



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



**Thèse**

**Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Science**

**Option : Biologie végétale**

**Intitulé**

**Identification de quelques marqueurs physiologiques et biochimiques  
pour l'amélioration de la tolérance au stress hydrique chez les  
céréales : cas d'un germoplasme de blé dur (*Triticum durum* Desf)**

**Réalisé par : Madame FELLAH Imene**

**Devant le Jury :**

**Président(e) : TAHAR Ali**

**Pr. Université Badji Mokhtar -Annaba**

**Directeur de thèse : BRINIS Louhichi**

**Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba**

**Examineur : BEKHOUCHE Fatiha**

**Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba**

**Examineur : CHEFROUR Azze Dine**

**Pr. Université Mohamed Cherif Messadia-Souk Ahras**

**Examineur : BELAHCEN Nabih**

**MC.Université Mohamed Cherif Messadia-Souk Ahras**

**Examineur : BENDJEDDOU Amel**

**MC.Université Mohamed Cherif Messadia-Souk Ahras**

**Année Universitaire : 2016/2017**

# Remerciement

- Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon directeur de thèse Monsieur **Brinis Louhichi** Professeur au département de biologie, Université de Badji –Mokhtar – Annaba ; qui a suivi et dirigé ce travail. Je le remercie pour sa patience et sa disponibilité qu'il a manifestée.
- Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères et mon profond respect à Monsieur **TAHAR Ali**, Professeur au département de biologie, Université de Badji –Mokhtar –Annaba, pour son aide et ses conseils judicieux et qui me fait l'honneur de présider le jury.
- Je tiens à remercier Madame **BEKHOUCHE Fatiha**, Professeur au département de biologie, Université de Badji –Mokhtar –Annaba de m'avoir honoré en acceptant de faire partie du jury et d'examiner ce travail.
- Mes sincères remerciements vont à Monsieur **Chefrour Azzedine**, Professeur au département de biologie Université Mohamed Cherif Messadia – Souk Ahras, de bien vouloir faire partie du jury et d'examiner ce travail.
- J'exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance à Madame **Belahcen Nabiha** Maître de conférence au département de biologie Université Mohamed Cherif Messadia – Souk Ahras, de bien vouloir faire partie du jury et examiner ce travail.
- J'exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance à Madame **BENDJEDDOU Amel** Maître de conférence au département des Sciences de la Matière, Université Mohamed Cherif Messadia – Souk Ahras, de bien vouloir faire partie du jury et examiner ce travail.
- Je tiens à remercier Monsieur **BENBELKACEM Abdel Kader** directeur de l'INRAA, pour son extrême aide.
- Enfin, toute mes gratitude à ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# *Dédicace*

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés et continuer mon travail.

Je dédie ce travail à:

Mes parents **EL HADJA MALIKA et EL HADJ MAHMOUD** Vous êtes dépensés pour moi sans compter. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que Je dédie ce travail à

Mon cher mari ***Djamel***

Mon petit fils **AYOUB** le sucre de notre vie

Avec toute ma tendresse, à mes sœurs Foufa, Khaoula, Karima, Pina, Myriam et Ibtissem.

A ma GRAND MERE et ma chère tante Djamila

A mes oncles, tantes, cousins et cousines.

A ma belle famille

Spécial dédicace à mes collègue et amies Assouma et Amel qui m'ont fortement aidé tout le long de mon parcours universitaire. A tous les membres de ma promotion. A mes amis. A tous mes professeurs.

A la fin une pensé à ma belle sœur *SALIMA*.

*imene*

### Résumé

Un essai de blé dur constitué de six génotypes (Waha, Araldure, Durbel, Hedba-3, Guemgoum rkhem et Beliouni) a été réalisé en vue de vérifier et d'évaluer la variabilité de résistance de ces génotypes de blé dur *Triticum durum* Desf soumises à un stress hydrique.

Les différentes analyses ont porté sur quelques caractères physiologiques et biochimiques chez six génotypes ; le but étant de cerner les mécanismes d'adaptation au stress hydrique et ce, à travers l'expression des réponses génotypiques.

Les résultats obtenus montrent que le stress hydrique a entraîné une modification au niveau de la physiologie des plantes. Il est à signaler que les variétés Waha, Hedba-3 et Beliouni manifestent mieux que les autres génotypes.

De même une accumulation de proline, protéine et de sucre ; avec une augmentation de l'activité enzymatique a été marquée chez tous les génotypes avec supériorité des variétés Waha et Beliouni.

Ce travail expérimental nous tolère de confirmer que la réponse de blé dur diffère d'une variété à l'autre et dépend au niveau de stress appliquée.

Parmi les paramètres étudiés, certains semblent être de bons indicateurs de tolérance et répondre favorablement à la pression exercée (contrainte hydrique).

Les résultats obtenus nous permettent d'inscrire certains de ces traits dans un programme d'amélioration génétique des plantes comme étant des paramètres de sélection vis-à-vis d'un déficit hydrique.

**Mots clés :** Blé dur, Stress hydrique, Proline, Protéine, Adaptation.

### Abstract

A durum wheat test consists of six genotypes (Waha, Araldure, Durbel, Hedba-3 Guemgoum rkhem and Beliouni) was carried out to verify and assess the resistance of these genotypes of durum wheat *Triticum durum* Desf as far as a water stress.

Different analyzes focused on some physiological and biochemical characteristics in six genotypes; the aim being to identify the mechanisms of adaptation to water stress and, through the expression of genotypic responses.

The results show that water stress caused a change in the physiology of plants. It should be noted that varieties Waha, Hedba-3 and Beliouni manifest better than other genotypes.

Also, there was an accumulation of prolin, protein and sugar; with an increase in the enzymatic activity was marked in all genotypes with superiority in the varieties Waha and Beliouni.

This experimental work allows us to confirm that the durum wheat response with different from between varieties and depends on the applied stress.

Among the parameters studied, some seem to be good indicators of tolerance and respond positively to the pressure exerted (water stress).

The obtained results allow us to include some of these features in a plant genetics improvement program as selection parameters overlooked a water deficit.

**Keywords:** Durum wheat, Water stress, Prolin, Protein, Adaptation.

### ملخص

تم اجراء اختبار على القمح الصلب المكون من ستة انماط جينية (، Durbel، Araldure، Hedba 3 Guemgoum و Beliouني و rkhem) للتحقق من تغير مقاومة هذه الانماط وتقييمها عندما تخضع المائي للاجهاد. ركزت مختلف التحاليل على بعض الخصائص الفسيولوجية والبيوكيميائية لدى ستة أنماط جينية بهدف التعرف على آليات التكيف مع الإجهاد المائي، وذلك من خلال التعبير عن الردود الوراثية.

وأظهرت النتائج أن الإجهاد المائي تسبب في ظهور تغييرات على مستوى فسيولوجيا النبات. ومن الجدير بالذكر أن الاصناف التالية : Hedba 3 - waha و Beliouني تظهر أفضل من الانماط الوراثية الاخرى .

ايضا ، لوحظ تراكم للبرولين والبروتين والسكر؛ مع زيادة في النشاط الأنزيمي لدى جميع الانماط الوراثية مع وجود تفوق لكل من waha و Beliouني.

هذا العمل التجريبي يسمح لنا بتأكيد أن استجابة القمح الصلب تختلف من صنف إلى آخر و تعتمد على الإجهاد المطبق. من بين الاعدادات المدروسة ، البعض منها تبدو مؤشرات جيدة للتجاوب مع الضغوط التي تمارس (الإجهاد المائي).

النتائج التي تم التوصل اليها تسمح لنا أن ندرج البعض من هذه الميزات في برنامج تحسين الوراثة و النباتية المائي للاجهاد تعرضها عند انتقاء عوامل اعتبارها

**المفتاحية الكلمات :** القمح الصلب ، الإجهاد المائي- البرولين- البروتين- التكيف

## Liste des figures

N°	Titre	Pages
1	Evolution de la demande en céréales des pays du bassin méditerranéen	5
2	Cycle de développement du blé	11
3	Les semis	30
4	Installation de l'essai	30
5	Application de stress au stade cinq feuilles	30
6	La capacité au champ	31
7	taux de germination du premier comptage pour six variétés	33
8	taux de germination du deuxième comptage pour six variétés	33
9	taux de germination du troisième comptage pour six variétés	33
10	les semis sur papier buvard	34
11	6 <sup>ème</sup> jour de semi sur papier buvard	34
12	8 <sup>ème</sup> jour de semi sur papier buvard	35
13	10 <sup>ème</sup> jour de semi sur papier buvard	35
14	14 <sup>ème</sup> jour de semi sur papier buvard	36
15	Etape du teste Tétrazolium	37
16	Mesure du poids de la matière fraîche	37
17	Obtention de taux de réhydratation maximum	38
18	séchage des feuilles à l'étuve	38
19	Les étapes de détermination de la surface foliaire	40
20	les étapes de la détermination de la biomasse	41
21	Les étapes du dosage de la chlorophylle	42
22	Les étapes du dosage de la proline	43
23	Poids de mille grains exprimé en gramme (g)	48
24	Taux de germination du premier comptage pour les six variétés (après trois jours)	49

25	Taux de germination du deuxième comptage pour les six variétés (après six jours)	49
26	Taux de germination du troisième comptage pour les six variétés (après dix jours).	50
27	Cinétique de croissance de la Longueur moyenne du coléoptile des six variétés (exprimée en cm).	51
28	Cinétique de croissance de la longueur moyenne de la racine des six variétés (exprimée en cm).	51
29	Exploration topographique au Tetrazolium	54
30	Classement des variétés selon la viabilité et la vigueur des graines	55
31	Variation de la surface foliaire sous l'effet du stress hydrique	57
32	Variation de la teneur relative en eau sous l'effet stress hydrique	58
33	Variation de la teneur de déperdition d'eau sous l'effet du stress hydrique	59
34	Biomasse du poids de la partie aérienne (matière fraîche) en fonction du stress hydrique des six variétés exprimée en gramme (g).	60
35	Biomasse du poids de la partie racinaire (matière fraîche) en fonction du stress hydrique des six variétés exprimée en gramme (g).	61
36	Le ratio R/C de la biomasse de la matière fraîche	61
37	résultats de la biomasse du poids de la partie aérienne (matière sèche) en fonction du stress hydrique des six variétés (g).	62
38	résultats de la biomasse du poids de la partie sous terrain (matière sèche) en fonction du stress hydrique des six variétés exprimée en gramme (g).	63
39	Le ratio R/C de la biomasse de la matière sèche	63
40	Variation de pourcentage de la matière sèche (MS%) de la partie aérienne sous l'effet de stress hydrique	64
41	Variation de pourcentage de la matière sèche (MS%) de la partie sous terrain sous l'effet de stress hydrique	65

42	Variation de la teneur en chlorophylle <b>(a)</b> sous l'effet du stress hydrique	65
43	Variation de la teneur en chlorophylle <b>(b)</b> sous l'effet du stress hydrique	66
44	Variation de la teneur en chlorophylle <b>(a+b)</b> sous l'effet du stress hydrique	67
45	Variation de la teneur en proline sous l'effet du stress hydrique	68
46	Variation de la teneur en protéine sous l'effet du stress hydrique	69
47	Variation de la teneur en sucre sous l'effet du stress hydrique	70
48	V Variation de la teneur en catalase sous l'effet du stress hydrique	71

## Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>1</b>	Composition chimiques des grains de blé	14
<b>2</b>	Les variétés étudiées et leurs caractéristiques	29

## Liste des tableaux annexes

N°	Titre	Pages
1	Résultats de l'analyse de la variance (RWC)	96
2	Résultats de l'analyse de la variance (RWL)	96
3	Résultats de l'analyse de la variance (Surface foliaire)	96
4	Résultats de l'analyse de la variance (Chl a)	96
5	Résultats de l'analyse de la variance (Chlb)	96
6	Résultats de l'analyse de la variance (Chl a+b)	97
7	Résultats de l'analyse de la variance (Proline)	97
8	Résultats de l'analyse de la variance (Sucre)	97
9	Résultats de l'analyse de la variance (Protéine)	97
10	Résultats de l'analyse de la variance (Catalase)	97
11	<b>Poids de mille graines</b>	98
12	6 <sup>ème</sup> jour de semi sur papier buvard	98
13	8 <sup>ème</sup> jour de semi	99
14	le 10 <sup>ème</sup> jours de semi	100
15	le 14 <sup>ème</sup> jours de semi	101
16	RWL en fonction du stress hydrique exprimé en g/cm <sup>2</sup> /mn pour les six variétés	102
17	Résultats de la turgescence « Poids frais » (exprimé en gramme)	103
18	Biomasse « poids sec» (exprimé en gramme)	103
19	Biomasse « poids frais» (exprimé en gramme)	104
20	Biomasse « pourcentage de la matière sèche (MS)» (exprimé en gramme)	104
21	Teneur en chlorophylle « a » de six variétés en fonction des niveaux de stress (Exprimées en µg/g/MF).	105
22	Teneur en chlorophylle « b » des six variétés en fonction des	105

	niveaux de stress (Exprimées en $\mu\text{g/g/MF}$ )	
23	Teneur en chlorophylle « a+b » de six variétés en fonction des niveaux de stress (Exprimées en $\mu\text{g/g/MF}$ )	106
24	Teneur en proline en fonction des niveaux du stress hydrique (exprimée en $\mu\text{g/g. MF}$ ) de six variétés.	106
25	Teneur en protéine en fonction des niveaux du stress hydrique	107
26	Teneur en Sucres solubles en fonction des niveaux du stress hydrique	107
27	Teneur en Catalase en fonction des niveaux du stress hydrique	107

## Liste des Abréviations

- **BBC** : Bleu Brillant de coomassie
- **BSA** : Albumine SÉRUM de Boeuf
- **CAM** : Crassulacées Acide Métabolisme
- **CAT** : Catalase
- **Chl** : Chlorophylle
- **FAO** : Food and Agriculture Organisation.
- **Glu** : Glutamique
- **ITGC** : Institut Technique des Grandes Cultures.
- **JNO** : Virus de la Jaunisse Nanisant de l'orge
- **MS%** : Biomasse
- **Orn** : Ornithine
- **Pro** : Proline
- **RWC** : Relative Water Content.
- **RWL** : Rat Water Loss of excised leaves.
- **SF** : Surface Foliaire
- **T0** : Témoin
- **T1** : Traitement 1
- **T2** : Traitement 2
- **TZ** : Tétrazolum
- **V1** : Waha
- **V2** : Alardur
- **V3** : Durbel
- **V4** : Hadba-3
- **V5** : Guemgoum Rkhem
- **V6** : Belioni
- **VMB** : Virus de la Mosaïque du Blé
- **XET** : Xyloglucane Endo-Trans-glucanase
- **Fig** : Figure

## Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Sommaire	
Introduction .....	1
<b>Partie 1 : Synthèse bibliographique</b>	
<b>Chapitre 1 : Généralité sur le blé</b>	
1. Généralité sur le blé.....	3
2. Origine et histoire du blé.....	3
3. Situation du blé .....	4
3.1. Dans le monde .....	4
3.2. En l'Algérie .....	4
4. Classification et Description du blé .....	6
4.1. Classification .....	6
4.2. Description .....	6
5. Structure génétique .....	7
6. Cycle de croissance et de développement du blé .....	8
6.1. La période végétative .....	8
6.1.1. La phase germination – levée .....	8
6.1.2. La phase levée – tallage .....	8
6.1.3. Phase Tallage – Montaison .....	8

## Sommaire

6.2. La période reproductrice .....	9
6.2.1. La phase montaison –gonflement .....	9
6.2.2. La phase épiaison – floraison .....	9
6.2.3. La phase Floraison –Fécondation .....	9
6.3. La période de formation et de maturation du grain .....	9
6.3.1. Grossissement du grain .....	9
A. Maturité Pâteuse .....	9
B. Maturité Laitieuse .....	9
C. Maturité Complète .....	10
7. Les exigences du blé .....	12
7.1. Exigences climatiques .....	12
7.1.1. Température .....	12
7.1.2. Eau .....	12
7.1.3. Lumière .....	12
7.2. Exigences édaphique .....	12
8. le grain de blé.....	13
8.1. Composition biochimique du grain .....	14
8.2. Physiologie de la germination .....	15
9. Les maladies du blé .....	15
9.1. Les fusarioses .....	15
9.2. Le charbon du blé .....	15
9.3. La carie du blé .....	15
9.4. Les rouilles .....	16
9.5. Mosaïque du blé .....	16

