se manifeste brutalement après une période aux températures relativement douces, ce qui ne donne pas assez de temps à la plante de s'accoutumer ou de s'endurcir (Couvreur et *al*, 1979). La baisse du rendement en grains, suite aux effets du gel, peut atteindre des niveaux importants, allant jusqu'au sinistre total (Ducellier, 1932; Mouret et *al*, 1989; Bouzerzour, 1990; Baldy, 1993).

Le blé dur présente son maximum de résistance à l'état de graine. Cette résistance diminue au stade coléoptile, augmente au cours de la période allant du stade 4 feuilles à la fin du tallage pour chuter dès le stade épi-1cm jusqu'au stade méiose (Gates, 1995 ; 2008). La résistance est maximale en période où la croissance est au ralentie et elle est moindre lorsque la croissance devient active. Les seuils de températures mis en cause sont de l'ordre de 2 °C selon Gate (1995).

V. 2-(Réponses) Adaptation biochimiques et physiologiques

L'acclimatation au froid s'accompagne généralement d'une synthèse de nombreux composés (lipides-sucres-protéines) qui vont contribuer à la stabilisation des membranes au maintien de l'équilibre osmotique et à la protection contre le gel (Come, 1992).

V. 2-1- Stabilisation de la membrane cytoplasmique

L'effet nocif des basses températures sur les membranes provient de l'accroissement des zones rigides dans la matrice lipidique (Uemura et *al*, 1995) des mécanismes biochimiques destinés à maintenir la fluidité initiale des membranes sont déclenchés lors de l'acclimatation. Il se produit une augmentation des phospholipides de la membrane plasmique (Uemura et *al*, 1995), mais aussi du degré d'insaturation des acides gras constitutifs des lipides membranaires (Come, 1992).

V. 2-2- Réductions du stress oxydatif

La perturbation de la fluidité membranaires conduit à une inhibition du transport des électrons au niveau des photosystème PSII et PSI ceci provoque à son tour une production de dérivés réactifs de l'oxygène appelés les éléments ROS (réactive oxygène spécifs) parmi eux les anions super oxyde O_2^- qui sont le produit de la réduction de O_2 dans le photosystème 1 du chloroplaste , il a été rapporté par Suzuki et Mittler (2006) que le super oxyde O_2^- produit par le

NADPH oxydase suite à l'exposition aux basses températures semble jouer un rôle dans la transmission de signal . Les autres éléments ROS sont les radicaux hydroxyles OH et le peroxyde d'hydrogène H₂O₂.

Pour prévenir les dommages causés par les dérives ROS, les plantes synthétisent des anti-oxidants tels que le glutathion, l'ascorbate, et la vitamine E ainsi que des enzymes de détoxification tels que la catalase et le super oxydé dismutase (Uemura et *al*, 1995),

V. 2-3- Synthèse d'osmo-protecteurs

La tolérance au froid est reliée à l'accumulation de produits divers par les plantes afin de diminuer le point de congélation des liquides cellulaires, ce sont souvent des polyols, du glycérol mais aussi des glucides, comme le tréhalose le saccharose. On les appelle osmo-protecteurs (Sauter et Wellenkamp, 1998 ; Hoch et *al.*, 2002)

Les osmo-protecteurs sont de petites molécules qui contribuent à la régulation de la pression osmotique dans les cellules et les tissus, sous l'effet de stress environnementaux (Hare et Cress, 1998 Sauter et Wellenkamp, 1998 ; Hoch et *al.*, 2002)). Durant l'endurcissement au froid il permettant d'augmenter la pression osmotique dans les cellules, et par, l'abaissement de la température de cristallisation de l'eau et la réduction de la quantité de glace qui peut se former (Come, 1992). En effet, Ces substances abaissent, bien entendu, le point de congélation de l'eau dans la cellule, mais également, se lient aussi aux membranes, empêchant l'eau d'y parvenir et par conséquent d'y former des cristaux (Cornic, 2007). Certaines molécules telles que la proline et la glycine bêtaïne constituent des osmo-protecteurs efficaces qui améliorent la résistance à la déshydratation et contribuent aussi à la stabilisation des membranes plasmiques (Hare et Cress, 1998).

Aussi certains sucres tels que le raffinose agirait comme un cryoprotecteur dans les plantes tolérantes au gel après acclimatation au froid (Gilmour et *al*, 2000).

Cette augmentation en sucres participe avec d'autres composés à l'augmentation de l'osmolarité intracellulaire, ce qui abaisse le point de congélation et protège ainsi la cellule végétale contre le gel intracellulaire (Cadieux et *al*, 1988).

Tunova (1963), a démontré que l'enrichissement en sucres solubles de coléoptile de céréales d'hiver entraîne une augmentation marquée de leur tolérance au gel.

Cette acclimatation est réversible et la concentration de solutés diminue avec la résistance au froid lorsque la température augmente (Cornic, 2007).

V. 2-4- Synthèses des protéines cryoprotectrices ou (de protéines spécifiques)

L'endurcissement au froid induit des changements quantitatifs et qualitatifs importants dans la composition protéique. Une augmentation de la concentration des protéines totales durant l'endurcissement au froid a été documentée chez plusieurs plantes (Davis et Gilbert, 1970; McKenzie *et al.*, 1988).

Les protéines pourraient jouer un rôle important dans la tolérance au gel. Parmi les protéines qui s'accumulent au cours de l'endurcissement au froid, certaines ont des rôles enzymatiques connus requis pour les changements métaboliques observés lors de l'acclimatation au froid (Davis et Gilbert, 1970; McKenzie *et al.*, 1988).

Hincha *et al.* (2000) ont montré l'importance des protéines appelées COR / LEA et qui constituent un grand groupe de protéines structurales qui s'accumulent durant la déshydratation cellulaire. Ces protéines sont généralement très hydrophiles et peuvent protéger d'autres protéines de structures membranaires contre la perte de leur enveloppe d'hydratation (Magrin, 1990).

L'accumulation de ces protéines se fait dans les différents compartiments cellulaires incluant le cytosol, le noyau et le voisinage des membranes plasmiques (Houde *et al.*, 1995; Danyluk *et al.*, 1998; Heten *et al.*, 2002; Rorat *et al.*, 2004).

La perte de l'eau est associée à des changements structurels et fonctionnels défavorables des biomolécules (Magrin, 1990). Les protéines LEA sont généralement divisées en trois grands sous-groupes en fonction leurs séquences caractéristiques uniques: LEA3-L1, LEA3-L2 et LEA3-L3 (Cattivelli *et al.* 2002 ; Ingram et Bartels, 1996 ; Ndong *et al.* 2002). Chez le blé et l'orge, les gènes *Lea* induits par le froid comprennent de nombreux gènes *Lea* II - déhydrines;

Chez le blé. L'induction par le froid est caractérisée par l'expression d'une famille de gènes *Wcs120* comprenant *Wcs200*, *Wcs180*, *Wcs66*, *Wcs120*, *Wcor825* et *Wcor726* gènes (Ouellet et Vazquez-tello, 1997). Et une famille de gènes *Wcor410*, comprenant *Wcor410a*, *Wcor410b* et les gènes *Wcor41 Oc* (Danyluk *et al.*, 1994 ; Danyluk *et al.*, 1998). Certains de ces gènes *Cor 1 Lea* induits par le froid peuvent être considérés comme des marqueurs de la résistance au gel, c'est-à-dire le niveau d'accumulation de leurs produits correspond quantitativement au niveau de tolérance au gel chez différents cultivars de blé et d'orge (Lareau, 1990).