### Chapitre 2 : Stress hydrique

## Sommaire

1. Notion de stress .....	17
2. Notion de stress hydrique .....	17
3. Influence du stress hydrique sur le rendement du blé dur .....	18
4. Stratégies et mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique .....	18
4.1. Adaptations morphologiques .....	19
4.1.1. Au niveau de la plante .....	19
4.1.2. Au niveau structurel .....	19
4.2. Adaptations physiologiques .....	20
4.2.1. Régulation stomatique .....	20
4.2.2. Ajustement osmotique .....	22
4.3. Adaptations phénologiques .....	22
4.4. Adaptations biochimiques .....	22
4.4.1. Accumulation de la proline .....	22
4.4.2. Rôles des sucres .....	23
4.4.3. Synthèse des protéines liées à la tolérance au stress hydrique .....	24
A. Dehydrines (Protéines LEA).....	24
B. Les aquaporines .....	25
4.5. Gènes variés au cours du stress hydrique .....	25
5. Systèmes antioxydants .....	26
6. Stratégies de l'amélioration génétique pour la tolérance à la sécheresse .....	27
6.1. Sélection directe du rendement et de sa stabilité .....	27
6.2. Sélection indirecte du rendement dite analytique explicative.....	28

### Partie 2 : Matériels et Méthodes

1. Matériels végétales .....	29
2. Méthodes expérimentales .....	30
2.1. Installation de l'essai .....	30

## Sommaire

2.2. Conduite de l'essai .....	31
2.3. Application de stress .....	32
2.4 Analyses effectués sur la semence.....	32
2.4.1 Calcule du poids de mille graines .....	31
2.4.2. Taux de germination .....	32
2.4.3. La cinétique de la croissance .....	33
2.4.4. Essai topographique au Tétrazolium (TZ) .....	36
2.5. Paramètres physiologiques.....	37
2.5.1. Teneur relative en eau (RWC).....	37
2.5.2. Détermination du taux de déperdition d'eau (RWL) .....	39
2.5.3. La surface foliaire (SF) .....	40
2.5.4. La biomasse .....	40
2.5.5. Dosage de la chlorophylle .....	41
2.6. Paramètres biochimiques .....	42
2.6.1. Dosage de la proline .....	43
2.6.2. Dosage des protéines .....	44
2.6.3. Dosage des sucres .....	44
2.6.4. Dosage de l'enzyme Catalase.....	45
3. Analyse statistique des résultats .....	46

### Partie 3 : Interprétation des Résultats

1. Analyses effectuées sur la semence.....	48
--	----

## Sommaire

1.1. Poids de mille grains .....	48
1.2. Taux de germination.....	49
1.3. La Cinétique de croissance.....	51
1.4. Test de Tetrazolium (TZ).....	52
<b>2. Effet du stress hydrique sur les paramètres physiologiques chez les six variétés du blé dur .....</b>	<b>57</b>
2.1. La surface foliaire (SF) .....	57
2.2. La teneur relative en eau (RWC) .....	58
2.3. La teneur déperdition d'eau (RWL) .....	59
2.4. La biomasse (MS%) .....	60
2.4.1. Biomasse de la matière fraîche.....	60
2.4.2. Biomasse de la matière sèche.....	62
2.4.3. Pourcentage de la matière sèche (MS%).....	64
2.5. La teneur en chlorophylle .....	65
2.5.1. La teneur en chlorophylle a (Chl a) .....	65
2.5.2 La teneur en chlorophylle b (Chl b) .....	66
2.5.3 La teneur en chlorophylle a+b (Chla+b) .....	67
<b>3. Effet du stress hydrique sur les paramètres biochimiques chez les six variétés du blé dur</b>	<b>68</b>
3.1. La teneur en proline .....	68
3.2. La teneur en protéine .....	69

## Sommaire

3.3. La teneur en sucres solubles .....	70
3.4. L'activité enzymatique le catalase .....	71

### **Partie 4 : Discussion**

Discussion générale .....	72
Conclusion .....	77
Références bibliographiques .....	80

Annexes

Article

## Introduction

Les céréales cultivées depuis des milliers d'années, constituent la base de notre alimentation et jouent la carte de la diversité. La production agricole dans le monde est fortement limitée par les conditions de milieu au premier rang des quelles figure la sécheresse. D'après **Kramer (1983)** le déficit hydrique est le facteur limitant majeur des rendements des céréales.

Les céréales sont des espèces généralement cultivées pour leur grain, dont l'albumen amylicé, réduit en farine, est consommable par l'homme ou par les animaux domestiques. La filière céréalière constitue une des principales filières de la production agricole en Algérie. Les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Cette caractéristique est perçue d'une manière claire à travers toutes les phases de la filière (**CIC, 2000**). Parmi ces céréales, Le blé occupe la première place pour la production mondiale et la deuxième après le riz, comme source de nourriture pour les populations humaines, il assure 15% de ses besoins énergétiques (**Bajji, 1999**).

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

En Algérie, une grande partie des terres situées dans les régions arides et semi-arides est occupée par les céréales dont les rendements restent faibles et irréguliers. La culture de blé dur, y occupe une superficie importante, plus d'un million d'hectares (**Benlaribi, 1990**). Cette culture est conduite sous conditions pluviales. Elle est soumise à la variabilité climatique qui se traduit par des contraintes hydriques et thermiques erratiques, notamment dans l'étage bioclimatique semi-aride qui se caractérise par de larges fluctuations spatio-temporelles des quantités de pluies (200 à 600 mm/an) et des températures (**Benseddik et khelloufi, 2000**).

De ce fait, les stress abiotiques sont fréquents et plus particulièrement lorsque le cycle de la culture tire à sa fin (**Bahlouli et al., 2005**). Les stress environnementaux, notamment le stress hydrique, limitent sérieusement la croissance des plantes ainsi que la productivité végétale (**Wang et al., 2003**). Sous ces conditions contraignantes, le sélectionneur est à la recherche de génotypes qui possèdent un haut potentiel et la régularité de rendement (**Brancourt-Hulmel et al., 2003**).

Actuellement, les programmes modernes d'amélioration du blé, s'intéressent surtout à la qualité du grain et aux propriétés culturales de la plante comme l'amélioration génétique de la tolérance au stress hydrique, le rendement et l'aptitude de récolte (**El Mourid et al., 1996**). Cette amélioration exige d'étudier, d'identifier et de vérifier les caractères phénologiques, morpho physiologiques et biochimiques liés au rendement en condition de stress hydrique (**Pfeiffer et al., 2000**).

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

Notre travail s'organise en quatre parties théorique et pratique commençant par une introduction :

- ✓ **Partie 1**, est une synthèse bibliographique qui contient un 1<sup>er</sup> chapitre comprenant une généralité et une synthèse descriptive du blé dur (*Triticum durum* Desf.) et un 2<sup>ème</sup> chapitre sur le stress hydrique et les mécanismes morpho physiologiques, biochimiques de la tolérance des plantes au stress hydrique.
- ✓ **Partie 2**, où nous verrons successivement la description du matériel biologique et chimique que nous avons utilisé durant les tests réalisés au laboratoire et les méthodes de dosage des différents paramètres biologiques étudiés.
- ✓ **Partie 3**, fait l'objet de la présentation des résultats obtenus dans ce travail
- ✓ **Partie 4**, discussion des résultats.
- ✓ Nous terminons cette étude par une conclusion générale dans laquelle nous rassemblons l'ensemble des résultats obtenus durant ce parcours de mémoire, suivies de la liste de références bibliographiques et l'annexe.

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

## 1. Généralités sur le blé

Le blé est la céréale la plus consommée dans le monde et la plus échangée sur les marchés internationaux. Principalement cultivée pour l'alimentation humaine, elle est utilisée pour la fabrication du pain, des pâtes, des semoules, des galettes (**Garnier, 2004**).

On distingue plusieurs espèces de blé dont les plus cultivées sont le blé tendre (*Triticum sativum.lam*) et le blé dur (*Triticum durum*. Desf). (**Nyabyenda, 2005**).

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une céréale cultivée dans de très nombreux pays surtout sous le climat méditerranéen comme l'Afrique du Nord et les grandes plaines des Etats-Unis. C'est une plante herbacée, annuelle, monocotylédone de hauteur moyenne et dont le limbe des feuilles est aplati, les feuilles sont larges et alternées, la paille souple et fragile, formée d'un chaume portant un épi constitué de deux rangées d'épillets sessiles et aplatis (**Alhachemi, 2014**).

## 2. Origine et histoire du blé

Le blé est l'espèce avec laquelle l'homme a commencé à manipuler la nature et gérer le milieu. Il fait partie des trois céréales dont les grains sont utilisés pour la nourriture humaine ou animale; de la monocotylédone qui constituent la base alimentaire des populations du globe: blé, riz, maïs. L'origine du blé (*Triticum*), du maïs (*Zea*) et du riz (*Oryza*) semble être commune: étant donné les nombreux gènes communs deux à deux ou dans les trois genres, on pense que ces genres se sont diversifiés, il y a quelques 60 à 70 millions d'années (à la fin du secondaire) à partir d'une espèce ancestrale qui aurait contenu tous les gènes dispersés chez les trois espèces actuelles. Le terme de blé vient probablement du gaulois *blato* (à l'origine du vieux français *blaie*, *blee*, *blaier*, *blaver*, d'où le verbe emblaver, qui signifie ensemercer en blé) et désigne les grains qui, broyés, fournissent de la farine, pour des bouillies (polenta), des crêpes ou du pain (**Henry et al., 2000**).

Les premiers indices d'une agriculture apparaissent vers 9.000 ans avant Jésus-Christ dans le croissant fertile. On trouve dans les villages du début du Néolithique l'engrain (*Triticum monococcum*), l'amidonnier (*Triticum dicoccum*), l'orge, la lentille, le pois, la vesce, le pois chiche et le lin. Les formes sauvages identifiées de ces diverses espèces (amidonnier sauvage, pois chiche sauvage, vesce sauvage) seraient originaire du Proche-Orient et du Moyen-Orient.

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

Par la suite, les techniques de panification s'améliorent grâce aux Hébreux, Grecs, et enfin Romains qui en répandent l'usage à travers l'Europe. A la fin du XVIIIe siècle, le blé est exporté en Amérique du Nord par les Anglais et est rapidement adopté par les civilisations présentes comme matière première de base pour la fabrication du pain, en raison de sa composition en gluten supérieure aux autres céréales. A travers les siècles et les générations, le grain de blé a conservé toutes ses valeurs et reste un élément essentiel à notre alimentation. Aujourd'hui le blé fait partie de notre quotidien, présent dans de nombreuses compositions (**Hamel, 2010**).

## 3. Situation du blé

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une importante place parmi les céréales dans le monde. Le grain du blé dur sert à la production de pâtes alimentaires, du couscous, et à bien d'autres mets comme le pain, le frik, et divers gâteaux (**Troccoli et al., 2000**). Il est utilisé pour préparer les chapatis dans le sous continent indien et tortillas en Amérique Central et du Sud (**Pena et al., 2005**).

### 3.1 . Dans le monde

Le blé dur occupe 8 à 10% du total des terres réservées aux blés dans le monde. **FAO (2007)** estime que la superficie moyenne consacrée annuellement à la culture du blé dur est de 18 millions d'hectares, pour une production annuelle moyenne de 27.5 millions de tonnes. La culture du blé dur est concentrée au Moyen-Orient, en Afrique du Nord, en Russie, aux Dakotas, au Canada, en Inde et en Europe méditerranéenne. Avec une production de 8.08 millions de tonnes par an, moyenne de la période 1994-2007, l'Union européenne est le plus grand producteur de blé dur.

Le Canada arrive au deuxième rang avec 4,6 millions de tonnes par an, suivi de la Turquie et des États-Unis, avec 1.99 et 2.67 millions de tonnes respectivement. Ces quatre pays fournissent à eux seuls les deux tiers de la production mondiale.

### 3.2. En l'Algérie

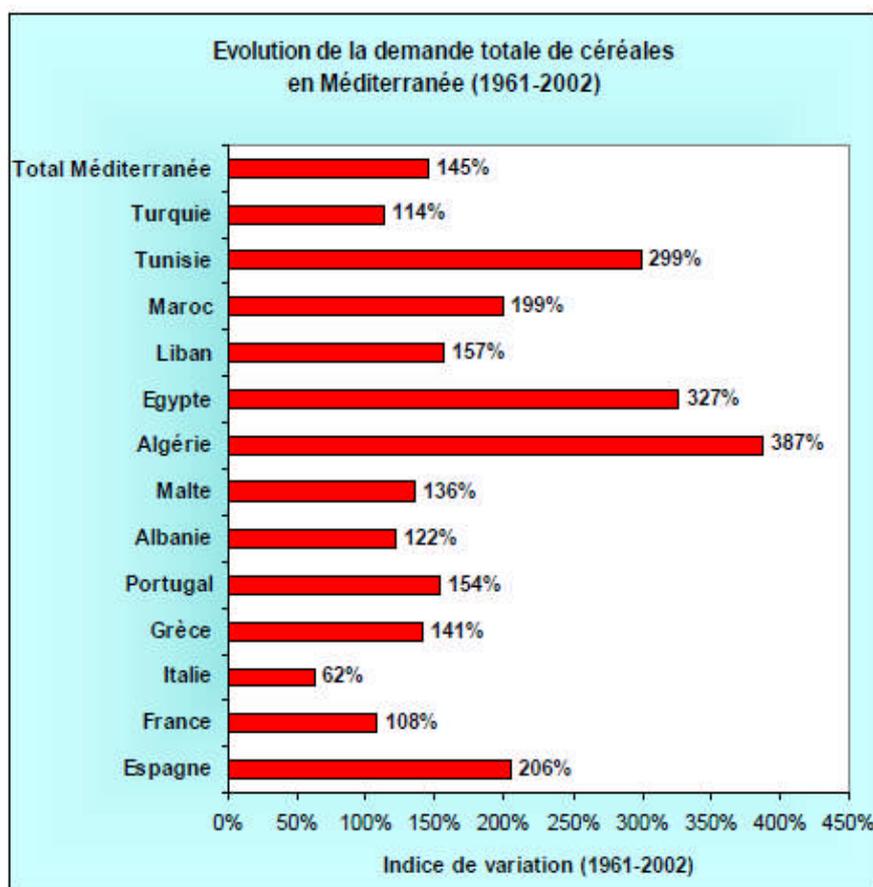
La superficie totale de l'Algérie est de 238 millions d'hectares dont 191 millions sont occupés par le Sahara. La superficie agricole représente 3% de ce total. La surface agricole utile est de 7,14 millions d'hectares, dont près de la moitié est laissée en jachère chaque campagne. Les cultures herbacées couvrent 3,8 millions d'hectares.

## Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

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 (M.A.D.R., 2007).

Actuellement, le pays se classe au 1<sup>ier</sup> rang mondial pour la consommation des céréales avec une moyenne dépassant largement les 180 kg/hab/an, comparativement à l'Egypte dont la moyenne est de 131 kg/hab/an et à la France dont la moyenne est de 98 kg/hab/an (FAO, 2007).

La croissance démographique, le changement de modèle de consommation et le soutien des prix des produits de base, ont fait que le volume des céréales consommées a augmenté de 427%, entre 1961 et 2003, passant de 1,2 millions de tonnes à 6,4 MT (FAO, 2005). Ceci place l'Algérie en première position avant l'Egypte et la Tunisie, pays qui connaissent une forte pression de la demande alimentaire, notamment en céréales (Fig.1).



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

## 4. Classification et description du blé

### 4.1. Classification

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille, qui sont caractérisée par des critères morphologiques particuliers. Le blé dur est une monocotylédone qui obéit à la classification suivante (Feillet P, 2000).

- Embranchement *Spermaphytes*
- Sous Embranchement *Angiospermes*
- Classe *Monocotylédones*
- Ordre *Poales*
- Famille *Poaceae*
- Sous-famille *Festucoideae*
- Tribu *Triticeae*
- Sou-Tribu *Triticineae*
- Genre *Triticum*
- Espèce *Triticum durum* Desf.

En termes de production commerciale et d'alimentation humaine, cette espèce est la deuxième plus importante du genre *Triticum* après le blé tendre. Leur famille comprend 600 genres et plus de 5000 espèces (Feillet P, 2000).

### 4.2. Description

Il s'agit d'une graminée annuelle de hauteur moyenne et dont le limbe des feuilles est aplati. L'inflorescence en épi terminal se compose de fleurs parfaites (Soltner, 1998).

Le système racinaire comprend des racines séminales produites par la plantule durant la levée, ainsi que des racines adventives qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la plante et constituent le système racinaire permanent. Le blé dur possède une tige cylindrique, dressée, habituellement creuse et subdivisée en entre nœuds. Certaines variétés possèdent toutefois des tiges pleines. Le chaume (talle) se forme à partir de bourgeons axillaires aux nœuds

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

à la base de la tige principale (**Bozzini, 1988**). Le nombre de brins dépend de la variété, des conditions de croissance et de la densité de plantation (**Clark et al., 2002**).