L'expression des gènes *Cor 1* *Lea* est modulée par plusieurs voies de régulation qui peut être essentiellement divisées en ABA-dépendantes et ABA-indépendantes (Hazoune, 2006). Les gènes *Cor 1* *Lea* dont l'expression est principalement régulée par l'ABA contiennent plusieurs éléments de régulation *ABRE* dans leurs régions promotrices qui servent comme site de liaison pour les facteurs de transcription bZIP (Hazoune, 2006). Les éléments de régulation *ABRE* possèdent deux fragments: T ACGTCC (le G-box) et GGCCGCG (GC-motif) (Allagulova *et al*, 2003; Thomashow, 1999; Yamaguchi-Shinozaki et Shinozaki, 2005).

De nombreux travaux ont mis en évidence la présence d'une corrélation positive entre l'expression de gènes de certaines protéines LEA (late embryogenesis abundant), chaperons AFP (antifreeze protéines) et l'adaptation au froid. Les protéines LEA sont des molécules hydrophiles qui sont généralement accumulées dans les graines pendant la maturation et dans les tissus végétatifs exposées aux stress hydrique, salin et au froid (Aberlanc-Bertossi *et al*, 2006).

V. 2-5- régulations de l'expression de gènes

Des gènes sont exprimés durant un stress froid et codent pour des protéines qui vont protéger la plante contre les dommages du froid (Gilmour *et al*, 1998). Il existe des gènes dont l'induction est lente de l'ordre de quelques heures après la perception du signal de stress appelés les gènes COR (cold-regulated) et ceux dont l'induction est plus rapide tels que pour les gènes de la famille AP2/ERF (Gilmour *et al.*, 1998).

VI .LA SELECTION DU BLE DUR POUR LES BASSES TEMPERATURES

Les milieux semi arides se caractérisent par leur diversité et imprévisibilité, ce qui fait que l'amélioration génétique pour des rendements meilleurs et plus stables soit une tâche particulièrement difficile.

La sélection de variétés efficaces et adaptées aux conditions pédoclimatiques des zones céréalières est une préoccupation importante des sélectionneurs (Benmahammed *et al.*, 2010 ; Adjabi *et al.*, 2014 ; Salmi *et al.*, 2015 ; Fellahi *etal.*, 2016).

Selon Amokrane (2001) l'amélioration génétique du blé dur des zones sèches reste basée sur la recherche d'une meilleure tolérance aux stress abiotiques, pour adapter la plante à la variabilité du milieu de production. L'exposition des céréales au gel (basses températures) est l'un des stress au froid abiotiques les plus fréquents en zones semi arides.

Afin d'établir une stratégie de sélection, il est essentiel de comprendre les mécanismes physiologiques et moléculaires impliqués dans la résistance au froid et au gel (Danyluk ,1996).

Le niveau de tolérance au froid varie énormément chez les différentes espèces céréalières puisque qu'elles ne présentent pas la même sensibilité au gel (Deswarte, 2019).

Cette tolérance au gel leur permet de survivre aux conditions rigoureuses de l'hiver et de reprendre leur croissance au printemps. Les mécanismes nécessaires à l'induction de la tolérance au gel doivent être déclenchés au moment approprié et maintenus durant la période de risque (Danyluk ,1996).

Selon Săulescul et Braun (2001), travailler avec un caractère complexe tel que l'endurcissement hivernal dans un programme de sélection est une tâche difficile. Ceci est dû au nombre élevé de gènes impliqués et des nombreuses interactions avec l'environnement. Mais la principale difficulté dans la sélection du blé tolérant au froid est que cette tolérance au gel élevée est généralement associée à des rendements bas et à une maturité tardive.

Beaucoup de caractères qui sont associés à la tolérance au gel telle que la croissance printanière retardée peuvent avoir des effets négatifs sur le rendement spécialement dans les environnements pluviaux où la croissance rapide durant un printemps précoce et la précocité sont importantes pour éviter la dessiccation tardive et les températures élevées (Jamian, 2014). Fowler et *al.* (1981) ont écrit que l'objectif de la sélection ne doit pas s'axer à maximiser l'endurcissement hivernal mais à développer les cultivars avec un minimum d'endurcissement hivernal nécessaire pour une région ou aire donnée (Săulescul et Braun, 2001).

Un endurcissement minimum nécessaire pour une région donnée n'est pas un simple travail. Il doit être basé sur l'estimation du risque de la survie hivernale basée sur les données climatiques et les informations sur la performance du cultivar dans la parcelle (Săulescul et Braun, 2001).

Selon Săulescul et Braun, (2001) l'analyse des données climatiques dans le temps incluant les températures minimales et la période de leur occurrence est utilisable mais reste insuffisante. En effet, la même température basse peut avoir différents effets sur le blé dépendant en priorité des régimes de températures et d'autres facteurs qui déterminent le niveau de l'endurcissement acquis (Săulescul et Braun, 2001; Mekhlouf et *al.* 2006 ; Mekhlouf 2008)

En Algérie les travaux de recherches ont porté sur le lien entre mécanismes physiologiques de résistance au froid et l'endurcissement. Les espèces étudiées locales, sélectionnées et introduites sont plus ou moins sensibles aux basses températures et font preuve d'une rapidité d'endurcissement variable, les dégâts apparaîtront des -2°C . Ils ont notés notamment qu'en l'absence d'endurcissement, les variétés perdent leurs résistance au froid (mekhlouf et al, 2006 ; Mekhlouf, 2008, Gacem et Hassani; 2017 ; Salamat et Kouidri , 2017)

Abbassenne *et al.* (1997) montrent, qu'en conditions semi-arides d'altitude les génotypes précoces, à l'épiaison, se caractérisent par des vitesses élevées de remplissage par m^2 , alors que les génotypes tardifs font plus appel aux assimilés stockés dans la tige. Mekhlouf *et al.* (2006) trouvent que les génotypes trop précoces courent le risque du gel tardif. Une grande précocité n'est, cependant, d'aucune utilité pratique en sélection dans les régions où la présence du gel tardif affecte les génotypes trop précoces (Ceccarelli ,2010).

Brancourt-Humel *et al.* (2003) rapportent que les génotypes tardifs valorisent peu, sous forme de grains produits par unité de surface, la matière sèche totale accumulée au stade épiaison. Ces variétés investissent peu d'hydrates de carbone dans les épis et à cause des effets des stress thermique et hydrique, beaucoup de leurs tiges avortent (Abbassenne *et al.*, 1997).

La stabilité de la précocité au stade épiaison est importante pour limiter les risques liés à la variabilité climatique (Abbassenne *et al.*, 1997 ; Mekhlouf *et al.*, 2006). Les génotypes précoces ont tendance à épier plus tôt ou plus tard, selon que l'hiver est plus doux ou plus rigoureux (Bahlouli *et al.*, 2005). Par contre, les variétés tardives sont caractérisées par des dates d'épiaison plus régulières. Bahlouli *et al.* (2005) ont noté que les génotypes tardifs épient à une date plus ou moins fixe quelle que soit l'année.

Worland *et al.* (1994) explique ceci par le fait que les génotypes précoces répondent plus aux sommes des degrés jours accumulées, alors que les génotypes tardifs répondent en plus aux températures vernalles et à la photopériode.

Arega *et al.* (2007) appuient ces résultats précédent et trouvent que les génotypes précoces présentent des valeurs au-dessus de la moyennegénérale pour le rendement en grains, la biomasse aérienne, le rendement en paille, le rendement économique, et le nombre d'épis par mètre carré.

C'est pourquoi, certains auteurs tels que Abbassenne *et al.* (1998) préconisent de retenir dans les sélections génotypiques, des individus qui regrouperaient à la fois des caractères de tardivité à l'épiaison et de précocité à la maturité ce qui permettrait d'éviter les gelées tardives et

les hautes températures printanière. En somme, des génotypes capables d'adopter des stratégies d'évitement par raccourcissement de leur cycle de développement.