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

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

## 5. Structure génétique

(**Sakamura, 1918**) cité par (**Cauderon, 1979**), fut le premier à déterminer le nombre exact des chromosomes de diverses espèces de *Triticum* de niveaux ploïde différents :

*Triticum aestivum* : 42 chromosomes, **hexaploïdes**

*Triticum turgidum* : 28 chromosomes, **tétraploïdes** «  $2n = 4x = 28$  »

*Triticum monococcum* : 14 chromosomes, **diploïde** (**Cauderon, 1979**).

La première espèce tétraploïde, le *Triticum turgidum* résultat d'un croisement naturel entre le *T. monococcum* et une herbe nommée *Aegilops speltoides* (graminée) ; la première espèce fourni le génome A, et la seconde, le génome B.

La domestication de ce blé tétraploïde (AABB) a évolué vers *T. turgidum* ssp. *Dicoccum* puis vers *T. durum* (blé dur cultivé) (**Feillet, 2000**).

### 6. Cycle de croissance et de développement du blé

Le cycle de développement du blé comporte trois phases : La période végétative, la période reproductrice et la période de maturation (Fig.2) (Anonyme, 1981).

#### 6.1. La période végétative

La période végétative se caractérise par un développement strictement herbacée et s'étend de semis jusqu'à la fin tallage (Bada., 2007).

##### 6.1.1. La phase germination – levée

Cette phase peut être accomplie dès que la semence soit capable de germer et que le sol peut lui fournir l'humidité, la chaleur et l'oxygène nécessaire. La teneur minimale en eau qui permet la germination est de l'ordre de 35 à 40%.

Lorsque la graine a absorbé de 20 à 25% de son poids d'eau. La température optimale de la germination se situe entre 5 à 22°C, avec un minimum de 0°C et un maximum de 35° C.

Durant la phase semis-levée, l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système racinaire primaire et de réserve de la graine (Eliard, 1979).

##### 6.1.2. La phase levée – tallage

Selon Soltner (1988) c'est un mode de développement propre aux graminées, caractérisé par la formation du plateau du tallage, l'émission de talles et la sortie de nouvelles racines.

La durée de cette période varie de 31 à 89 jours pour des températures moyennes de 09 à 32° C respectivement (Mekliche, 1983).

##### 6.1.3. La Phase Tallage - Montaison

Elle est caractérisée par la formation de talles et l'initiation florale qui se traduit par l'apparition de la future ébauche de l'épi; tout déficit hydrique durant cette période se traduit par une diminution du nombre de grains par épi (Martin- Prevel, 1984).

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

## 6.2. La période reproductrice

### 6.2.1. La phase montaison – gonflement

La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement des entrenœuds et la différenciation des pièces florales.

A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus (**Clement-Grancourt et al., 1971**).

### 6.2.2. La phase épiaison – floraison

Cette période commence dès que l'épi apparaît hors de sa graine foliaire et se termine quand l'épi est complètement libéré (**Maume, 1936**). La durée de cette phase est de 7 à 10 jours, elle dépend des variétés et des conditions du milieu. C'est la phase où la culture atteint son maximum de croissance (**Martin- Prevel, 1984**).

### 6.2.3. La Phase Floraison - Fécondation

Elle est déterminée par la sortie des étamines hors des épillets, la fécondation est accomplie lorsque les anthères sortent des glumelles. Le nombre de fleurs fécondées dépend de la nutrition azotée et d'une évapotranspiration pas trop élevée (**Soltner, 1988**).

## 6.3. La période de formation et de maturation du grain

### 6.3.1. Grossissement du grain

Cette phase est caractérisée par le grossissement du grain, l'accumulation de l'amidon et les pertes de l'humidité des graines qui marque la fin de la maturation (**Soltner, 1988**).

Cette phase de maturation dure en moyenne 45 jours. Les graines vont progressivement se remplir et passer par différentes stades :

#### A. Maturité Laitieuse

Ce stade est caractérisé par la migration des substances de réserves vers le grain et la formation des enveloppes. Le grain est de couleur vert clair, d'un contenu laiteux et atteint sa dimension définitive (**Soltner, 1988**).

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

## B. Maturité Pâteuse

Durant cette phase les réserves migrent depuis les parties vers jusqu'aux grains. La teneur en amidon augmente et le taux d'humidité diminue. Quand le blé set mûr le végétal est sec et les graines des épis sont chargées de réserves (Soltner, 1988).

## C. Maturité Complète

Après le stade pâteux, le grain mûrit, se déshydrate. Il prend une couleur jaune, durcit et devient brillant. Ce stade est sensible aux conditions climatiques et à la condition de récolte (Soltner, 1988).

## Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

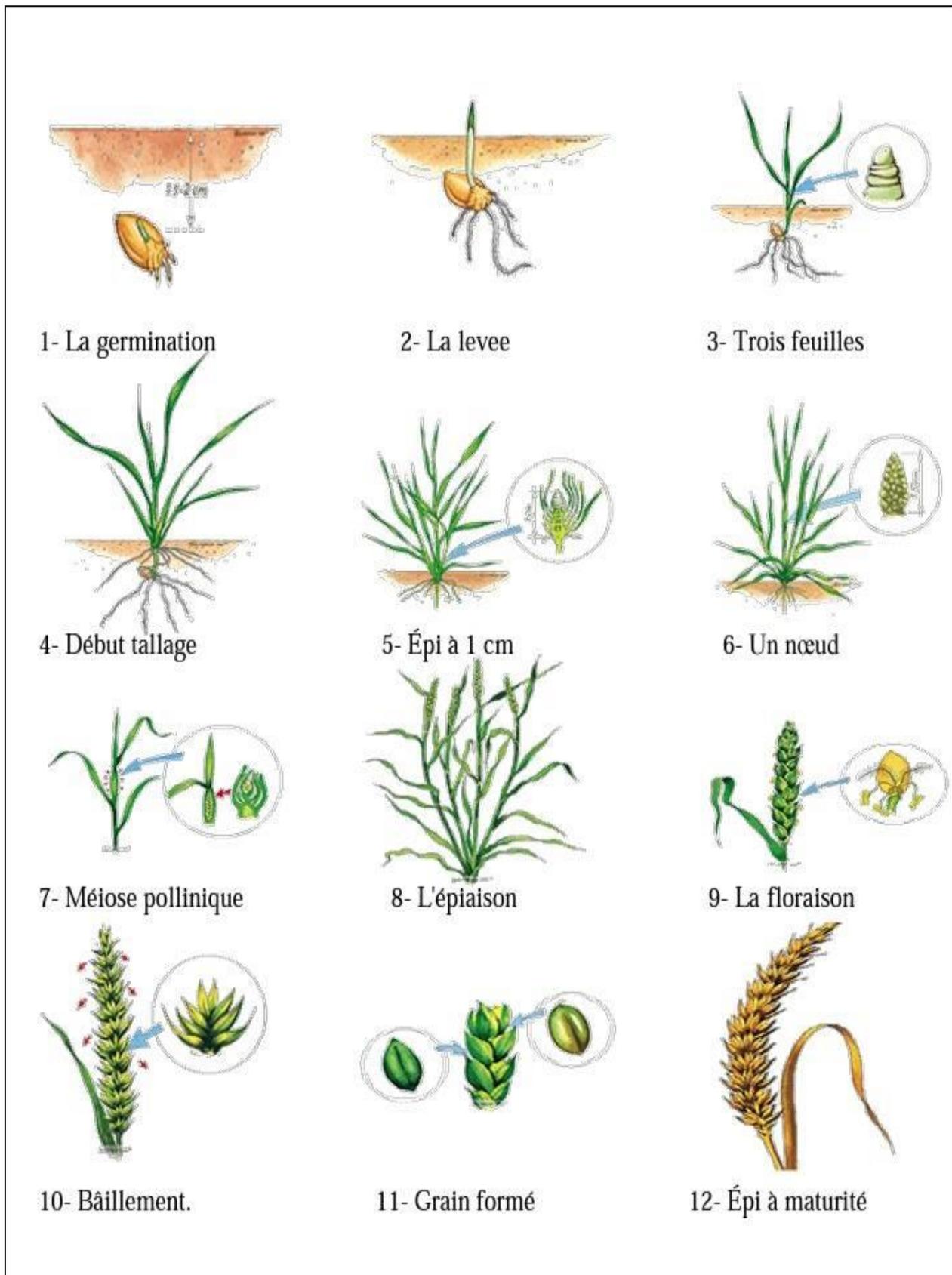


Figure 2 : Cycle de développement du blé (www.UNCTAD.org)

## 7. Les exigences du blé

### 7.1. Exigences climatiques

L'influence du climat est un facteur déterminant à certaines périodes de la vie du blé.

#### 7.1.1. Température

La température est l'un des facteurs importants pour la croissance et l'activité végétative. La germination commence dès que la température dépasse 0°C, avec une température optimale de croissance située entre 15 à 22° C. Les exigences globales en température sont assez importantes et varient entre 1800 et 2400 °C selon les variétés. De même la température agit sur la vitesse de croissance, elle ne modifie pas les potentialités génétiques de croissance ; c'est la somme de température qui agit dans l'expression de ces potentialités. Chaque stade de développement du blé nécessite des températures particulières (**Soltner, 1988**).

#### 7.1.2. Eau

L'eau est un facteur limitant de la croissance du blé. Ce dernier exige l'humidité permanente durant tout le cycle de développement. Les besoins en eau sont estimés à environ 800 mm (**Soltner, 1988**). En zone aride, les besoins sont plus élevés au vu des conditions climatiques défavorables. Ces de la phase épi 1 cm à la floraison que les besoins en eau sont les plus importants. La période critique en eau se situe 20 jours avant l'épiaison jusqu'à 30 à 35 jours après la floraison (**Loue, 1982**).

#### 7.1.3. Lumière

La lumière est le facteur qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le comportement du blé. Un bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement. Elle a aussi une influence sur les hormones de croissance. L'abondance de lumière favorise la ramification de floraison et la fructification (**Soltner, 1988**).

### 7.2. Exigences édaphiques

Le blé exige un sol bien préparé, meulé et stable, résistant à la dégradation par les pluies d'hiver pour éviter l'asphyxie de la culture et permettre une bonne nitrification au printemps. Sur une profondeur de 12 à 15cm pour les terres battantes (limoneuses en générale) ou 20 à 25 cm

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

Pour les autres terres et une richesse suffisante en colloïdes, afin d'assurer la bonne nutrition nécessaire aux bons rendements (Soltner, 1990). Particulièrement un sol de texture argilo-calcaire, argilo-limoneux, argilo-sableux ne présentant pas de risques d'excès d'eau pendant l'hiver. Les séquences de travail du sol à adopter doivent être fonction du précédent cultural, de la texture du sol, et de la pente. Le pH optimal se situe dans une gamme comprise entre 6 à 8.

## 8. Le grain de blé

Lors de la moisson, le battage détache les grains des épis, et beaucoup des grains sont aussi débarrassés des enveloppes florales.

Le grain de blé est un fruit sec dont les dimensions moyennes sont, de 6 à 8mm de longueur et de 3mm environ de largeur et d'épaisseur, est un ellipsoïde plus ou moins bombé, présentant un sillon longitudinal profond de 1,5 à 2mm, l'une des extrémités porte des poils, et sur l'autre se trouve un germe minuscule. (Feuillet, 2000).

La coupe du grain fait apparaître trois parties :

### a. Les enveloppes :

Qui représentent 14 à 15% du poids du grain, comprennent :

- Le péricarpe : enveloppe du fruit
- Le tégument de la graine ou « testa » et le tégument du nucelle ou « bande hyaline ».
- L'assise protéique (60% du poids des enveloppes), constituée de cellules à aleurone, riches en protéines. (Feuillet, 2000).

### b. Le germe :

Qui représente 2,5% du grain, comprend :

- Le cotylédon ou scutellum riche en lipides et protéines.
- La plantule plus ou moins différenciée :
- La radicule ou racine embryonnaire protégée par le coléorhize. La gemmule comportant un nombre variable de feuilles visibles, enfermées dans un étui protecteur : la coléoptile (Feuillet, 2000).

## Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

### C . L'albumen ou amande

Qui représente 83 à 85% du poids du grain, est composé 70% d'amidon et de 7% de gluten environ. Chez le blé dur l'albumen est corné vitreux.

### 8.1. Composition biochimique du grain

Les grains des céréales sont des organes végétaux particulièrement déshydratés. Les grains de blé renferment d'importants éléments qui déterminent sa valeur alimentaire (**Boyeldieu, 1980**)

**Tableau 1 :** Composition chimiques des grains de blé

Constituants, en p.100 de la matière sèche du blé	Teneurs
<b>Protéines (N*6,25)</b>	<b>14,3</b>
<b>Lipides p.100</b>	<b>2,2</b>
<b>Cendres p.100</b>	<b>2,0</b>
<b>Matières cellulosiques p.100</b>	<b>3,0</b>
<b>Glucides (extractifs non azotés) p.100</b>	<b>8,5</b>
<b>Thiamine mg/kg</b>	<b>5,5</b>
<b>Niacine mg/kg</b>	<b>63,6</b>
<b>Riboflavine mg/kg</b>	<b>1,3</b>
<b>Acide pantothénique mg/kg</b>	<b>13,6</b>

### 8.2 Physiologie de la germination

La germination c'est une activation métabolique de l'embryon décelable par les échanges respiratoires de la graine. C'est un processus préparatoire à l'élongation de la radicule, puis de la coléoptile. Les constituants insolubles de l'albumen (amidon et protéines) disparaissent progressivement pendant que les substances solubles augmentent. Cette solubilisation des réserves s'effectue sous l'action d'enzymes dont les principales sont l'alpha amylases et la protéase. La libération de ces enzymes sous l'action de l'acide gibbérellique

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

La durée de vie des semences est très variable selon les espèces, mais les plantes cultivées, et parmi elles les céréales, appartiennent au groupe des semences mésobiotiques, ou à longévité moyenne, c'est-à-dire comprise entre trois et quinze ans.

Récoltées et conservées dans de bonnes conditions, des graines de céréales gardent leur pouvoir germinatif de départ pendant au moins trois ou quatre ans. Au-delà de six ou huit ans, le pourcentage de germination commence à baisser, de façon variable selon les cultivars et les Conditions de maturation. On a pu conserver un pouvoir germinatif durant une trentaine d'années sur certains blés séchés jusqu'à 4 ou 5 p.100 d'humidité (**Boyeldieu, 1980**).

## 9. Les maladies du blé

### 9.1. Les fusarioses

Elles sont dues à *Fusarium nivale* et *Fusarium roseum*. *Fusarium nivale* peut contaminer les épis à partir des débris végétaux contaminés. *Fusarium roseum* fait apparaître un noircissement à la base des tiges et un dessèchement précoce de l'épi (**Dupont, 1982**). Cette maladie présente une incidence directe sur les rendements provoquant une diminution du nombre de grains par épi, accompagnée du risque de présence de mycotoxine dans le grain (**Le Boulcl et Franque, 1999**).

### 9.2. Le charbon du blé

Il est provoqué par *Ustilago tritici* ou *Ustilago hordei* (**Oufroukh et Hamadi, 1993**). Ce sont des parasites foliaires ou d'inflorescence, ils ne se manifestent que peu avant le moment où l'épi sort de la graine. La dernière feuille avant l'épi jaunit et les épillets apparaissent entièrement détruits (**Clement et Prat, 1970**).

### 9.3. La carie du blé

Elle est due à *Tilletia carie*. Elle entraîne des diminutions sensibles de rendement et de Qualité et compte parmi les maladies les plus importantes du blé dans le bassin méditerranéen. Elle apparaît à l'épiaison. Le blé couvert de spores dorme de mauvaise qualité et inconsommable (**Oufroukh et al., 1993**).

# Chapitre 1 : Généralités sur le blé dur

## 9.4. Les rouilles

La rouille brune due à *Puccinia triticina*, se déclare entre l'épiaison et la fin de la floraison. Elle se présente sous forme de macules brunes arrondies sur les feuilles.

La rouille noire due à *P.graminis*, est observée après la moisson sur les pailles, sous forme de pustules très allongées contenant des spores (**Dupont, 1982**).

## 9.5. Mosaïque du blé

Les deux agents de la mosaïque sont nommés l'un VMB (Virus De La Mosaïque Du Blé) et l'autre VMJB (Virus De La Mosaïque Jaune Du Blé), tous deux sont transmis par le champignon du sol *Polymyxa graminus*. Parfois ces deux virus sont présents simultanément dans la même parcelle (**Hariri, 1999**). Un autre virus qui est le JNO (Virus De La Jaunisse Nanisante De L'orge) ainsi que celle du blé. Ce virus est transmis par le puceron *Rhopalosiphum padi puce* (**Decoin, 1999**).