Deswarte (2021) propose des conseils pratiques pour atténuer les conséquences d'un gel. Il préconise la prévention qui est possible à travers le choix d'un bouquet variétal et des dates de semis adaptées, du moment que l'évaluation des dégâts est cependant difficile à réaliser tant que les conditions de reprise de végétation ne sont pas franches.

Pour augmenter la résistance au froid d'une culture au champ, il faut bien ajuster la date de semis en fonction de la précocité à la montaison (Deswarte, 2019)

Dans le cas où une culture a été touchée par le gel, il faut lui éviter tout stress supplémentaire. En sortie d'hiver par exemple, un apport d'azote, en petite quantité du fait des faibles besoins, peut faciliter le redémarrage de la culture, alors qu'une intervention herbicide peut provoquer une phytotoxicité très préjudiciable (Deswarte, 2019)

En résumé, il faut en premier lieu considérer l'effet génétique, selon l'espèce et la variété. L'orge de printemps semée à l'automne est l'espèce la plus à risque. Viennent ensuite l'avoine, le blé dur, l'orge d'hiver et le blé tendre. Le triticale et le seigle sont potentiellement les céréales les plus résistantes au gel (Deswarte, 2019).

CONCLUSION

Conclusion

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une place primordiale parmi les céréales cultivées en Algérie. Sa conduite dans les régions semi arides et arides, se trouve souvent confrontée à plusieurs contraintes environnementales et climatiques qui sont les causes majeures de la faiblesse des rendements et de l'irrégularité de la production.

Parmi ces contraintes le froid (basses températures et gel) entraîne des dégâts importants et peut survenir à n'importe quel stade de la culture (Chenafi et *al.*, 2006; Mekhlouf, 2008).

Il est préconisé que la sélection des variétés tolérantes au froid est nécessaire en vue de réduire les pertes de rendement et stabiliser la production au niveau des zones de culture du blé dur (Mekhlouf, 2008).

La présente synthèse bibliographique vise à faire le point des modifications des caractéristiques physiologiques du blé dur tout en tenant compte des paramètres morphologiques et biochimiques suite à une action par le froid.

L'étude de la résistance génétique au froid dans la réponse à l'action des basses températures réponses d'adaptation du blé dur à ce stress.

En raison du caractère imprévisible des basses températures la tolérance s'avère la stratégie la plus efficace dans les situations de stress sévère et prolongé. Lors de cette tolérance ont lieu des modifications de structures ou de fonctions qui augmentent la probabilité de survie et de production des céréales lors de ces conditions.

Il est à préciser que la notion froide est associée à plusieurs niveaux de température : les températures basses inférieures à 10°C ou comprises entre 0°C et 15°C et les températures basses gélives ou gel inférieures à 0°C (Gazeau, 2002 ; Liu et *al.*, 2018).

Elles provoquent toutes des modifications qualificatives et quantitatives aux fonctions physiologiques, biochimiques et métaboliques de la plante.

Les diverses recherches révèlent que le froid a des effets très marquants sur la culture de blé dur et mettent en évidence les stratégies adoptées par ce dernier pour tolérer cette contrainte (Annichiarico et *al.* 2005 ; Mekhlouf et *al.*, 2006 ; Mekhlouf, 2008 ; Gacem et Hassani, 2017 ; Labgaa et Fakroun, 2018).

Les effets engendrés par le froid dépendent de son intensité (degré), sa durée et de son amplitude, du stade de développement de la plante, du génotype et son interaction avec l'environnement (Bourion *et al.*, 2003).

Le froid a des effets négatifs et engendre la perturbation des processus fondamentaux. Il agit sur :

- la membrane provoquant un arrêt de son fonctionnement (Yamazaki *et al.*, 2003 ; Solanke et Sharma, 2008)
- la division et la croissance cellulaire les cellules (perturbation des fonctions)
- l'activité photosynthétique engendrant un déséquilibre et une dégradation de la chlorophylle (Ruelland *et al.*, 2009 ; Kosová *et al.*, 2015)
- la transpiration
- la respiration (le passage de la température de 20°C à 0°C induit une diminution de la respiration)
- et la réduction de la teneur en eau (Thomashow, 1999).
- les stades de croissance du blé dur engendrant des conséquences néfastes sur la production avec des effets légers à très sévères (Klein, 2006). Le froid affecte son développement et ralentit son taux de croissance, se traduisant par un faible tallage, par une réduction de la surface foliaire des biomasses aériennes et racinaires (Salamat et Kouidri, 2017, Gacem et Hassani, 2017) et en conséquence une réduction de la biomasse finale (Mekhlouf, 2008).

La sensibilité des stades de croissance du blé dur au gel augmente progressivement jusqu'à atteindre les différents degrés qui affectent ces stades. Selon Klein (2006), le stade tallage est affecté par la température à -11°C et la montaison à - 4°C, tandis que le reste des stades sont affectés par des températures comprises entre -1°C et -2°C. En effet l'action du gel est plus marquée au stade épiaison qu'au stade tallage.

Rizza *et al.*, (1994) mentionnent que la tolérance aux basses températures dépend principalement du processus d'acclimatation (endurcissement) qui se déroule lorsque les plantes sont exposées aux basses températures non gélives . Selon Mekhlouf *et al.*, (2006) ; Mekhlouf, (2008) ; Gacem et Hassani (2017) et Deswarte (2020) l'exposition des variétés de blé dur à des

températures basses et gélives avec durcissement a permis aux variétés de s'acclimater au froid et leur a donné le temps d'exprimer leur potentialité génétique. Ceci montre l'importance de l'acclimatation au froid qui est un phénomène qui permet aux plantes exposées régulièrement à de basses températures positives de pouvoir tolérer ensuite le gel (Rizza *et al.*, 1994).

Aussi trois facteurs principaux influencent les dommages potentiels causés par le gel à une culture de blé en croissance qui sont

- Le stade de croissance lorsque le gel se produit
- La température
- La durée des températures de congélation

Pour la résistance au froid, le blé dur développe plusieurs mécanismes qui lui permettent de l'adaptation pour contrer ce stress. Ces mécanismes se résument dans la synthèse de nombreux composés comme les lipides, les acides gras surtout, les sucres (Santarius, 1973 ; Lineberger et Steponkus, 1980), les protéines (Voler et Heber, 1975) et ou certains acides aminés en particulier la proline (Gren et Li, 1981) et les acides organiques (Santarius, 1971).

Les résultats obtenus des recherches dont la plupart ont été menées sous conditions contrôlées, révèlent des effets du froid, gel surtout, très marqués entre les variétés témoins et stressées. Ces résultats mettent en évidence les stratégies adoptées par les différentes variétés pour tolérer cette contrainte.

Les variétés testées ont utilisé la même stratégie de tolérance vis-à-vis du gel. Les voies métaboliques telles que la proline, la glycine betaine, les polyols, les antioxydants deviennent plus actives pour garder la survie de la plante dans les conditions stressantes (Jubault *et al.*, 2008).

Tous les tests de tolérance au froid employés discriminent nettement entre les différentes variétés de blé dur selon leur degré de tolérance au froid. Ce qui révèle la variabilité du fond génétique de chacune d'entre elle et permet d'envisager la sélection de génotypes résistants

La variabilité génétique joue, dans ce contexte, un rôle très important dans la détermination de l'adaptation du blé dur au froid et est de ce fait un support de développement des génotypes adaptés à la variation climatique de nos régions.