### 1. Notion de stress

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

**Tsimilli-Michael et al. (1998)** considèrent que le stress a une signification relative, avec un contrôle comme état de référence, ils considèrent le stress comme une déviation du contrôle à une contrainte. Selon **Jones et al. (1989)** un stress désigne à la fois l'action d'un agent agresseur et les réactions qu'il entraîne dans l'organisme agressé, une force qui tend à inhiber les systèmes normaux.

D'autre part, les stress environnementaux nés de la fluctuation des facteurs abiotiques (sécheresse, salinité, température) affectent les conditions de croissance, le développement et le rendement des plantes (**Madhava et al., 2006**).

### 2. Notion de stress hydrique

Le stress hydrique est l'un des stress environnementaux les plus importants, affectant la productivité agricole autour du monde (**Boyer, 1982**). Il occupe et continuera d'occuper une très grande place dans les chroniques agro-économiques. C'est un problème sérieux dans beaucoup d'environnements arides et semi-arides, où les précipitations changent d'année en année et où les plantes sont soumises à des périodes plus ou moins longues de déficit hydrique (**Boyer, 1982**).

Il existe de nombreuses définitions du stress hydrique. En agriculture, il est défini comme un déficit marqué et ce compte tenu des précipitations qui réduisent significativement les productions agricoles par rapport à la normale pour une région de grande étendue (**Bootsma et al., 1996**). En effet, on assiste à un stress hydrique lorsque la demande en eau dépasse la quantité disponible pendant une certaine période ou lorsque sa mauvaise qualité en limite l'usage (**Madhava et al., 2006**).

Le stress hydrique entraîne une dégradation des ressources d'eau douce en termes de quantité (surexploitation des eaux souterraines, rivières asséchées, etc.) et de qualité (eutrophisation, pollution par la matière organique, intrusion saline, etc.) (**Mouhouche et Boulassel, 1997**). Le stress hydrique peut se définir comme le rapport entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la plante et la quantité d'eau disponible dans son environnement, sachant que la réserve d'eau utile pour la plante est la quantité d'eau du sol accessible par son système racinaire (**Laberche, 2004**).

La demande en eau de la plante est quant à elle déterminée par le niveau de transpiration ou évapotranspiration, ce qui inclut les pertes d'eau tant au niveau des feuilles qu'au niveau du sol (**Laberche, 2004**). Le stress hydrique est toute restriction hydrique qui se traduit par une baisse de potentiel de la plante suite à une perturbation de son activité physiologique provoquée par un déficit de consommation en eau et communément appelé stress hydrique (**Mouhouche et Boulassel, 1997**).

### 3. Influence du stress hydrique sur le rendement du blé dur

Le rendement en grains est la résultante de diverses composantes qui sont déterminées à différentes périodes du cycle de la plante (**Day et al., 1978**). Chez les céréales, le rendement en grains dépend du génotype, de l'environnement et de la disponibilité en éléments minéraux du sol (**Nemmar, 1983**).

Le déficit hydrique, de nature intermittente, est une des principales causes des pertes de rendement du blé dur, pouvant aller jusqu'au sinistre total. Il affecte toutes les composantes du rendement et en particulier le nombre de grains par épi et le poids moyen du grain (**Chennafi et al., 2006**).

Selon **Debaeke et al. (1996)** le déficit hydrique précoce au cours de la montaison réduit le nombre d'épis et le nombre de grains par épi. Le poids moyen du grain, quant à lui, est affecté par le déficit hydrique de la post-floraison, qui accélère la sénescence foliaire et réduit la durée de remplissage (**Benbelkacem et al., 2001**).

**Abbassenne et al. (1998)** mentionnent que sous conditions pluviales des hautes plaines orientales, la durée de remplissage et par conséquent le poids du grain atteignent rarement leurs maximales, induisant une baisse du rendement.

### 4. Stratégies et mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique

Pour contrer le manque d'eau, les plantes développent plusieurs stratégies adaptatives qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu. La résistance de la plante à la contrainte hydrique peut être définie, physiologiquement, par la capacité de survivre et de croître et, du point de vue agronomique, par la capacité de réaliser un rendement élevé.

Selon **Passioura (1994)**, la résistance globale d'une plante vis-à-vis du déficit hydrique est la résultante de nombreuses modifications phénologiques, anatomiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques. Ces dernières interagissent pour permettre le maintien de la croissance, du développement et de la production (**Passioura, 1994**).

### 4.1. Adaptations morphologiques

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

#### 4.1.1. Au niveau de la plante

La diminution de la surface foliaire des feuilles et du nombre de talles est considérée comme une réponse ou adaptation au manque d'eau (**Blum, 1996**). Chez le blé, l'enroulement des feuilles chez certaines variétés peut être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation, il entraîne une diminution de 40 à 60 % de la transpiration (**Amokrane et al., 2002**).

La longueur des barbes est un paramètre morphologique qui semble également étroitement lié à la tolérance au stress hydrique (**Hadjichristodoulou, 1985**). La hauteur de la plante apparaît comme un critère de sélection important particulièrement dans les zones arides, ceci s'expliquerait par le fait qu'une paille haute s'accompagne souvent d'un système racinaire profond ce qui conférerait à la plante une capacité d'extraction de l'eau supérieure (**Bagga et al., 1970**). Les plantes à enracinement superficielle et peu dense souffrent plus du déficit hydrique que ceux à enracinement profond (**El hassani et Persoons, 1994**).

#### 4.1.2. Au niveau structurel

Une des principales modifications structurelles observées sur des plantes ayant subi un stress hydrique, concerne l'altération des propriétés physico-chimiques des parois cellulaires (**Dixon et Paiva, 1995**). Ces changements peuvent être induits par des modifications au niveau des enzymes impliquées dans la biosynthèse des monolignols ou dans leur assemblage dans la

paroi. L'augmentation de l'expression de ces gènes peut être reliée à l'arrêt de la croissance et à l'épaississement de la paroi (**Dixon et Paiva, 1995**).

Un autre composant majeur de la paroi correspond aux composés issus de la polymérisation des sucres (cellulose et hémicellulose). **Xu et al.(1996)** ont mis en évidence des modifications au niveau de l'hémicellulose via, notamment, la modulation de l'expression d'une famille multi génique appelée XET (xyloglucaneendo-trans-glucanase). Les XET effectuent des coupures internes dans les polymères de xyloglucanes, pour ensuite lier les fragments générés à d'autres chaînes de xyloglucanes (**Xu et al., 1996**).

**Braam et al. (1997)** ont proposé l'idée qu'à l'instar des gènes impliqués dans la lignification, les XET pourraient intervenir dans l'altération des propriétés (exemple: extensibilité) de la paroi lors des stress abiotiques et notamment hydriques.

### 4.1. Adaptations physiologiques :

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

La diminution de la transpiration engendre la réduction de la photosynthèse, et donc du rendement. Cependant, il apparaît que les génotypes qui ont la capacité photosynthétique intrinsèque la moins affectée par le déficit hydrique présentent une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (**Condon et al., 2004**).

#### 4.2.1. Régulation stomatique

Régulation stomatique à un déficit hydrique, la fermeture des stomates représente le premier phénomène majeur conduisant à des pertes d'eau (**Nemmar, 1983**). Il est le premier mécanisme détectable avant toute modification des autres paramètres hydriques tels que le

## Chapitre 2 : Stress hydrique

potentiel hydrique foliaire, le potentiel osmotique et la teneur relative en eau (**Djekkoun et Ikhlef, 1996**).

D'après **Larbi (1992)** la réduction de la transpiration liée à la diminution du potentiel hydrique foliaire est attribuée initialement à la fermeture des stomates. En cas de stress hydrique, la transpiration épidermique joue un rôle important. Elle est définie selon **Belhassen et al. (1995)** comme la somme des transpirations s'effectuant par la cuticule et par les stomates incomplètement fermés. Ce type de transpiration semble plus efficace que celui effectué par les grands stomates en moins grand nombre (**Percevaux, 1963**).

La régulation de l'état hydrique des parties aériennes de la plante par la fermeture des stomates est notamment déclenchée par un signal chimique racinaire, la molécule signal est une phytohormone, l'acide Abscissique (ABA), synthétisé par les racines soumises à un stress hydrique et qui est véhiculé jusqu'aux feuilles par la sève brute (**Djekkoun et Ykhlef, 1996**). Cette régulation diffère d'ailleurs selon les espèces, leur capacité à maintenir un état hydrique presque constant étant variable. Par exemple, elle est bonne chez le maïs et le pois et moins chez le tournesol. Si la fermeture des stomates permet à la plante de réduire la sortie d'eau, elle limite aussi l'entrée de CO<sub>2</sub> et donc la photosynthèse et la production de biomasse (**Djekkoun et Ykhlef, 1996**).

Parmi les nombreux caractères d'adaptation, il y a l'efficacité de l'eau qui est définie comme étant le rapport de la quantité de matières sèches produites par unité de volume d'eau évapo - transpirée. Elle équivaut au rapport entre le CO<sub>2</sub> assimilé et l'eau transpiré (**Hafsi, 2001**).

La teneur relative en eau ou turgescence cellulaire figure parmi les nombreux critères d'évaluation de la tolérance au stress hydrique. C'est une caractéristique liée en premier au génotype. Elle permet à la plante de maintenir un statut hydrique foliaire capable de garantir la continuité de l'activité métabolique dont entre autres la photosynthèse. Cette teneur dépend de 3 facteurs à savoir : La capacité d'extraction de l'eau du sol, le contrôle des pertes de l'eau par les surfaces foliaires et les possibilités d'ajustements osmotiques (**Araus et al., 2002**).

**Rascio (1985)** mentionne que les génotypes qui maintiennent une teneur relative en eau élevée sont les plus résistantes à la sécheresse.

### 4.2.2. Ajustement osmotique

Le stress hydrique provoque la mise en place d'un état de régulation hydrique de la plante qui se manifeste par la fermeture stomatique et par une régulation du potentiel osmotique (**Brisson et Delecolle, 1992**). L'ajustement osmotique est généralement considéré comme un élément important dans la tolérance des plantes au stress hydrique (**Bajji et al., 2001**). Cet ajustement implique l'accumulation, au niveau cellulaire, des sucres, d'acides aminés (exemple : la proline), d'ions ou d'autres solutés compatibles (c'est-à-dire non toxiques) (**Nouri et al., 2002**).

L'accumulation d'osmolites permet de créer un influx d'eau dans la cellule ou tout du moins d'éviter un flux, en augmentant la force de rétention des molécules d'eau (**Crowe et al., 1992**). Le maintien de cette quantité d'eau permet ainsi de conserver la turgescence nécessaire à la croissance des cellules. Il semblerait que cette accumulation d'osmolites soit reliée au maintien de l'intégrité des protéines et des membranes (**Crowe et al., 1992**).

### 4.3. Adaptations phénologiques

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

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

### 4.4. Adaptations biochimiques

#### 4.4.1. Accumulation de la proline

L'accumulation de la proline constitue aussi un véritable mécanisme de tolérance au stress hydrique (**Slama et al., 2004**). L'existence chez les céréales d'une variation intra-spécifique pour l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique suggère la possibilité d'une sélection,

## Chapitre 2 : Stress hydrique

sur la base de ce caractère, des géotypes qui auront une bonne capacité à survivre et un rendement en grains stable en conditions hydriques limitantes (**Bergareche et al., 1993**). Pour cette raison, **Bellinger et al. (1991)** ont proposé l'accumulation de la proline comme technique de sélection.

L'origine de la proline accumulée sous stress n'est pas totalement éclaircie. Elle est soit synthétisée de nouveau à partir de l'acide glutamique (Glu) ou via l'ornithine (Orn), qui sont utilisés comme précurseurs (**Samaras et al., 1995**). Les hydrates de carbone peuvent être des facteurs essentiels dans l'accumulation de la proline, car la synthèse des protéines est liée automatiquement au métabolisme des glucides et à la respiration (dans le cycle de Krebs) par l'intermédiaire d' $\alpha$  céto-glutarate qui forme le statut carbonique pour la synthèse de la proline (**Chaib, 1998**).

### 4.4.2. Rôles des sucres

Le potentiel osmotique peut être maintenu pour un stress hydrique de faible ou moyenne intensité, par ajustement osmotique. Les sucres peuvent servir de composés solubles compatibles pour cet ajustement osmotique, comme de nombreuses autres molécules (proline, glycine-bétaïne ou pinitol). D'après **Bensari et al.; (1990)** lorsque la contrainte hydrique cesse, la feuille reconstitue les réserves d'amidon et si une nouvelle contrainte hydrique intervient, le temps d'adaptation est plus court.

En effet, **Hare et Cress.; (1997)** remarquent que les sucres (glucose, fructose et le saccharose) représentent des osmotocum beaucoup moins puissants que la proline, ils participent eux aussi au maintien de la balance de la force osmotique. Par ailleurs, il a été observé que sous stress hydrique, les réserves amylicées sont progressivement utilisées suite à leur conversion rapide en saccharose qui pourra être associé à une inhibition de la synthèse de l'amidon (**Geigenberger et al., 1997**). Ainsi, les enzymes liés au métabolisme des sucres semblent avoir une importance majeure dans la tolérance au stress hydrique (**Geigenberger et al., 1997**).

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

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

### 4.4.3. Synthèse des protéines liées à la tolérance au stress hydrique

Les protéines de stress jouent un rôle dans l'adaptation de la plante et de ce fait de nombreux chercheurs abordent la résistance au stress par l'isolement et l'étude de ces molécules (**Campalans et al., 1999**).

**Schulze et al.(2005)** ont écrit qu'une partie des protéines induites ont une fonction directe dans l'augmentation de la tolérance au stress (protéines fonctionnelles), d'autres ont une fonction dans la chaîne de transduction (protéines régulatrices) qui aboutiront à la production de protéines fonctionnelles. La plupart des protéines à fonction directe sont des aquaporines et des enzymes catalysant la biosynthèse d'osmolites (carbohydrates et acides aminés).

#### A. Dehydrines (Protéines LEA)

Les Dehydrines, appelés aussi Rab protéines (Responsive to Abscissicacid), ils constituent une famille multi génique dont la majeure partie des protéines est cytosolique et hydrophile. Les dehydrines, LEA forment un groupe remarquable de protéines induites par le stress hydrique et qu'on trouve chez toutes les plantes. Elles n'ont pas de fonctions enzymatiques, mais elles sont très efficaces dans la protection de membrane cellulaire et des protéines par des structures quaternaires (**Campalans et al., 1999**).

**Ramanjulu et Bartels(2002)** ont proposé que ces protéines peuvent jouer un rôle en protégeant les structures cytoplasmiques pendant la déshydratation, découvertes en 1981, ces protéines protectrices apparaissent toujours pendant la dessiccation de l'embryon et de l'endosperme lors de la maturation des graines. Elles sont très abondantes dans les embryons des graines tolérantes à la dessiccation et accumulées dans les périodes de stress hydrique (**Campalans et al., 1999**).

Beaucoup d'entre elles sont synthétisées et accumulées pendant les périodes du stress hydrique et après stress osmotique dans tous les organes de la plante, elles ne contiennent ni de Cys (Cystéine) ni de Trp (Trepicine) et de ce fait elles résistent à la dénaturation thermique et à la dénaturation acide. Elles ont un poids moléculaire moyen qui varie entre 15 et 200 KDa (**Ramanjulu et Bartels, 2002**).

## Chapitre 2 : Stress hydrique

Un autre mode d'action a été proposé pour les LEA. En effet, lorsque les plantes subissent un stress violent, les composés cellulaires ont tendance à se cristalliser, provoquant de nombreux dommages au sein de la cellule. Ce phénomène peut être contrecarré par les LEA, qui peuvent agir comme des solutés compatibles pour augmenter la viscosité du milieu intracellulaire et ainsi éviter sa cristallisation (**Ramanjulu et Bartels, 2002**).

### B. Les aquaporines

Les plantes équilibrent leur état hydrique en ajustant la conductibilité de l'eau de leurs tissus, les tissus vasculaires et les cellules de garde jouent un rôle important dans ce processus (**Maurel et Chrispeels, 2001**). Les aquaporines sont un composant significatif dans le transport cellulaire de l'eau. Elles peuvent réguler la conductivité hydraulique et augmenter de 10 à 20 fois la perméabilité à l'eau des membranes (**Maurel et Chrispeels, 2001**).

L'expression et l'activité des aquaporines sont modulées par la déshydratation. **Smart et al. (2001)** ont montré que la répression de gènes d'aquaporines diminue la perméabilité à l'eau des membranes et peut conduire à la conservation cellulaire de l'eau pendant des périodes de contrainte hydrique. En revanche, il y a des exemples de gènes d'aquaporines, qui sont exprimés pendant le stress hydrique ayant pour résultat une plus grande perméabilité et une augmentation du flux de l'eau (**Yamada et al., 1997**).

### 4.5. Gènes variés au cours du stress hydrique

La tolérance au stress hydrique étant un phénomène complexe faisant intervenir de nombreux Gènes. L'analyse moléculaire de la réponse à la déshydratation est donc arrivée à un stade où de nombreuses séquences de gènes variant au cours du stress sont disponibles (**Dubos, 2001**). Il est maintenant indispensable de combiner les approches physiologiques, génétiques, biochimiques ainsi que les techniques de biologie moléculaire afin d'avoir une approche intégrée des phénomènes qui régissent la réponse au stress et de pouvoir identifier les gènes les plus fortement impliqués dans la tolérance (**Dubos, 2001**). Les changements qui se produisent au niveau du métabolisme primaire de la plante font partie de la réponse générale au stress. En effet, de nombreux gènes qui varient au cours du stress hydrique varient de la même manière pour d'autres stress environnementaux (**Deepika et Anil, 1999**).

## Chapitre 2 : Stress hydrique

Parmi les gènes qui varient au cours du stress, des gènes impliqués dans la photosynthèse. Ces gènes sont par exemple impliqués dans l'assimilation du CO<sub>2</sub> ou dans la perception des photons (**Blomstedt et al., 1998**).

Chez les Crassulacées, l'induction des gènes codants pour la phosphoénol-pyruvate carboxylase montre l'importance du métabolisme CAM (Crassulacées Acide Métabolisme) dans la limitation des pertes en eau liées à l'assimilation du CO<sub>2</sub>. Ce type de métabolisme correspond à une réponse majeure de nombreuses plantes pour survivre dans des conditions de milieu très sec (**Cushman et Bohnert, 2000**).

### 5. Systèmes antioxydants

Pour se protéger des effets délétères des ROS, les organismes végétaux ont développé certains moyens de défense contre les atteintes des radicaux libres ; trois activités enzymatiques clés occupent une place centrale dans les mécanismes de détoxification des ROS : il s'agit des superoxydes dismutases (SOD), des catalases (CAT) et des peroxydases (POD). Ces enzymes ont une action complémentaire sur la cascade radicalaire au niveau de l'anion superoxyde O<sub>2</sub><sup>-</sup> et du peroxyde d'hydrogène, conduisant finalement à la formation d'eau et d'oxygène moléculaire.

Le niveau intracellulaire en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> est régulé par un ensemble d'enzymes antioxydants, dont la catalase (**Willekens et al., 1995**), par la décomposition du H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en eau et oxygène.

Plusieurs travaux postérieurs ont démontré les fonctions, les localisations cellulaires et les profils d'expression de la catalase de certaines plantes (**Guan et Scandalios ; 2000a, 2000b ; 2002**).

Chez les céréales, le comportement de la catalase a été étudié en présence de conditions de stress. Ainsi **Kim et al. (2004)** et **Khosravinejad et al. (2008)** ont montré que l'activité de la catalase augmentait dans les racines de l'orge pendant un stress salin, et cela par rapport aux autres enzymes antioxydants étudiées en même temps (APX et SOD, POX). Ce résultat indique que la catalase est une enzyme majeure dans la détoxification des hydrogènes de peroxydes.

### 6. Stratégies de l'amélioration génétique pour la tolérance à la sécheresse

La sécheresse cause chaque année des pertes importantes de rendements chez les céréales (ou l'on peut noter jusqu'à 50% du rendement normal). Aussi, pour palier à cet inconvénient majeur récurrent, une stratégie globale est proposée par **Monneveux et Depigny-This (1995)**. Elle consiste à associer des études conduites à différents niveaux d'intégration (Génome, plante, peuplement) en se basant sur l'amélioration directe du rendement en conditions défavorables et la sélection indirecte sur des critères morphologiques, physiologiques, génétiques et moléculaires.

#### 6.1. Sélection directe du rendement et de sa stabilité

Il s'agit d'une approche empirique utilisée jusqu'ici par les sélectionneurs. Elle consiste à tester au moyen d'essais multi-locaux et sur plusieurs années les matériels génétiques et d'en identifier ceux qui y sont adaptés. Le rendement en grains qui en résulte est la meilleure approche pour étudier la réponse des cultivars à la variation environnementale (**Pfeiffer et al, 2002**).

La stabilité du rendement résultant de telles expérimentations est l'expression de la variation entre le potentiel génétique et celui permis par le milieu pour une variété donnée. Les faibles rendements sont synonymes d'une mauvaise adaptation ou tolérance du milieu aux divers stress. En revanche, des rendements stables et élevés rendent plutôt compte soit d'une certaine hétérogénéité génotypique de la tolérance au stress hydrique soit d'une grande capacité de compensation des composantes de rendements voire même la combinaison de ces deux caractéristiques (**Bansal et Sinha, 1991**).

Toutes ces études ont un dénominateur commun à savoir l'étude du rendement et sa stabilité corrélée à l'interaction des génotypes\*milieu.

Dés **1974**, **Reitz** regroupe les variétés en 3 catégories :

- ❖ Les variétés maintenant des rendements élevés dans une large gamme d'environnement ou « adaptation large ».
- ❖ Des variétés assurant des rendements élevés dans des environnements à fortes contraintes ou variétés rustiques.

## Chapitre 2 : Stress hydrique

- ❖ Des variétés ne donnant de bons rendements qu'en condition favorables, variétés à haute productivité.

Depuis, des modèles mathématiques ont vu le jour. Dans leur ensemble, ces modèles sont purement descriptifs du comportement. Ils ne cherchent ni à expliquer le rôle des facteurs du milieu ni le fonctionnement biologique de la plante. La plupart de ces modèles sont linéaires.

Cependant, l'expérience acquise dans la sélection génétique montre que la prise en compte du seul critère du rendement et de sa stabilité demeure quelque peu insuffisante. L'utilisation d'autres critères pour la sélection simultanée pour l'adaptation et l'amélioration du rendement s'avère nécessaire. **Daddy et al (1973)** suggèrent la prise en compte de paramètres morpho-physiologiques.

### 6.2. Sélection indirecte du rendement dite analytique explicative

Cette sélection se base dans un premier temps sur l'étude des mécanismes d'adaptation des paramètres morpho-physiologiques et qui, plus concrètement consiste à isoler le mécanisme à l'étude de façon individuelle et en comprendre et en expliquer les phénomènes biochimiques et physiologiques qui sous-tendent la tolérance ou la résistance.

### 1. Matériel végétal

L'étude a porté sur six variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Les génotypes utilisés sont répertoriés selon le catalogue officiel de l'ITGC (El Khroub) (Tab.01).

**Tableau 1 :** Les variétés étudiées et leurs caractéristiques

Variétés	Caractéristiques
<b>Waha</b>	Pédigrée : Plc/Ruff//Gta/Rte Croisement CIMMYT et sélection en F4 à l'ITGC d'El Khroub. Variété semi précoce, adapté aux régions semi arides, à bon potentiel de rendement ; moyennement résistant aux maladies, qualité technologique assez bonne.
<b>Araldur</b>	Variété d'introduction de France, performante, semi tardive, résistance moyenne aux maladies.
<b>Durbel</b>	Variété d'introduction de France, à haut rendement, semi tardive, résistance moyenne aux maladies, bonne qualité.
<b>Hedba-3</b>	Variété locale tardive, performance moyenne, sensible à la verse et aux maladies (septoriose, tan spot et BYDV), bonne qualité.
<b>Guemgoum Rkhem</b>	Variété très ancienne, locale à très grands grains (11mm), sensible à la verse et à quelques maladies, qualité moyenne à bonne.
<b>Beliouni</b>	Variété très ancienne issue de population hétérogène locale, performance moyenne, sensible à la verse et à quelques maladies, qualité moyenne.

## 2. Méthodes expérimentales

### 2.1. Installation de l'essai

Les essais ont été réalisés à l'Université Badji Mokhtar (Annaba), au laboratoire d'Amélioration génétique des plantes.

Le semis est réalisé sous serre dans des pots en plastiques pour les six variétés selon un dispositif aléatoire complet. Ce dispositif comprend trois traitements :

- Témoin (T0)
- avec stress modéré (T1)
- avec stress prononcé (T2)

Chaque variété a subi les trois traitements avec une répétition par traitement à raison de huit grains par pot. (Fig. 3) et (Fig4).

Les 18 pots (3 pour chaque variété) ont été remplis d'un mélange composé de sol, terreau (2/3 sol, 1/3 terreau) et d'une couche fine de gravier.



Fig. 3 : semis



Fig.4 : Installation de l'essai



Fig.5 : Application de stress au stade cinq feuilles

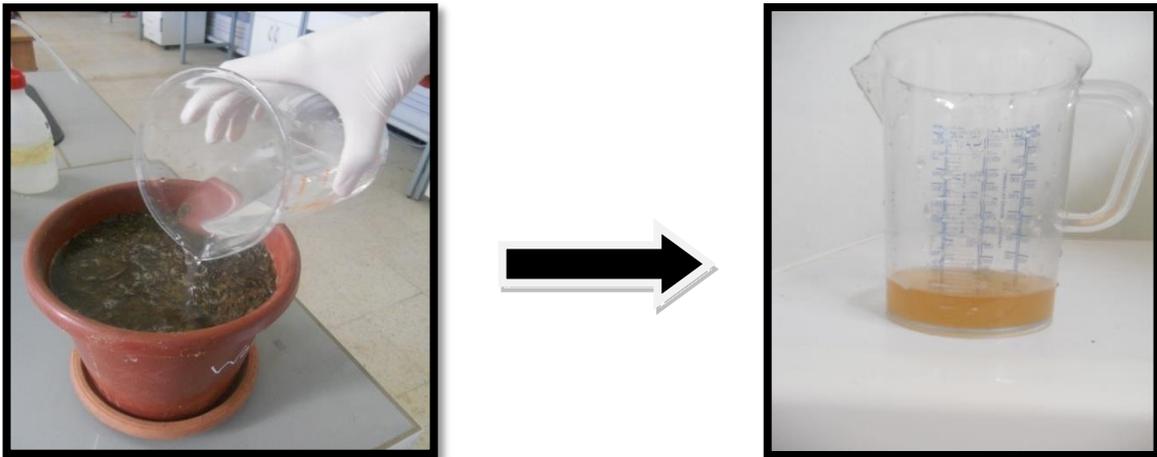
- Après l'installation de l'essai la capacité au champ a été calculée.

- **La capacité au champ**

On prend un pot parmi les 18 pots, on l'irrigue avec une quantité d'eau de 500 ml(Q1), après 15 mn on obtient une quantité d'eau dégagée par le sol et on la mesure, (Q2) étant la quantité excessive d'eau. On mesure alors la capacité au champ (C.C) (Fig.6).

$$C.C = Q1 - Q2$$

- **Q1** : la quantité initiale d'eau d'irrigation.
- **Q2** : la quantité excessive d'eau.
- **C.C** : la capacité au champ (la quantité d'eau retenue par le sol).



**Fig.6** : La capacité au champ

### 2.2. Conduite de l'essai

Les graines choisies sont mises à germer dans des boîtes de pétrie sur du coton imbibé d'eau. Après 24h de germination les grains ont été semés à une profondeur de 4cm pour toutes les variétés.

Après le semis un arrosage a été effectué afin d'obtenir une humidité homogène dans tous les pots.

Le système d'arrosage a été établi comme suit :

- ❖ L'arrosage a été effectué deux fois par semaine avec une dose de 500ml/pot jusqu'au stade de cinq feuilles pour tous les pots.

### 2.3. Application de stress

Au stade 5 feuilles, l'arrosage a été ensuite réduit à 300ml/pot pour les variétés faiblement stressées (T1) et à 150ml/pot pour les variétés les plus stressées (T2). La dose initiale de 500ml/pots a été maintenue pour les variétés témoins (T0). (Fig. 5)

### 2.4 Analyses effectuées sur la semence

#### 2.4.1 Calcul du poids de mille graines

Trois échantillons de 1000 grains chacun ont été pesés pour évaluer le poids de 1000 grains de chaque variété.

#### 2.4.2. Taux de germination

C'est le nombre de graines germées au cours d'un temps déterminé (g) sur le nombre totale de graines mises à germer (N.G)

On le détermine en utilisant la formule suivante : (Maziak ,1982)  $G = \frac{g}{N.g} \times 100$

**G** : pourcentage de germination

**g** : le nombre de graines germées

**N.g** : le nombre de graines mises à germer



**Fig.7** : taux de germination du premier comptage pour six variétés (après trois jours)



**Fig.8** : taux de germination du deuxième comptage pour six variétés (après six jours)



**Fig.9** : taux de germination du troisième comptage pour six variétés (après dix jours)

### 2.4.3. La cinétique de la croissance

Des papiers buvards ont servi pour l'ensemencement des grains (entre buvards). 10 grains de chaque variété ont constitué les échantillons de l'essai et ont été semés à 2 cm de distance chacun. L'essai a duré 14 jours.

L'irrigation étant faite avec de l'eau distillée, des mesures sont effectuées tous les quatre jours et ont concerné la radicule et la coléoptile.