Parmi les alternatives offertes pour palier à ce fléau, figure la sélection de variétés performantes et adaptées. Cette sélection sur la tolérance au froid doit être renforcée par les techniques de la génétique, du génie génétique et de la biologie moléculaire, donc une sélection sur la base des indices de la tolérance des stress et sans oublier la sélection sur la base des performances du rendement grain. Ce qui permet de faire des progrès plus conséquents.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **ABBASSENNE F, BOUZERZOUR H., HACHEMI L., 1998.** Phénologie et production de blé dur (*Tr. durum, Desf*) en zone semi-aride d'altitude. Annales de l'INA, 18, 24-36./
- **ABBASSENNE F., 1997.** Etude génétique de la durée des phases de développement et leur influence sur le rendement et ses composantes chez le blé dur (*Triticum durum Desf*). Thèse de magister, INA, 81p.
- **ADJABI, A., BOUZERZOUR, H. AND BENMAHAMMED, A. 2014.** Stability Analysis of Durum Wheat (*Triticum durum Desf.*) Grain Yield. Journal of Agronomy, 13(3) : 131-139.
- **AIT YAHIA L. et ZEMMOURA H., 2014.** Etude de l'effet d'un stress oxydatif et le système défensif enzymatique chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*). Mémoire de master. Option : Biologie et Génomique Végétales. Univ Constantine1. 35p
- **AMIOUR A., 2020.** Optimisation de la fertilisation azotée du blé dans les conditions arides, Mémoire master. Option : Hydro-pédologie. Univ Mohamed Khider Biskra.56P
- **AMIRA D. et FADEL M., 2013.** La Sélection Variétale du Blé Dur à Partir des Paramètres Technologique, Mémoire de master, Option : Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire. Univ 8 Mai 1945 Guelma.57p
- **AMIROUCHE A. et DJAALEB R., 2017.** Comparaison de quelques paramètres biochimiques chez quatre variétés de blé dur sous stress oxydatif généré par un stress hydrique, Mémoire de master, Option : Métabolismes secondaire et Molécules Bioactives. Univ des frères Mentouri Constantine.30p
- **AMMAR, M. 2014.** Organisation de la chaine logistique dans la filière céréales en Algérie : Etat des lieux et perspectives. Master of Sciences, CIHEAM- IAMM, 127 pp.
- **AMOKRANE, A., BOUZERZOUR, H., BENMAHAMMED, A., DJEKOUN, A., ET MEKHLOUF, A. 2002.** Etude comparative des variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) d'origine Algérienne, syrienne et Européenne sous climat de type méditerranéen. Sciences et Technologie numéro spécial D : 33-38.
- **AMROUCHE I. et MESBAH E., 2017.** Effet du stress abiotique sur l'accumulation des protéines totales chez deux variétés de blé dur (*triticum durum Desf.*), Mémoire de master. Option : Biologie et Génomique végétale. Univ. Des Frères Mentouri Constantine.57p
- **ANNICCHIARICO P., BELLAH F., et CHIARI T., 2005.** Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop Sci*, 45 : 1741-1749.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **ARAUS J. I., Amaro T., Voltas J., Nakhoul H. et Nachit MM., 1998.** Chlorophyll fluorescence as a selection criteria for grain yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *FCR*, 55, 209-223.
- **AREGA, G., HUSSEIN, M. ET HARJIT, S. 2007.** Selection Criterion for improved grains yields in Ethiopian durum wheat genotypes. *African Crop Science Journal*, 15(1) : 25 – 31.
- **ASHRAF, A. A., ABO HEGAZY, S. R. AND TAHA, M. H. 2011.** Genotypic and phenotypic interrelationships among yield and yield components in Egyptian bread wheat genotypes. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 4(1):9-16.
- **ASHRAF, M., AHMAD, M. S. A., ÖZTÜRK, M. ET AKSOY A., 2012.** Crop Improvement through Different Means: Challenges and Prospects. *Crop Production for Agricultural Improvement*. Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht, The Netherlands, pp 1-15.
- **AVELIN C., 2020.** Marché du blé dur. *France agrimer*, 52p
- **AZIROU A. et FERAOUN Z., 2020.** Effet du stress salin sur la croissance et le développement des plantes et stratégies de tolérance. Mémoire de master. Option : Système de production agroécologique. Univ. Blida1. 44p
- **BAHLOULI F., BOUZERZOUR, H. BENMAHAMMED, A. and HASSOUS, K. L. 2005.** Selection of high yielding and risk efficient Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Journal of Agronomy*, 4(4): 360-365.
- **Baldy G. 1974.** Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques et de leurs influences sur la production des principales zones céréalières. Document projet céréale, 70p.
- **BELHASSEN E., THIS D. et MONNEVEUX P., 1995.** L'absorption génétique face aux contraintes de sécheresse. *Cahier agriculture*. 4: p. 251-61.
- **BELKHERCHOUCHE H., BENBELKACEM A., BOUZERZOUR H. and BENMAHAMMED A., 2015.** Flag leaf and awns ablation and spike shading effects on spike yield and kernel weight of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) under rainfed conditions. *Advances in Environmental Biology*, 9: 184-191.
- **BEN KADDOUR M., 2014.** Modifications physiologiques chez des plantes de blé (*triticum durum* Desf) exposées à un stress salin, Thèse de doctorat : Univ. Badji Mokhtar-Annaba. 74p
- **BENABDALLAH M., 2016.** Les caractères et les effets d'une fertilisation biologique par le grignon d'olive sur le rendement des cultures des céréales, Mémoire de master, Option : Amélioration végétale. Univ. Tlemcen. 85p
- **BENBELKACEM A., 2014.** The history of wheat breeding in Algeria. In Porceddu E. (ed.), Damania A.B. (ed.), Qualset C.O. (ed.). *Proceedings of the International Symposium on Genetics*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- and breeding of durum wheat Bari: *CIHEAM Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens*, 110 : 363-370.
- **BENCHINA M. et BENDJEDDOU S., 2015.** Etude de la tolérance du blé dur (*triticum durum Desf*) aux stress abiotiques sous un étages climatiques sub-humide « OuadSmar », Mémoire master. Option : Biotechnologie et protection des végétaux. Univ. Mohamed El Ibrahimy de B.B.A.24p
 - **BENDADA H., 2021.** Contribution à la sélection de l'adaptation de quelques génotypes d'orge (*Hordeum vulgare L.*) dans les conditions agro-climatiques semi-arides de la région de Sétif. Thèse doctorat : Univ Mohamed Boudiaf -M'sila.133p
 - **BENHAMED M. et BENAMARA S., 2020.** Caractérisation morpho physiologique in Vitro au stade tallage chez le blé dur (*triticum durum Desf.*) sous stress hydrique, Mémoire de master, Option : Biotechnologie végétale. Univ. Mohamed boudiaf M'SILA. 30p
 - **BENLARIBI M., MONNEVEUX PH. ET GRIGNAC P., 1990.** Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*). *Agronomie* 10: 305-322.
 - **BENMAHAMMED A., 2005.** Hétérosis, transgressions et efficacité de la sélection précoce et retardée de la biomasse, du nombre d'épis et utilisation des indices chez l'orge (*Hordeum vulgare L.*). Thèse de Doctorat d'Etat en Biologie végétale, option, Génétique et Amélioration des plantes. Univ. Constantine. 125p
 - **BENMAHAMMED, A., NOUAR, H., HADDAD, L., LAALA, Z., OULMI, A. et BOUZERZOUR, H. 2010.** Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum Desf.*) sous conditions semi-arides. *BASE* [En ligne], 1(14) : 177-186
 - **BOUCHOUKH I., 2010.** Comportement écophysiologie de deux chénopodiacées des genres *Atriplex* et *Spinacia* soumises au stress salin, Mémoire de magister, Ecophysiologie et biotechnologie végétale. Univ. Mentouri-Constantine.
 - **BOURIHANE D. et MEKKAOUI Z., 2013.** Analyse des déterminants de la production du blé en Algérie cas des wilayas Tiaret, Sétif et Médéa l'échantillon 1990-2009, Mémoire de master, Option : Economie Appliquée et Ingénierie Financière. Univ Abderrahmane Mira, BEJAIA.86p
 - **BOUTI M, BOUGATTOUCHE N, SAADAoui W., 2020.** Etude de la réponse de blé tendre (*Triticum aestivum L.*) au stress hydrique. Mémoire de master. Option : phytopharmacie et protection des végétaux. Univ. 8 mai 1945 Guelma.37p