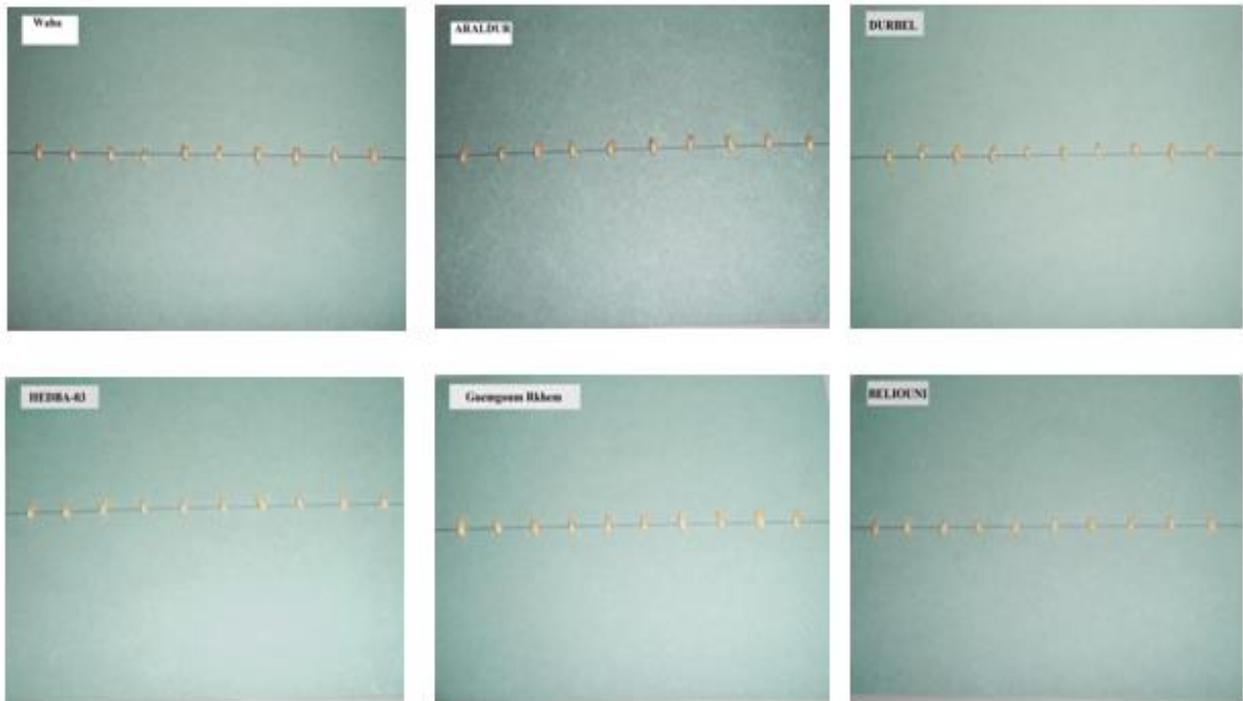


Fig.10 : les semis sur papier buvard

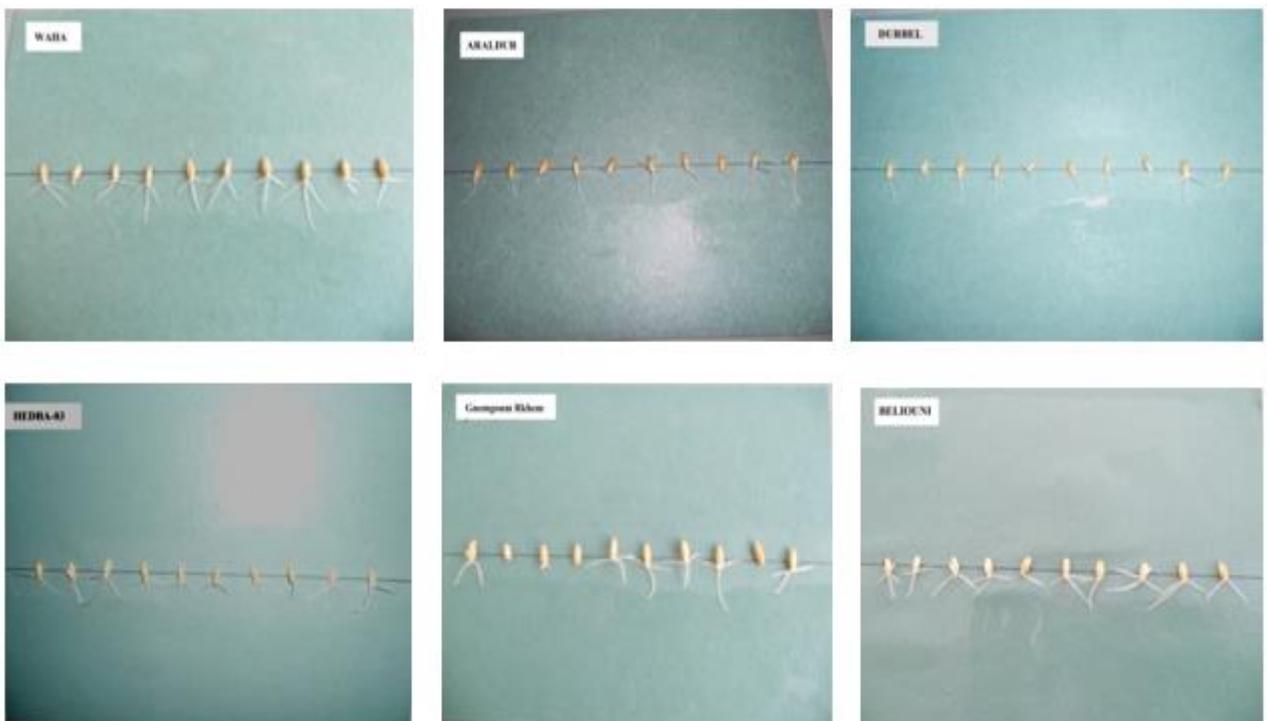


Fig.11 : 6<sup>ème</sup> jour de semis sur papier buvard

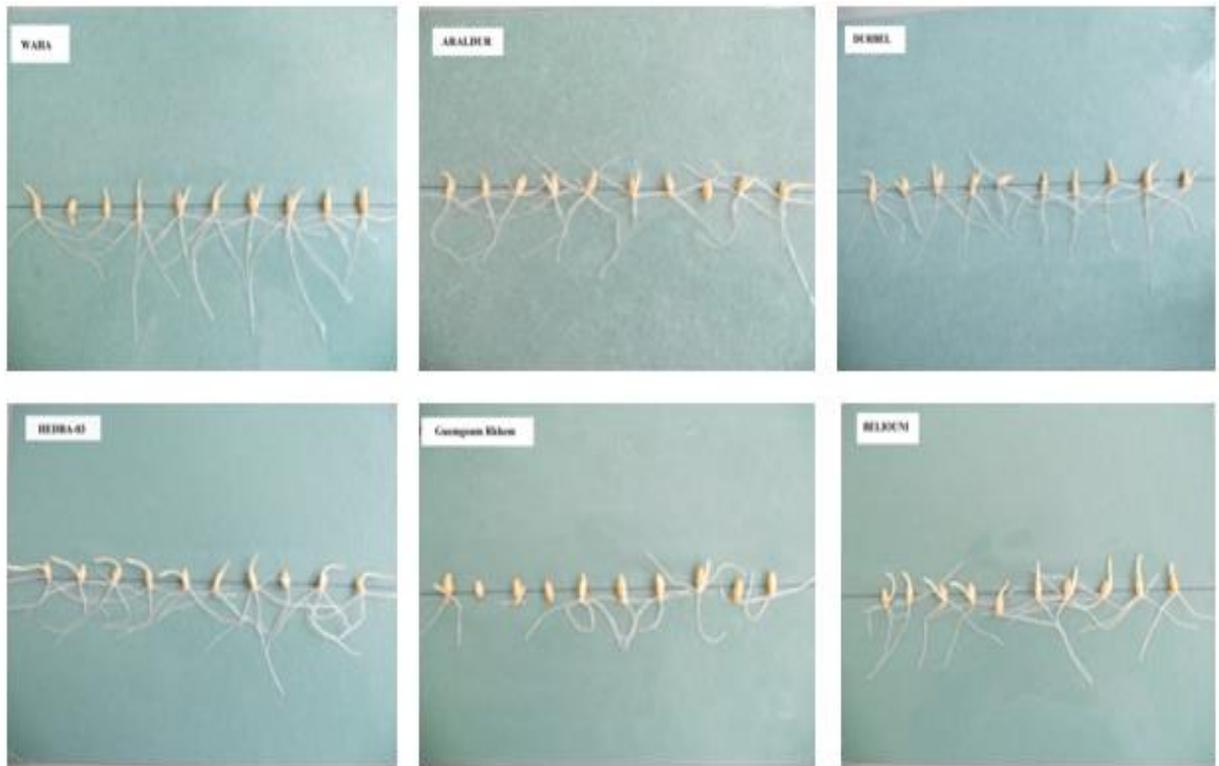


Fig.12 : 8<sup>ème</sup> jour de semis sur papier buvard

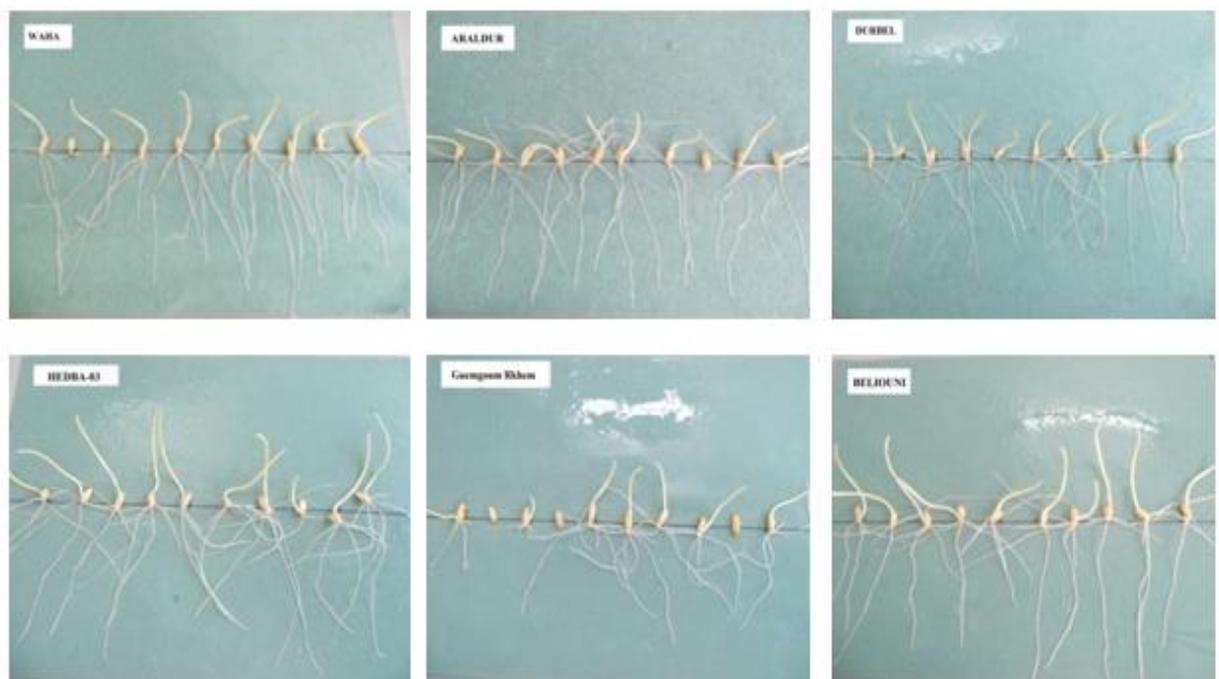
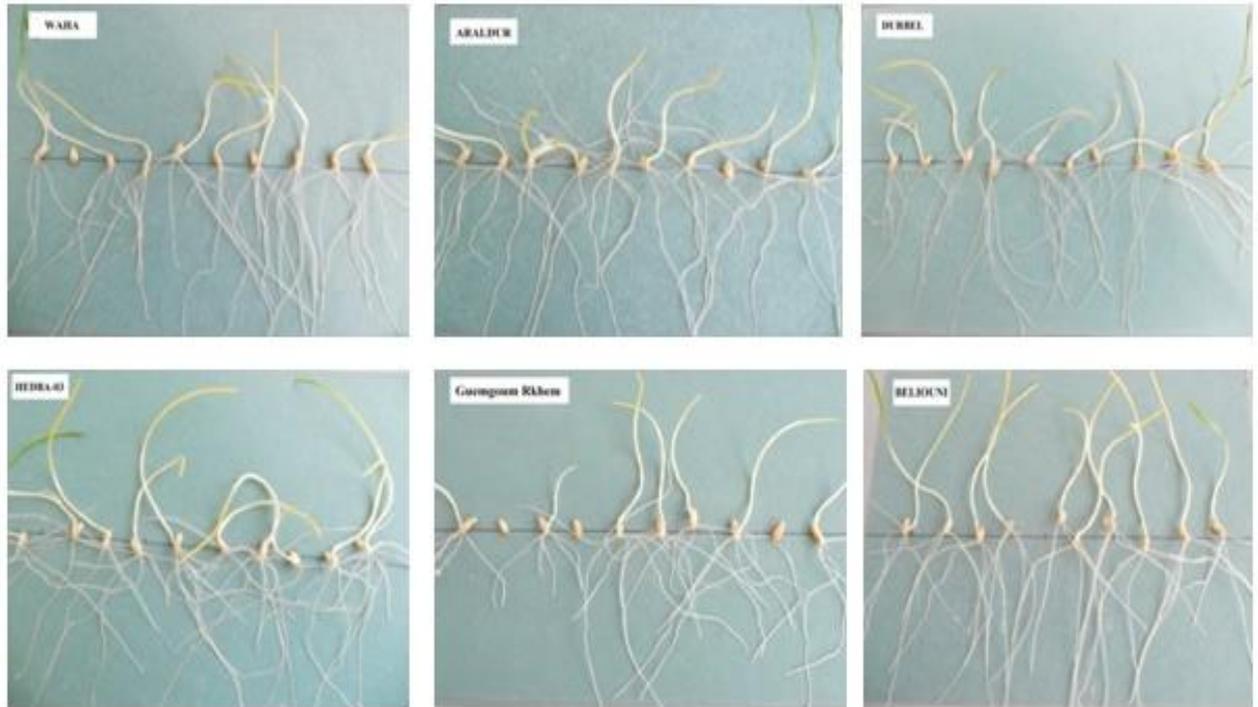


Fig.13 : Le 10<sup>ème</sup> jours de semis sur papier buvard



**Fig.14** : le 14<sup>ème</sup> jours de semis sur papier buvard

#### 2.4.4. Essai topographique au Tétrazolium (TZ)

Selon **Tetrazolium Testing Committee (1970)**, la viabilité des semences et la vigueur des embryons peuvent être testées par la méthode du T.Z. Il est appliqué sur plusieurs espèces cultivées comme essai de germination.

##### ❖ Méthode :

- tremper les semences dans l'eau à la température de la pièce pendant 18 à 20 heures.
- Séparer les embryons de l'albumen avec une aiguille à dissection et retirer les fragments d'albumen amylicé et de tégument en prenant soin d'éviter de provoquer des dégâts mécaniques aux semences.
- Immerger les embryons dans une solution de Tétrazolium à l'obscurité à 30 °C pendant 20 min dans l'étuve..

- Laver rapidement à l'eau et lire rapidement sous la loupe.



**Fig15** : Etapes du teste Tétrazolium

## 2.5. Paramètres physiologiques

### 2.5.1. Teneur relative en eau (RWC)

La teneur relative en eau ou la turgescence foliaire est une caractéristique génotypique qui est liée à la capacité de la plante à maintenir un niveau d'eau dans la feuille qui soit à même de garantir la continuité de l'activité métabolique dont, entre autres, la photosynthèse.

La teneur relative en eau a été déterminée selon les étapes suivantes :

- Les feuilles sont coupées puis pesées (poids de la matière fraîche).



**Fig.16** : Mesure du poids de la matière fraîche

- L'extrémité coupée est placée dans l'eau distillée et à l'obscurité pendant 6 heures pour obtenir le taux de réhydratation maximum.
- Les feuilles sont une nouvelle fois pesées (poids à la turgescence).



**Fig.17** : Obtention de taux de réhydratation maximum

- Les feuilles sont ensuite mises à sécher à l'étuve à 85°C pendant 24 heures et pesées (poids de la matière sèche).



**Fig.18** : séchage des feuilles à l'étuve

- Les valeurs de la turgescence sont déterminées selon **Barrs (1968)** par la formule suivante :

$$\text{RWC} = \frac{P_f - P_s}{P_t - P_s} \times 100$$

- ✓ **Pf**: poids frais (en g).
- ✓ **Ps**: poids sec (en g).
- ✓ **Pt** : poids à la turgescence (en g).

### 2.5.2. Détermination du taux de déperdition d'eau (RWL)

Il s'agit d'une transpiration cuticulaire évaluée grâce à la méthode de **Clarck et al. (2002)** :

- les feuilles sont collectées dans un sachet en plastique et sont transportées immédiatement au laboratoire.
- Après 30 mn (fermeture maximum des stomates), le poids frais est déterminé ( $P_i$ ) et la surface des feuilles mesurée.
- Par la suite, les feuilles sont placées dans des conditions de laboratoire ( $T^\circ$  et  $H^\circ$  ambiantes), pendant 120 mn pour déterminer le poids après déshydratation.
- Le poids sec est mesuré après passage à l'étuve à  $80^\circ$  pendant 24 heures, le taux de déperdition d'eau est exprimé en  $g/cm^2/mn$ .
- Ainsi, ces auteurs, évaluent le taux de déperdition d'eau des feuilles excisées (Rate water loss of excisedleaves ou RWL), selon la formule suivante :

$$\text{RWL} = \frac{P_{f_i} - P_{f_2h}}{P_s} \times \frac{1}{SF \times 120 \text{ min}}$$

- ✓ **R.W.L.**: Taux de déperdition d'eau (exprimé par  $g/cm^2/mn$ ).
- ✓ **Pf<sub>i</sub>** : poids frais initial.
- ✓ **Pf<sub>2h</sub>** : poids frais après 2 heures.

- ✓ **Ps** : poids sec.
- ✓ **S.F** : Surface Foliaire.

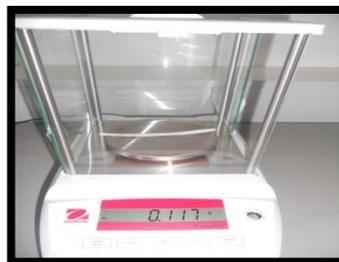
### 2.5.3. La surface foliaire (SF)

Elle a été déterminée par une méthode traditionnelle qui consiste d'une part à reproduire le limbe foliaire du blé sur papier qui est ensuite pesé, et d'autre part à couper un carré de 1cm de coté du même papier et de le peser. Juste après on en déduit la surface assimilatrice (**Paul et al., 1979**).

- déduire la surface foliaire SF par la formule suivante :

$$SF = \frac{Pf \times S}{P}$$

- ✓ **Pf** : Poids frais de la feuille.
- ✓ **S** : Surface d'un carré de 1cm (1cm<sup>2</sup>).
- ✓ **P** : Poids du papier.



**Fig.19** : Les étapes de détermination de la surface foliaire

### 2.5.4. La biomasse (MS%)

-Au stade de 4 à 5 feuilles, trois échantillons ont été choisis pour chaque variété et pour chaque traitement (témoin et stressés).

-Les plantes sont retirées totalement avec précaution (c'est-à-dire avec leurs racines), rincées de tout déchet et bien essuyées en utilisant du papier buvard.

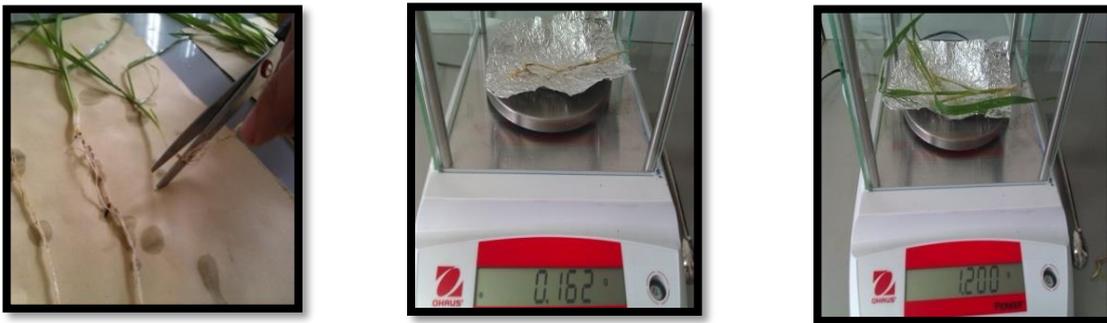
-Ensuite ces plantes sont pesées et on obtient le poids frais de la plante, puis les plantes sont coupées en deux parties : aérienne et racinaire, puis les deux parties sont pesées.

-Les échantillons sont ensuite mis à sécher dans l'étuve à 85°C pendant 24 heures puis ils sont pesés, et on obtient le poids sec.

La biomasse a été évaluée par la formule suivante :

$$MS\% = \frac{Ps}{Pf} \times 100$$

- ✓ **MS%** : pourcentage de matière sèche.
- ✓ **Ps** : poids sec des plantes.
- ✓ **Pf**: poids frais des plantes.



**Fig.20** : les étapes de la détermination de la biomasse

### 2.5.4. Dosage de la chlorophylle

L'extraction de la chlorophylle des tissus foliaires a été réalisée suivant la méthode de **MC. Kinney-Arnon (1941)**.

Le travail a porté sur la détermination de la teneur en chlorophylle de la dernière feuille. Pour chaque catégorie de tous les traitements de six variétés de blé dur. On pèse des échantillons de 1g (1/3 médian de la feuille prélevée, sur les dernières feuilles de chaque variété de blé).

## Matériel et méthodes

Le végétale est coupé en petits morceau et broyé dans un mortier avec 25ml d'acétone à 80% et une pincée de calcium «CaCO<sub>3</sub>». Après broyage total, la solution est filtrée et mise dans des boites noires pour éviter l'oxydation de la chlorophylle par la lumière.

Le dosage se fait par le prélèvement de 3ml de la solution dans la cuve à spectrophotomètre et la lecture se fait aux deux longueurs d'onde 645 et 663nm, après étalonnage de l'appareil avec la solution témoin d'acétone à 80%. La formule relative au solvant nous permet de calculer les valeurs de la chlorophylle :

$$\text{Chl (a)} = 12,7(\text{DO663}) - 2,69(\text{DO645})$$

$$\text{Chl (b)} = 22,9(\text{DO645}) - 4,68(\text{DO663})$$

$$\text{Chl (a+b)} = 8,02(\text{DO663}) + 20,20(\text{DO645})$$

**DO:** la densité optique (valeurs données par le spectrophotomètre aux longueurs d'ondes 645 et 663nm).

**Chl :** chlorophylle



**Fig.21 :** Les étapes du dosage de la chlorophylle

### 2.6. Paramètres biochimiques

Les paramètres biochimiques consistent à mesurer les quantités des constituants des organes biologiques en général/ sucres solubles ; protéines totales ; acides aminées ; proline ; lipides.

### 2.6.1. Dosage de la proline (Pro)

Le test permet de déterminer la teneur en proline pour les trois traitements (T0, T1, T2) des six variétés de blé dur qui sont effectuées 15 jours après de stress hydrique.

La technique utilisée pour le dosage de la proline est celle de **Monneveux et Nemmar(1986)**.

- On pèse 100mg du végétal (feuilles de blé) coupé en petits morceaux qu'on introduit dans un tube à essai, auquel on ajoute 2ml de méthanol à 40%. L'ensemble est ensuite chauffé au bain-marie à 85°C pendant 60min, les tubes sont recouverts de papier aluminium pour éviter la volatilisation de l'alcool.
- Après refroidissement, on prélève 1ml de la solution auquel on ajoute 1ml d'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) et 1ml du mélange modifié contenant (120ml d'eau distillée+ 300ml d'acide acétique + 80ml d'acide ortho phosphorique) et 25mg de ninhydrine.
- Les solutions sont portées à ébullition pendant 30min. Elles virent au rouge; Après refroidissement, on ajoute 5ml de toluène. Après agitation deux phases se séparent :
  - 1- La phase inférieure sans proline.
  - 2- La phase supérieure qui contient la proline, cette phase est ensuite récupérée et déshydratée par l'adjonction de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
- Enfin, on procède à la détermination des densités optiques des échantillons à la longueur d'onde 528nm, après étalonnage de l'appareil par le mélange (acide acétique+eau distillée+acide ortho phosphorique+ninhydrine). Les valeurs obtenues sont reportées sur la courbe d'étalonnage.



**Fig.22** : Les étapes du dosage de la proline

### 2.6.2. Dosage des protéines

Le dosage des protéines a été effectué selon la méthode **Bradford(1976)** qui consiste à réaliser une gamme d'étalonnage à partir d'une protéine standard, l'Albumine Sérum de Boeuf (BSA) titrant 1 mg/ml (1 mg BSA, 1 ml eau distillée). Elle utilise du Bleu Brillant de Coomassie (BBC) G250 dont la forme leuco (brun orange) est convertie en forme bleue caractéristique du complexe formé entre les groupements  $\text{NH}_3^+$  des protéines et ce réactif. Elle permet de doser des quantités de protéine de l'ordre du microgramme.

La lecture des absorbances s'effectue à une longueur d'onde de 595 nm au spectrophotomètre.

### 2.6.3. Dosage des sucres solubles

La méthode utilisée pour le dosage des sucres solubles est celle de **Schiels et Burnett(1960)**, qui utilise l'anthrone en milieu sulfurique.

Le principe de cette méthode repose la condensation des produits de dégradation des sucres neutres. L'acide sulfurique concentré transforme à chaud les glucides en dérivés sulfuriques : les hexoses produisent des dérivés qui donnent avec l'anthrone une coloration verte présentant un maximum d'absorption à 585 nm.

#### A. Extraction des échantillons

L'extraction des sucres solubles est faite à froid, en mettant le végétal (prélevé dans le tiers médian de la feuille) 100mg de matière fraîche dans des tubes à essai auxquels sont ajoutés 3ml d'alcool (éthanol à 80%) pendant 24h. La solution ensuite passe au rotavapeur (ou bien au bain marie à 70°C pendant 30minutes). Une fois l'alcool évaporé, on ajoute 20ml d'eau distillée dans la totalité de l'extrait.

Le réactif à l'anthrone doit être préparé 4heures à l'avance, en mélangeant 0.2gr d'anthrone dans 100ml d'acide sulfurique, et conservé dans un flacon sombre.

Les échantillons biologiques et les séries standard de la gamme d'étalonnage sont dosés parallèlement.

#### B. Réalisation de la courbe étalon

La gamme d'étalonnage est réalisée en utilisant une solution mère de glucose à 50µg/ml d'éthanol à 80%.

Dans des tubes à essai numérotés de 1 à 10, on dépose respectivement 1 à 10 ml de la solution mère de glucose et on ajuste à 10 ml d'éthanol à 80%.

A partir de chacun de ses tubes, on prélève 2 ml de solution que l'on place dans d'autres tubes à essai, numérotés de 1 à 10 ; ces derniers contiennent donc des quantités croissantes de glucose (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 µg).

### C. Dosage

Quatre millilitres du réactif à l'anthrone sont ajoutés à 2 ml de la solution à analyser (extraits et étalons). Les tubes à essai sont maintenus pendant cette opération dans un bain de glace (réaction exothermique) ; Après agitation avec une tige de verre, ces tubes sont ensuite placés dans un bain-marie à 92°C pendant 8 mn ; la solution vire alors légèrement au bleu vert. Pour l'arrêt de cette réaction, les tubes sont refroidis dans un bain de glace.

Après repos à l'obscurité pendant 30 minutes, la lecture est faite au spectrophotomètre réglé préalablement au zéro avec un blanc de gamme (2 ml d'éthanol à 80% + 4 ml du réactif). Les valeurs obtenues sont reportées sur la gamme étalon.

### 2.6.4. Dosage de l'enzyme Catalase

#### A. Extraction enzymatique

La méthode adoptée afin d'obtenir l'extrait enzymatique des racines est celle de **Loggini et al. (1999)**. L'extrait sera utilisé pour la mesure de l'activité de la catalase.

Après 48 heures de traitement, les racines fraîches (1g) sont broyées à froid à l'aide d'un mortier dans du tampon phosphate (50 mM, NaK, pH=7.2) à raison de 5 ml du tampon pour 1g de racines. L'homogénat est ensuite centrifugé à froid de 12000xg pendant 20 min (Centrifugeuse SIGMA), le surnageant obtenu sera utilisé comme extrait pour la détermination des différentes activités enzymatiques suivant la formule :

$$Act = \frac{\Delta A. Vt}{\epsilon. \Delta t. L. Ve. P}$$

- ✓ **Act**: Activité enzymatique en nmol/min/mg de protéines.
- ✓ **Vt** : Volume totale du mélange réactionnel en ml.
- ✓ **ΔA**: Différence moyenne de l'absorbance.
- ✓ **ε** : Coefficient d'extinction linéique molaire en  $M^{-1}.cm^{-1}.L$ .
- ✓ **L**: Largeur de la cuve de mesure en cm.
- ✓ **Ve**: Volume de l'extrait enzymatique en ml.
- ✓ **P**: Teneur en protéines en mg.
- ✓ **t** : Temps de lecture en min.

### B. Détermination de l'activité Catalase (CAT)

Le dosage spectro-photométrique de l'activité catalase (CAT) est réalisé suivant la méthode de **Cakmak et Horst (1991)**.

La décroissance de l'absorbance est enregistrée pendant trois minutes (Spectrophotomètre Jenway 6300) pour une longueur d'onde de 240nm et un coefficient d'extinction linéique molaire  $\epsilon = 39400 M^{-1}.cm^{-1}$  pour un volume final de 3ml.

Le mélange réactionnel contient : 100 $\mu$ l de l'extrait enzymatique brut, 50 $\mu$ l de peroxyde d'hydrogène  $H_2O_2$  à 0,3% et 2850 $\mu$ l de tampon phosphate (50mM, pH= 7,2).

L'étalonnage de l'appareil se fait en l'absence de l'extrait enzymatique. La réaction est déclenchée par l'addition d'eau oxygénée. L'activité catalase est exprimée en mol/min/mg de protéines.

### 3. Analyse statistique des résultats

L'analyse statistique a été réalisée avec l'analyse de la variance ANOVA à deux critères (AV2) au moyen du logiciel « MINITAB 16 ».

## Matériel et méthodes

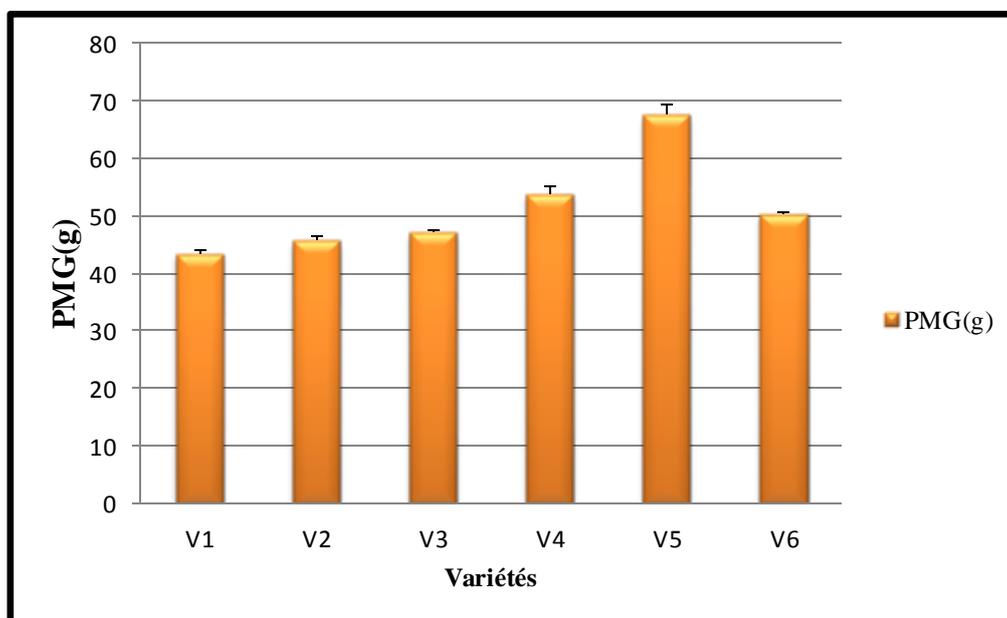
Le test de l'analyse de la variance a été effectué sur les résultats des tests physiologiques (RWC, RWL, Surface foliaire, CHLa, CHLb, CHLa+b) et les tests biochimiques (Proline, Protéines, Sucres solubles, Catalase).

### 1. Analyses effectuées sur la semence

#### 1.1. Poids de mille grains

C'est un critère généralement peu maîtrisable car il est fortement lié aux effets de l'environnement, au moment de la formation et du remplissage du grain.

Un manque d'eau après la floraison combiné aux températures élevées (conditions fréquentes en Algérie) entraîne une diminution du poids de 1000 grains par altération de la vitesse et/ou de la durée de remplissage, ce qui se traduit par l'échaudage des grains (Zouaoui , 1993 ; Chaker 2003) .



**Fig.23** : Poids de mille grains exprimé en gramme (g)

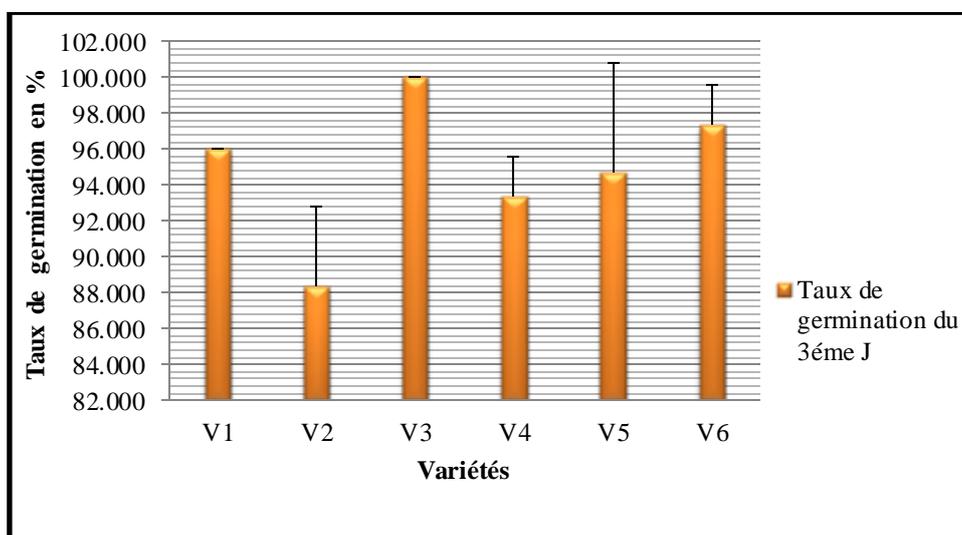
Les résultats du poids de mille grains sont considérés comme bons à très bons ; ils varient entre **43,36g et 67,62g**

D'après le graphe, il ressort que la variété V5 est celle qui a le PMG le plus élevé par rapport aux autres variétés.

Les résultats rapportés dans l'ensemble des tests peuvent être justifiés par la supériorité du PMG de V5 ; montrant ainsi une performance et une meilleure vigueur par rapport aux autres variétés. Un tel résultat suggère aussi qu'il existe une interaction génotype-milieu, à même d'être à la base de la diversité génétique utilisée.