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **BOUZERZOUR H. AND BEMMAHAMED A., 1994.** Environmental factors limiting barley grain yield in the high plateaux of eastern Algeria. *Rachis* 12, 11-14.
- **BOUZERZOUR H. et MONNEVEUX P. 1992.** Analyses des facteurs de stabilité du rendement de l'orge dans les conditions des hauts plateaux Algériens'. A l'occasion des colloques n°64: Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéennes: Diversité Génétique et amélioration des variétés, (Montpellier, France, 15-17 Décembre 1992). Eds. Ben Salem M et Monneveux P. Ed. INRA, Paris 1993. pp 205-15.
- **BOUZERZOUR H., DJEKOUNE A., et BENMAHAMMED A., 1996.** Genotypic similarity of performances and stability of environmental responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.). *Acts Inst. Agro. Vet. (Maroc)*, 16: 33-38
- **BOUZID S., 2010.** Etude de l'effet de la salinité et de la présence du molybdène sur le comportement écophysio-logique de deux variétés de plantes de l'espèce *Phaseolus vulgaris* L. Thèse magister, Ecophysio-logie et Biotechnologie Végétale. Univ. Mentouri Constantine. 123p
- **CATTIVELLI L., BALDY P, CROSATTI C, DI FONZO N, FACCIOLI P, GROSSI M AND MASTRANGELO A, PECCHIONI N. and STANCA., 2002.** chromosome 72 régions and stress-related sequences involved in resistance to abiotic stress in Triticeae. *Plant molecular biology*, 48:649-665.
- **CECCARELLI S. 1991.** Selection environment and environmental sensivity in barley. *Euphytica*. 57: 157-167
- **CECCARELLI S. AND GRANDO S. 1991.** Selection environment and environmental sensitivity in barley. *Euphytica*, 57, 157-167.
- Céréales et résistance au froid. *Chambre d'Agriculture de Lozère* – www.lozere.chambagri.fr
- **CHAHBAR S., 2008.** Etude des paramètres morphologiques et physiologiques de résistance à la sécheresse chez la fève (*Vicia foba* L). Mémoire de magister. Laboratoire de physiologie végétale. Univ. D'Oran. 48p
- **CHARRIER G., 2011.** Mécanismes et modélisation de l'acclimatation au gel des arbres : application au noyer *Juglans regia* L. Sciences agricoles. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. 203p.
- **CHENAFI, H., AÏDAOUI, A., BOUZERZOUR, H., SACI, A. 2006.** Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian J Plant Sci.*, 5: 854-860.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **CHERFIA R., 2010.** Etude de la variabilité morpho-physiologique et moléculaire d'une collection de blé dur algérien (*Triticum durum Desf.*). Thèse magister, Univ. Mentouri Constantine.
- **CHERIEF A. et BOUHALI M., 2018.** Effet de stress salin sur les paramètres morpho-physiologique et biochimiques chez le feve vicia Faba L. Mémoire de master. Option : Biodiversité et environnement. Univ. Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem. 84p
- **CLEMENT D., 2010.** Identification des critères du grain de blé (*Triticum aestivum L.*) favorables à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble de cultivars et par l'analyse protéomique de lignées isogéniques waxy. Sciences agricoles. Université Blaise Pascal-clermont- Ferrand II. Français.132p
- **COME, D. 1992.** Les végétaux et le froid. Collection méthodes Hermann, éditeur des sciences et des arts .599p
- **COX, T.S., SHROYER, J.P. LIU, B.H. SEARS, R.G. AND MARTIN, T.J. 1988.** Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Sci.*, 28: 756–760
- **CRUZ J.F, HOUNHOUGAN D. J. HAVARD M., FERRE T., 2019.** La transformation des grains. Collection Agricultures tropicales en poche, Quae, presses agronomiques de Gembloux,CTA ,Versailles ,Gembloux , Wageningen.p182 .
- **DANYLUK J, PERRON A, HOUDE M., LIMIN A. FAWLER B., BENHAMOU N, and SARHAN F.,1998.** Accumulation of an acidie dehydrin in the vicinity of the plasma membrane during cold acclimation of wheat . *Plant cell* 10:623-638.
- **DANYLUK, J., A. PERRON, M. HOUDE, A. LIMIN, B. FOWLER, N. BENHAMOU AND F. SARHAN., 1998.** Accumulation of an acidic dehydrin in the vicinity of the plasma membrane during cold acclimation of wheat. *Plant Cell.* 10 :623-638.
- **DESWARTE J.C. 2021.** ARVALIS .info .fr 13/01 2021
- **DESWARTE J.C.2019.** La résistance au froid : un processus d'acclimatation progressif. ARVALIS info.fr
- **DJENNADE N. et ATTALAOUI F., 2019.** Effets de la salinité sur la germination des graines de Peganum Harmala, Mémoire de master, Option : Biotechnologie végétale. Univ. Mohamed Boudiaf-M'sila.37p

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **DJILALI Z., 2013.** Spécificité de l'expression des gènes CBF chez le blé Hexaploïde *Triticum aestivum* L. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en biologie : Univ. Québec à Montréal.78p
- **FEILLET P., 2000.** Le grain du blé. Composition et utilisation. Ed. INRA, Paris, pp : 17-18
- **FELIACHI, K., 2000.** Programme de développement de la Céréaliculture en Algérie. In proc. Symposium blé 2000, enjeux et stratégie Algérie 21-27.
- **FELLAH A., BENMAHAMMED A., DJEKOUN A.ET BOUZERZOUR H., 2002.** Sélection pour améliorer la tolérance au 78 stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Acts de l'IAV Hassan II, (Maroc) 22, 161-170.
- **FELLAHI Z., HANNACHI A., BOUZERZOURH. AND BENBELKACEM, A. 2016.** Genetic control of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) traits. Songklanakarine journal of science and technology, 38(1): 91-97.
- **FILALI H, GOUIDIA H, GHORAB M., 2021.** Influence du climat sur la qualité technologique du blé dur (*triticum durum*) de la wilaya de Guelma, Mémoire de master. Option : Qualité des produits se Sécurité Alimentaire. Univ. 8mai 1945 Guelma.65p
- **GACEM k. et HASSANI A. 2017.** Etude de l'effet du gel sur le comportement de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum*, Desf.). Thèse master univ. Ziane Achour Djelfa. 63 p
- **GALLAIS A., 1994.** La sélection assistée par marqueurs. Quel avenir pour l'amélioration des plantes. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Euro text. Paris. pp: 387-397
- **GATE P., 2008.** Pourquoi les blé gel. Perspectives agricoles. N°348. Pp 50-51.
- **GILMOUR S., ZARKA; S TOKINGER; SALAZAR M.; HOUGHTON J. and THOMASHOW M., 1998.** low temperature regulation of the Arabidopsis CBF family of ap2 transcriptional activators as an early step in cold-induced COR gene expression *plant journal* ;16 pp 433-442.
- **GUILLAUME C., 2011.** Mécanismes et modélisation de l'acclimatation au gel des arbres : application au noyer *Juglansregia* L. Sciences agricoles. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. Français. 203p
- **GUO S, DAI S, SINGH PK, WANG H, WANG Y, TAN JLH, 2018.** Membrane-Bound NAC-Like Transcription Factor OsNTL5 Represses the Flowering in *Oryza sativa*. *Frontiers in Plant Science*. 9.
- **HACHEMI L., 1979.** Le blé dur en Algérie. 5th cereal workshop on the Gap between present farm yield and potential, 19- 25

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **HADDAD L., 2010.** Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Thèse Magister, Faculté des Sciences, *UFA Setif*, 110 p.
- **HADDAD L., BOUZERZOUR H., BENMAHAMMED A., ZERARGUI, H., HANNACHI, A., BACHIR, A., SALMI, M., OULMI, A., FELLAHI Z., NOUAR, H. AND LAALA, Z. 2016.** Analysis of Genotype x Environment Interaction for Grain Yield in Early and Late Sowing Date on Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 9(3) : 139-146.
- **HAMDIS A. et KACI Y., 2020.** Etude bibliographique sur les symbioses chez *Triticum durum* L. Conduit en Agriculture de conservation sous climat semi-aride, Mémoire master. Option : production végétale. Univ. Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.39p
- **HAMOUM F. et HAMDY H.,** Etude de l'effets du stress salin sur la croissance et le potentiel de production de quelques activités liées à la PGP par des Rhizobactéries. Mémoire de master. Option : Biotechnologie des Micro-organismes. Univ Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem.49p
- **HANNACHI A., 2017.** Aptitude à la combinaison, selection mono et multi caractères et adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux condition semi-arides, Thèse de doctorat: Univ Ferhat Abbas Sétif 1.178p
- **HARE P.D. and CRESS W.A., 1997.** Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant cell and environment*.21: 535 - 553 p.
- **Hasanuzzaman M, Nahar K, Alam MM, Roychowdhury R, Fujita M., 2013.** Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms of Heat Stress Tolerance in *Plants*. *Int J MolSci*.14(5) : 9643-84.
- **HOUDE M., DANIEL C., LACHAPELLE M., ALLARD F., LALIBERTE S. and SARHAN F., 1995.** Immunolocalization of freezing-tolerance-associated proteins in the cytoplasm and nucleoplasm of wheat crown tissu. *Plant journal* : 8, pp 583-534.
- **HURD E.A., 1974.** Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agric. Meteo.*,14: 39-55.
- **INGRAM J ET BARTELS Q D., 1996.** The molecular basis of dehydration tolerance in plants. *Review of Plant Physiologie and plant mol. Biologie*. 47 :377-403p
- **JEAN D., 1996.** Identification et caractérisation moléculaire de gènes induits au cours de l'acclimatation au froid chez le blé (*Triticum aestivum*), Thèse de doctorat : Univ. Québec à Montréal. 124p

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **JEAN PIERRE KABONGOTSHIABUKOLE., 2018.** Evaluation de la sensibilité aux stress hydriques du maïs (zeamays l.) cultivate dans la savane du sud-ouest de la rd congo, cas de mvuazi. Agronomie. Université Pédagogique Nationale Kinshasa (République démocratique du Congo). Français .132p
- **JEAN-LOUIS R. ET ETHASSAN B., 2014.** Céréals et oléoprotéagineux au Maghreb. *Ipemed*,26p
- **JOSE BOVE., 2011.** Les céréales pour nourrir le monde. *défis sud* ,100 :4-33
- **KACI D. et RAMDANI L., 2020.** Contribution à l'étude de l'effet de la conservation des sols sur la qualité des sols sous climat semi-arides, Mémoire de master. Option : Science du sol. Univ. Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.38p
- **KARA R et KADRI S., 2021.** La flore fongique associée aux grains de blé et d'orge stockés, mémoire de master. Option : Microbiologie Appliquée. Univ. Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi.58p
- **KILASI NL, SINGH J, VALLEJOS CE, YE C, JAGADISH SVK, KUSOLWA P. 2018.** Heat Stress Tolerance in Rice (*Oryza sativa* L.): Identification of Quantitative Trait Loci and Candidate Genes for Seedling Growth Under Heat Stress. *Frontiers in Plant Science*. 2018 ; 9.
- **KITOUNI R., 2021.** Etude de tolérance du blé en réponse aux stress abiotiques : changements moléculaires, mémoire de master, option : Biotechnologie et Génomique végétale. Univ. Des frères Mentouri Constantine.1.41p
- **KLEIN., 2021.** Evaluation des dommages causés par le gel dans le blé. *Corteva Agriscience*, 1p
- **KOUBAA S., 2019.** Etude structurale et fonctionnelle d'une protéine LEA du groupe 3 impliquée dans la tolérance au stress abiotiques et biotiques chez le blé dur, Thèse de doctorat : Univ. Sfax.114p
- **LABGAA N. et FAKROUN N., 2018.** La sélection du blé dur (*Triticum durum* Desf.) pour la tolérance aux stress abiotiques, Mémoire de master. Option : Biotechnologie végétale. Univ. Ziane Achour Djelfa. 48P
- **LARDJANI A., 2019.** L'effet de stress salin sur la germination du fève (Variété locale, Luz de Otono, Claro de Luna). Mémoire de master. Option : Production végétale. Univ. Mohamed Khider Biskra.37P
- **LIU X, WANG T, BARTHOLOMEW E, BLACK K, DONG M, ZHANG Y., 2018.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Comprehensive analysis of NAC transcription factors and their expression during fruit spine development in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Horticulture Research*. 5(1).
- **MAESTRI E, KLUEVA N, PERROTTA C, GULLI M, NGUYEN HT, MARMIROLI N., 2002.** Molecular genetics of heat tolerance and heat shock proteins in cereals. *Plant Mol Biol*. 48(5) :667-81
 - **MAGRIN G., 1990.** Facteurs agissant sur la production du blé en argentine. Evaluation de mécanismes d'adaptation à la sécheresse. Thèse DDI. ENSA Mont p. 93 P
 - **MALLEK H., 2017.** Contribution à l'étude de la mycoflore associée aux grains de blé et d'orge dans la wilaya de Bouira, Mémoire de master. Option : Santé des plantes. Univ. Akli Mohand Oulhadj Bouira. 52P
 - **MARION MICHEL., 2016.** Réponse d'une plante pérenne aux stress abiotique et biotique, interaction entre sécheresse et oïdium de la vigne. Sciences agricoles. 25p
 - **MEKHALDI A., 2007.** Comportements physiologique et biochimique chez le Mung Bean (*Vignaradiata* (L.) Wilezek) stress a la salinité. Thèse doctorat : Univ D'Oran Es Senia.
 - **MEKHLOUF A., 2009.** La date fausse Etude de la variabilité génétique du blé dur (*triticumdurum*, Desf), pour la tolérance au froid , Thèse de doctorat. Univ. Institut national agronomique EL-Harrach Alger. 70P
 - **MEKHLOUF A., DEHBI F., BOUZERZOUR H., HANNACHI A., BENMOHAMED A et ADAJABI A., 2006.** Relation ship between cold tolerance, grain yield performance and stability of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes grown at high elevation area of eastern Algeria. *Asian Journal of Plant Science* 5(4) : 700-708
 - **MOHAMED CHABANE, JEAN-MARC BOUSSARD., 2012.** La production céréalière en Algérie : Des réalités d'aujourd'hui aux perspectives stratégiques de demain, 20p.
 - **MOSTEFAOUI H., 2011.** Etude d'impact du changement climatique sur la productivité du blé dur en zone semi-aride cas du bassin chéelif, mémoire de magister, Science de l'eau et bioclimatologie. Univ. Hassiba Benbouali Chlef. 92p
 - **NADJEM K., 2012.** Contribution à l'étude des effets du semis direct sur l'efficience d'utilisation de l'eau et le comportement variétal de la culture de blé en région semi-aride. Thèse magister, production végétale et agriculture de conservation. Univ. Ferhat Abbas Sétif. 98P
 - **NAJIMI B., EL JAAFARI S., JLIBÈNE M., et JACQUEMIN J., 2003.** Applications des marqueurs moléculaires dans l'amélioration du blé tendre pour la résistance aux maladies et aux insectes", *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 7(1) : 17 -35.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **NEFFAR F., 2013.** Analyse de l'expression des gènes impliqués dans la réponse au stress biotiques dans différents génotypes de blé dur (*triticum durum*) et l'orge (*Hordeum vulgare*) soumis à la sécheresse Ecologie et biologie végétale, Thèse doctorat université Ferhat Abbas. Sétif. 89P
- **NELSON D.E., RAMMESMAYER G. AND BOHNERT H.J., 1998.** Regulation of cell-specific inositol metabolism and transport in plant salinity tolerance. *Plant Cell.*, **10(5)**, p. 753-764
- **OKREFI Z ET BOUREZG N., 2020.** Caractérisation biochimique in vitro au stade tallage chez quelques variétés de blé tendre (*Triticum aestivum L.*) sous stress salin, mémoire de master. Option : Biotechnologie végétale. Univ. Mohamed Boudiaf M'sila.44p
- **ORVAR, B.L., SANGWAN V., OMANN F. AND DHINDSA R.S. 2000.** Early steps in cold sensing by plant cells: the role of actin cytoskeleton and membrane fluidity. *Plant Journal.* 23:785-794.
- **RABTI A., 2021.** Changements des caractères morpho-physiologiques induits par la sélection artificielle du blé dur (*Triticum durum Desf.*) en Algérie, Thèse de doctorat : Univ Ferhat Abbas Sétif 1.128p
- **RABTI A., MEKAOUSSI R., FELLAHI Z. E. A., HANNACHI A., BENBELKACEM A., BENMAHAMMED A. and BOUZERZOUR H., 2020.** Characterization of Old and Recent Durum Wheat [*Triticum turgidum* (L.) Tell. convar. *durum* (Desf.) Mackey] Varieties Assessed under South Mediterranean Conditions. *Egypt. J. Agron.*, 42(3) : 307-320.
- **RAP 2021.** Temps froid et gel printanier : effets sur les cultures. fiche technique grandes cultures. N° 1. 7 mai 2021. Pp 6-8
- **RICHARDS R. A., REBTZKE G. J., VAN HERWAARDLEN A. F., DUGGANB B. L., et CONDON A., 1997.** Improving yield in rainfed environments through physiological plant breeding. *Dryland Agriculture*, 36: 254-66
- **RICHARDS, R.A., REBETZKE, G.J., CONDON, A.G. and VAN HERWAARDEN, A.F. 2002.** Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci.*, 42: 111–121
- **RORAT T., GRYGOROWICZ, IRZYKOWSKI W. and REY P., 2004.** Expression of Ks-type déhydrines is primarily regulated by factors related to organ type and leaf developmental stage during vegetative growth. *Planta.* 218: 878-885
- **ROSEILLE A.A. et HAMBLIN J., 1981.** Theoretical aspect of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop sci.* 21, 923-932.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **RUELLAND, E., M.N. VAULTIER, A. ZACHOWSKI AND V. HURRY., 2009.** Cold Signalling and Cold Acclimation in Plants. In *Advances in Botanical Research*, Vol 49. Academic Press Ltd, London. 35-150p
- **SAKAI, A. AND LARCHER W., 1987.** Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress. In *Ecological studies*. Springer Verlag, Berlin. 321 p
- **Salamat F.Z et Kadiri F., 2016.** Les changements physiologiques et biochimiques de la tolérance aux stress abiotiques de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* desf.). Thèse master . univ. Ziane achour Djelfa .89 p
- **SALMI, M., HADDAD, L., OULMI, A., BENMAHAMMED, A. ET BENBELKACEM, A., 2015.** Variabilité phénotypique et sélection des caractères agronomiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi arides. *European Scientific Journal*, 11(21): 99-111.
- **SAUTER, J.J. AND S. WELLENKAMP S., 1998.** Seasonal changes in content of starch, protein and sugars in the twig wood of *Salix caprea* L. *Holzforschung*. 52:255-262.
- **SHARMA P., SHARMA N. and DESWAL R., 2005.** The molecular biology of the low-temperature response in plants. *bio essays* 27: PP 1048-1059
- **SIDDIQUI, K.S. AND CAVICCHIOLI R. 2006.** Cold-adapted enzymes. *Annual Review of Biochemistry*. 75 :403-433.
- **SUBIRA, J., AMMAR, K., ALVARO, F., GARCIA DEL MORAL, L.F., DREISIGACKER, S. AND ROYO, C. 2016.** Changes in durum wheat root and aerial biomass caused by introduction of the *Rht-B1b* dwarfing allele and their effectson yield formation. *Plant Soil*, 403: 291-304.
- **TAIBI K., 2008.** Etudes comparative des comportements hydriques, de croissance et minéral de deux légumineuses *Vicia faba* L., et *Phaseolus vulgaris* L., stressés à la salinité, mémoire de magister, Ecophysiologie végétale. Univ. D'es-Senia -Oran.89p
- **TAKEOKA Y, HIROI K, KITANO H, WADA T. 1991.** Pistil hyperplasia in rice spikelets as affected by heat stress. *Sexual Plant Reprod*. 4(1):39-43.
- **TASHIRO T, WARDLAW IF., 1990.** The Response to High Temperature Shock and Humidity Changes Prior to and During the Early Stages of Grain Development in Wheat. *Functional Plant Biol*.17(5):551-61.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **TAYEB CHERIF N. ET REBAI S., 2014.** Evaluation de quelques lignées de blé tendre (*Triticum aestivum*) dans la région semi-aride de Sétif, Mémoire de master. Option : Phytopathologie. Univ. Bordj Bou Arreridj.45P
- **TEGGAR N., 2015.** Etude de l'effet du stress salin sur la nodulation et sur quelques paramètres biochimiques et morphologiques de la lentille (*Lens culinaris L.*). Thèse magister. Ecophysiologie Végétale., Univ D'Oran Es Senia.59P
- **TELLAH S., 2016.** Etude des mécanismes agro physiologique, morphologique et moléculaires impliqués dans la tolérance au stress hydrique chez quelques populations locales d'arachide (*Arachishypogaea L.*), Thèse doctorat : Ecole Nationale Supérieures Agronomique.228P
- **TEMAGOUT M., 2009.** Analyse de la variabilité de la réponse au stress hydrique chez des lignées recombinantes de tournesol (*Helianthus annus L.*). Thèse magister. Biologie végétale et Ecologie. Univ. Des Frères Mentouri Constantine.106p
- **THOMASHOW M., 1998.** role of cold-responsive gene in plant freezing tolerance. *Plant physiology* 118: pp1-7.
- **THOMASHOW MF., 1999.** plant cold acclimation: freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. *Annu Rev Plant physiol plant mol biol* 50 : 571-599.
- **Uemura, M., R.A. Joseph and P.L. Steponkus 1995.** Cold- Acclimation of *Arabidopsis-Thaliana* - Effect on Plasma-Membrane Lipid-Composition and Freeze-Induced Lesions. *Plant Physiology*. 109:15-30
- **UPOV., 1994.** Principes directeurs pour la conduite de l'examen des caractères distinctifs, de l'homogénéité et de la stabilité. Blé tendre (*Triticum aestivum L.*). 55p.
- **WAHID A, GELANIS, ASHRAF M, FOOLAD M. 2007.** Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*.61(3):199-223
- **Wardlaw IF, Moncur L., 1995.** The response of wheat to high temperature following anthesis. The rate and duration of kernel filling. *Aust J. Plant Physiol.*, 22, 391-397.
- **WORLAND A. J., BÖRNER A., KORZUN V., LI W. M., PETROVÍC S. AND SAYERS, E. J., 1998.** The influence of photoperiod genes on the adaptability of European winter wheats. *Euphytica*, 100 (1-3): 385-394.
- **YAMAGUCHI-SHINOZAKI K., et SHINOZAKI K., 2005.** Organization of cisacting Regulatory elements in osmotic- and cold-stress responsive promoters. *Trends Plant Sei.*, Vol. 10,P. 88-94.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- **YAMASAKI K, KIGAWA T, INOUE M, WATANABE S, TATENO M, SEKI M., 2008.** Structures and evolutionary origins of plant-specific transcription factor DNA-binding domains. *Plant Physiology and Biochemistry*. 46(3):394-401
- **ZADOKS JC, CHANG TT, KONZAK CF. 1974.** A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*. 14(6):415-21
- **ZAHI W. et LAMARA M., 2019.** Effet de la salinité sur la germination et la croissance d’*Atriplex halimus* cas de Mostaganem et Oran. Mémoire de master. Option : Amélioration des production végétales. Univ. Abdelhamid Ibn Badis- Mostaganem.61P
- **ZINN KE, TUNC-OZDEMIR M, HARPER JF. 2010.** Temperature stress and plant sexual reproduction: uncovering the weakest links. *J Exp Bot*. 61(7):1959-68.

ANNEXE

ANNEXE

LA REACTION DU BLE FACE AU GEL :

Les plantes vont réagir de plusieurs manières, selon leurs caractéristiques (Gérard Fevre.2012)

- Tout d'abord, lors du gel de l'eau dans le sol, il n'y a pas de problème particulier car les liquides internes de la plante restent liquides. Là, la plante s'est préparée en stockant des sucres, des sels minéraux qui abaissent le point de gel de l'eau dans ses tissus. De même, elle aura limité sa teneur en eau pour éviter l'impact du gel (Gérard Fevre.2012)
- Ensuite, s'il y a une baisse plus importante de température, les plantes utilisent l'expulsion d'eau de l'intérieur de la cellule vers les espaces intercellulaires. La perméabilité de la membrane cellulaire permet à une partie de l'eau de quitter la cellule pour aller dans les espaces entre les cellules. De cette manière, l'eau restante ne gèlera pas à l'intérieur de la cellule car elle aura une concentration forte d'éléments minéraux et de sucres(Gérard Fevre.2012)
- Enfin, s'il y a encore une baisse de température, le froid entraîne le gel de l'eau à l'intérieur de la cellule. Cela cause la mort des cellules qui éclatent. On voit alors des blessures sur le végétal dont certaines parties se fendent et ces blessures peuvent provoquer ensuite la mort entière de la plante <http://plantesetcouleurs.fr/>.

PHENOMENE DE SURFUSION :

L'abaissement du point de congélation atteint son maximum à -5°C , afin de permettre aux liquides biologiques de rester à l'état liquide, les plantes utilisent une autre technique la surfusion (Goubier, 2006), qui consiste à la capacité de la plante à éliminer les noyaux de nucléation responsables de l'apparition des premiers cristaux de glace.

La surfusion permet à la plante de résister jusqu'à -40°C , en effet l'eau intra cellulaire va être déplacée à l'extérieur des cellules, formant de la glace extracellulaire.

La teneur en eau dans les cellules va en parallèle diminuer afin de limiter la présence d'eau gelable dans les cellules. L'organisme subit alors une déshydratation très poussée, permettant à la plante de rentrer en vie ralentie ou en période de latence.

Lorsque les conditions deviennent plus clémentes les organismes reprennent vie, on parle de reviviscence (Goubier, 2006).

ÉVALUATION DES DOMMAGES CAUSES PAR LE GEL :

Pour évaluer les dégâts du froid, la fin de la période de gel est requise (Gate, 2008). Il faut

- Évaluez les plus grosses talles en tranchant la tige.
- Trouvez le point de croissance en développement.
- Si la talle est en montaison, l'épi se trouve juste au-dessus. Chez les talles non complètement développées, le point de croissance peut encore se trouver au-dessus de la surface du sol.
- Vérifiez la présence de décolorations, d'épis non fermes ou croustillants, de tissus visqueux à l'intérieur de la tige ou d'une odeur de pourriture (<https://www.pioneer.com/ca-fr/ressources-agronomiques/evaluation-des-dommages-causes-par-le-gel-dans-le-ble.html>)
- Essayez de calculer le nombre prévu d'épis par pied carré pour une bonne prise de décision.
- Chez le blé endommagé par le gel, visez au moins 50 épis de blé viables par pied carré.

Résumé

Chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) le froid est une des causes des pertes des rendements. La compréhension des mécanismes de réponse du blé dur au froid (basses températures et gel) est donc une problématique d'actualité. Est de ce fait indispensable en vue d'améliorer la résistance chez cette espèce.

Le présent travail est une revue de littérature des principaux effets du froid sur la physiologie de la plante ainsi que sa biochimie et sa morphologie. Le froid affecte négativement le blé dur, engendre la perturbation de ses processus fondamentaux entre autres l'activité photosynthétique, la teneur en eau, la transpiration, la respiration et peut avoir lieu à n'importe quel stade de développement de la plante.

Au cours de sa résistance au froid, le blé dur montre des changements physiologiques, biochimiques et moléculaires, qui sont l'accumulation d'osmoprotecteurs et la synthèse des protéines cryprotectrices avec la régulation de l'expression des gènes. Cette résistance au froid augmente quand le blé dur est endurci dans des conditions de basses températures non gélives.

Ce processus d'acclimatation lui donne le temps d'exprimer ses potentialités génétiques.

Le recours à la sélection est une des alternatives pour obtenir des variétés de blé dur plus résistantes et tolérante au froid.

Mots clés : *Triticum durum* Desf., stress , endurcissement, gel

الملخص

عند القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) يعتبر البرد أحد أسباب فقدان المردود لذا فإن فهم آليات استجابة القمح الصلب للبرودة (درجات الحرارة المنخفضة والصقيع) هو قضية الساعة. لذلك فهو ضروري لتحسين المقاومة في هذا النوع.

هذا العمل عبارة عن ملخصات بليوغرافية للتأثيرات الرئيسية للبرد على فسيولوجيا النبات بالإضافة إلى الكيمياء الحيوية والمورفولوجية. يؤثر البرد سلباً على القمح الصلب، ويعطل عملياته الأساسية، بما في ذلك نشاط التمثيل الضوئي، ومحتوى الماء، والتنفس، ويمكن أن يحدث في أي مرحلة من مراحل نمو النبات. أثناء مقاومته للبرد، يظهر القمح الصلب تغيرات فسيولوجية وكيميائية حيوية وجزيئية، والتي تتمثل في تراكم المواد الواقية وتخليق البروتينات الواقية من التجمد مع تنظيم التعبير الجيني.

تزداد هذه المقاومة للبرودة عندما يتم تأقلم القمح الصلب في ظروف درجات الحرارة المنخفضة بدون الصقيع. تمنحه عملية التأقلم هذه الوقت للتعبير عن إمكاناته الوراثية.

يعتبر اللجوء إلى الاختيار أحد البدائل للحصول على أصناف من القمح الصلب أكثر مقاومة وتحملاً للبرد.

الكلمات الدالة : *Triticum durum* Desf ، الإجهاد ، الصقيع ، التأقلم.

Abstract

In durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cold is one of the causes of yield losses. Understanding the mechanisms of durum wheat response to cold (low temperatures and frost) is therefore a topical issue. It is therefore essential to improve resistance of this species.

This work is a literature review of the main effects of cold on the physiology of the plant as well as biochemistry and its morphology. Cold affects negatively durum wheat, causes the disruption of its fundamental processes including photosynthetic activity, water content, transpiration, respiration and can take place at any stage of plant development.

During its resistance to cold, durum wheat shows physiological, biochemical and molecular changes, which are the accumulation of osmoprotectants and the synthesis of cryprotective proteins with the regulation of gene expression. This resistance to cold increases when durum wheat is hardened in low temperature conditions without frost. This process of acclimatization gives him times to express his genetic potential.

Selection is one of the alternatives to obtain varieties of durum wheat that are more resistant and tolerant of frost.

Key words : *Triticum durum* Desf., stress , hardening, freezing.