### 1.2. Taux de germination

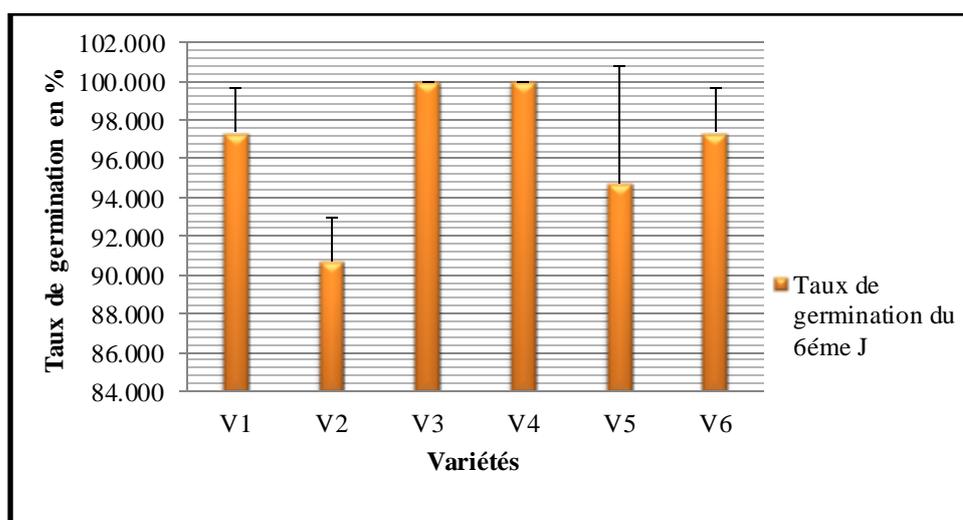
Les résultats en général montrent un très bon niveau de germination chez les six génotypes.



**Fig.24** : Taux de germination du premier comptage pour les six variétés après trois jours (exprimée en %).

Le présent résultat offre une nette supériorité de la variété V3 par un taux de germination de 100%, suivi légèrement de la variété V6 (97.33%) et V5 (94.66%). Par contre le génotype V2 semble être le moins performant quant à son aptitude à la germination.

Cette disparité dans les résultats risque de trouver une explication possible dans la nature de l'héritabilité de ce caractère physiologique, démontrant par là l'impact de la vigueur des semences dans les diverses formes de réponse.



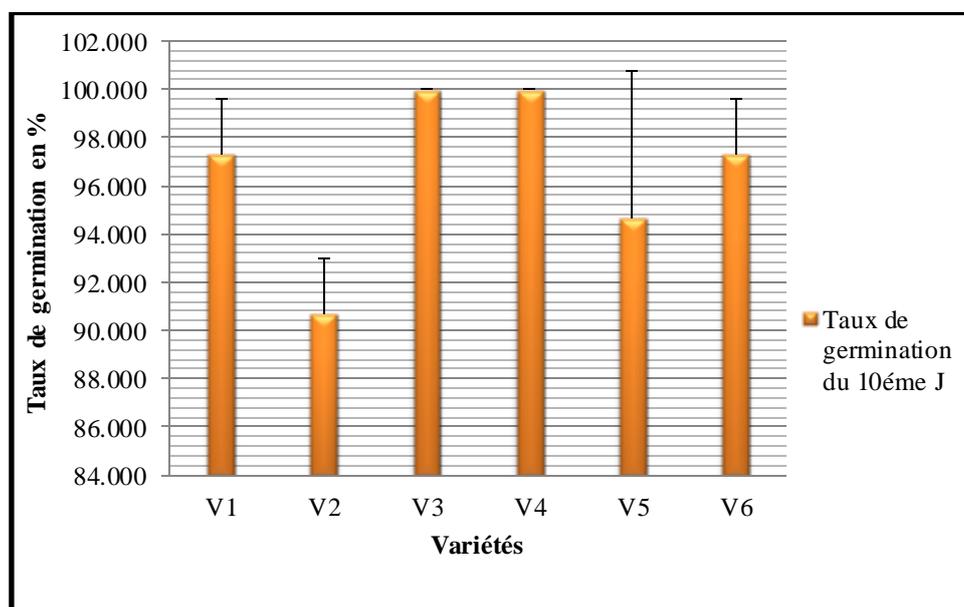
**Fig.25** : Taux de germination du deuxième comptage pour les six variétés après six jours (exprimée en %).

## Interprétation des résultats

Lors du deuxième comptage, on constate que la variété V2 a toujours le pouvoir de germination le plus faible qui atteint à 90.66%. Les variétés V5 (94.66%) et V6 (97.33%) n'ont pas évolué de manière substantielle.

On constate cependant que V4 a rejoint V3 avec un taux de germination maximal de 100%.

Encore une fois, le facteur héritabilité demeure un critère de choix dans l'expression respective de la germination.



**Fig.26** : Taux de germination du troisième comptage pour les six variétés après dix jours (exprimée en %).

Au troisième comptage, on constate que la variété V2 a toujours le pouvoir de germination le plus faible et que les variétés V1, V3 et V4 n'ont pas du tout évolué.

Les résultats en général montrent un bon niveau de germination chez les six variétés. On peut même marquer une supériorité à quelques géotypes qui affichent un taux de germination élevé par rapport aux autres qui sont V3 et V4 qui ont un taux de germination maximal de 100%

### 1.3. La Cinétique de croissance

À la lumière des résultats obtenus, il ressort que d'une manière générale, les six génotypes réagissent de manière similaire, en ce sens que du 6<sup>ème</sup> au 14<sup>ème</sup> jour il y a en effet une augmentation progressive dans la cinétique de croissance.

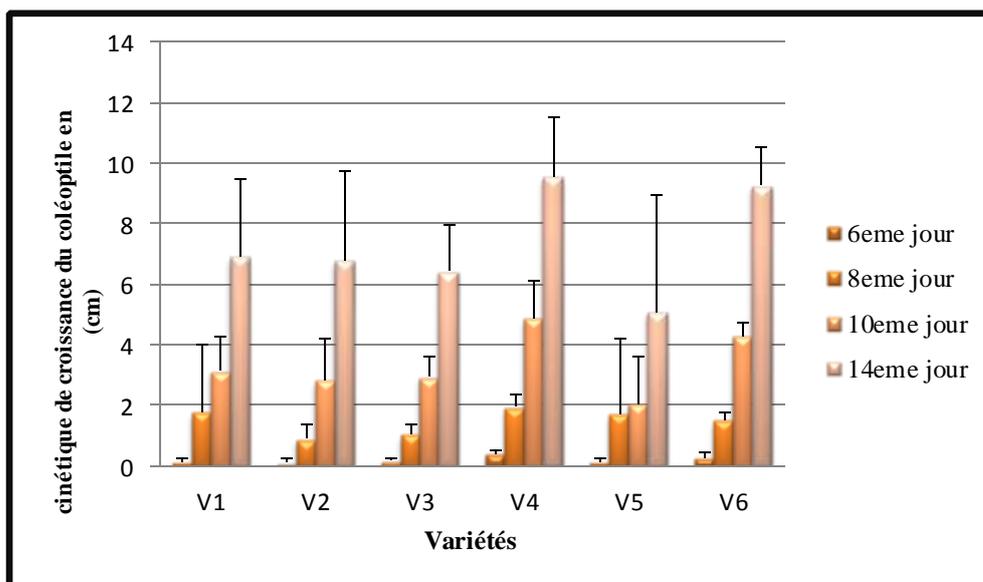


Fig.27 : Cinétique de croissance de la Longueur moyenne du coléoptile des six variétés (exprimée en cm).

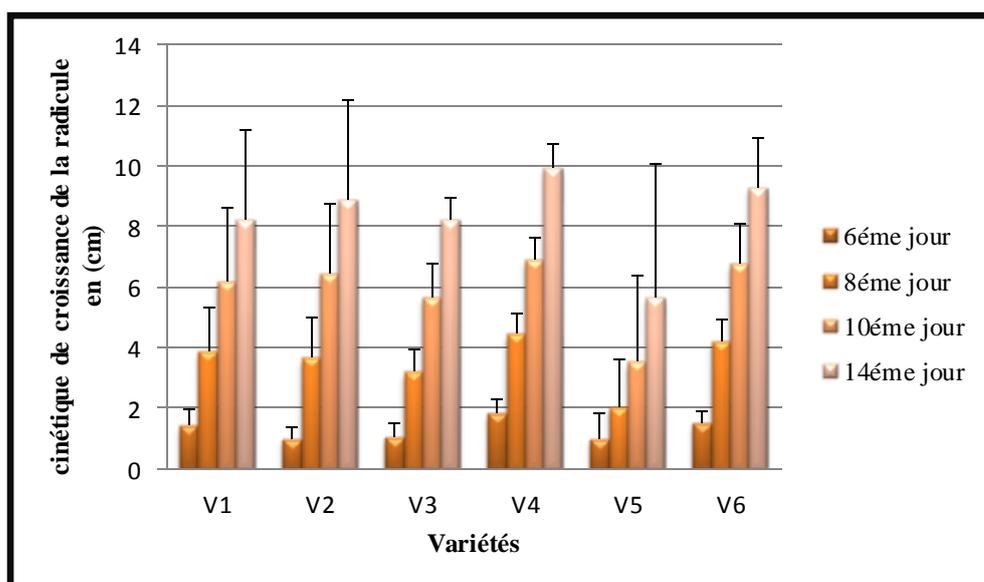


Fig.28 : Cinétique de croissance de la longueur moyenne de la racicule des six variétés (exprimée en cm).

## Interprétation des résultats

Cependant, l'appréciation individuelle des longueurs racinaires et des coléoptiles reste quelque peu différente. Les coléoptiles ont une cinétique plus rapide lors de la dernière évaluation (14<sup>ème</sup> jour).

Concernant la croissance des racines elles semblent être plus compressées relativement dans tous les cas entre le premier et le dernier échantillonnage (6<sup>ème</sup> et 14<sup>ème</sup> jour respectivement).

Cette différence de comportement morphologique peut être attribuée à la nature génotypique des variétés ; celles-ci étant mise dans des conditions d'expérimentation similaire.

Ces résultats qui à l'issue de la dernière mesure (14<sup>ème</sup> jour) font ressortir deux génotypes distincts V<sub>4</sub> et V<sub>6</sub> par leurs supériorités aussi bien aux plans racinaires qu'aux plans coléoptiles.

Un autre lot regroupe le reste des variétés V1, V2, V3, V6 qui ont présenté un niveau de croissance moins évolué. Cette expérimentation démontre qu'il y a une variabilité génotypique au sein de ce germoplasme.

En général, la cinétique de croissance de la partie aérienne et souterraine montre que les variétés Hedba-03(V4) et Beliouni(V6) ont des réponses supérieures aux autres variétés ; ce qui encore une fois, prouve que les variétés locales sont plus privilégiées.

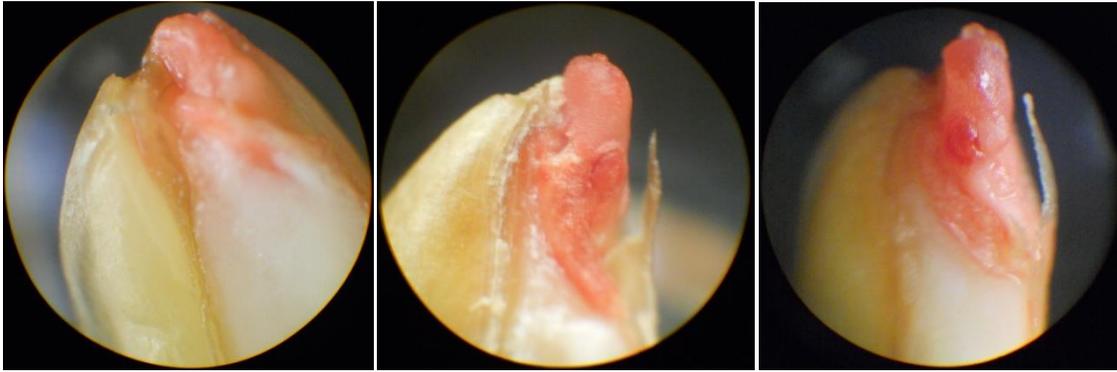
### 1.4. Test de Tetrazolium (TZ)

Le classement des tissus a été fait par l'activité respiratoire des tissus embryonnaires. La réaction de Tetrazolium en présence de tissus vivants se transforme biochimiquement en un colorant rouge appelé « Formazan ».

La coloration rouge est cependant entre le rouge vif et le rouge foncé.

La vigueur des semences est ainsi appréciée sur la base de la coloration, de l'intensité de coloration ou même de l'absence de coloration. Dans ce dernier cas de figure les semences ne sont pas viables, permettant ainsi un classement sur la vigueur en se basant sur une observation visuelle ou sous microscope.

## Interprétation des résultats



V<sub>1</sub> : Faiblement Vigoureuse

Moins Vigoureuse

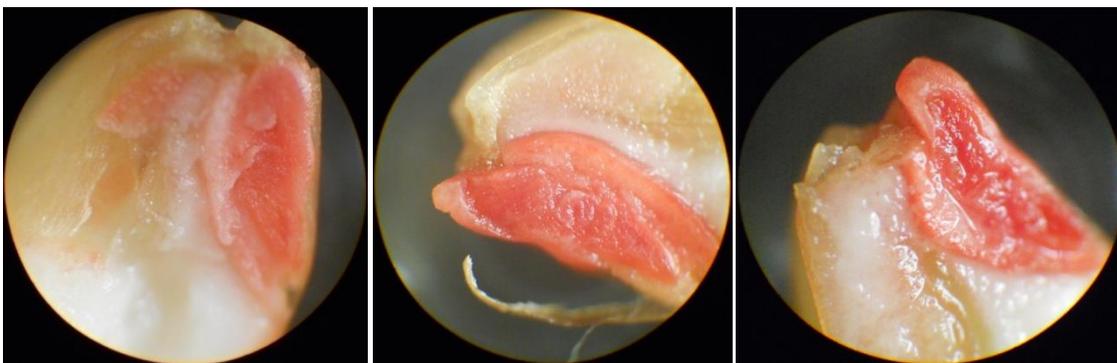
Vigoureuse



V<sub>2</sub> : Faiblement Vigoureuse

Moins Vigoureuse

Vigoureuse

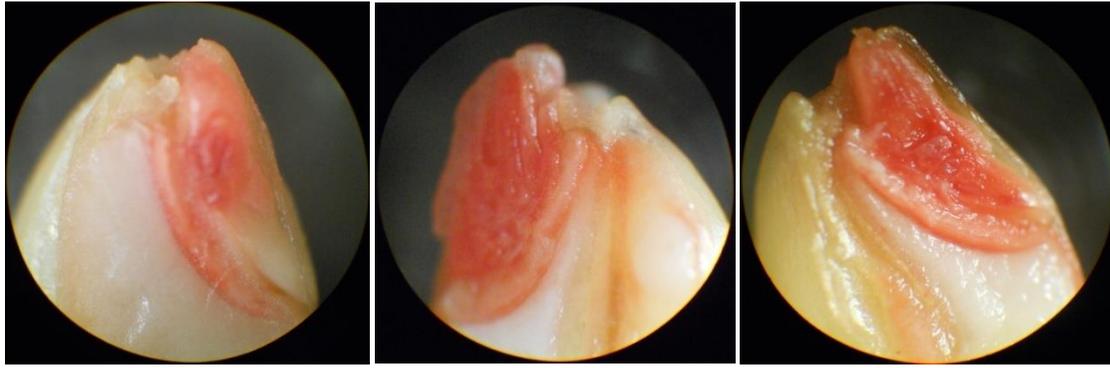


V<sub>3</sub> : Faiblement Vigoureuse

Moins Vigoureuse

Vigoureuse

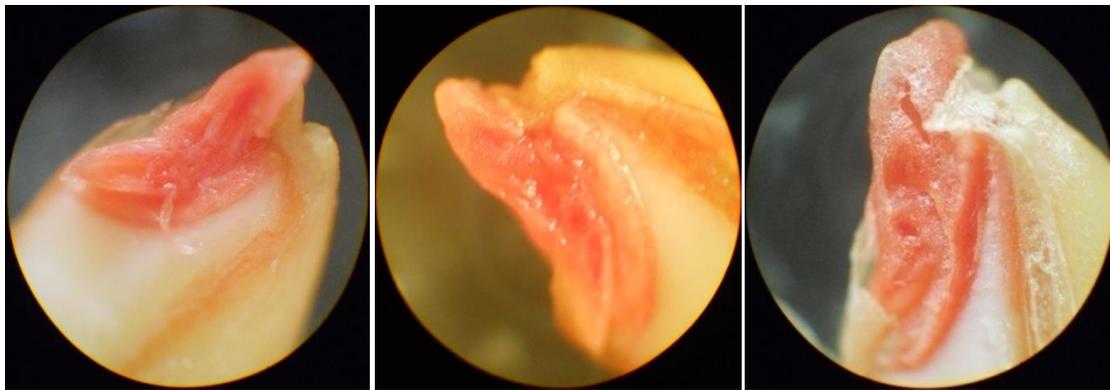
## Interprétation des résultats



V4 : Faiblement Vigoureuse

Moins Vigoureuse

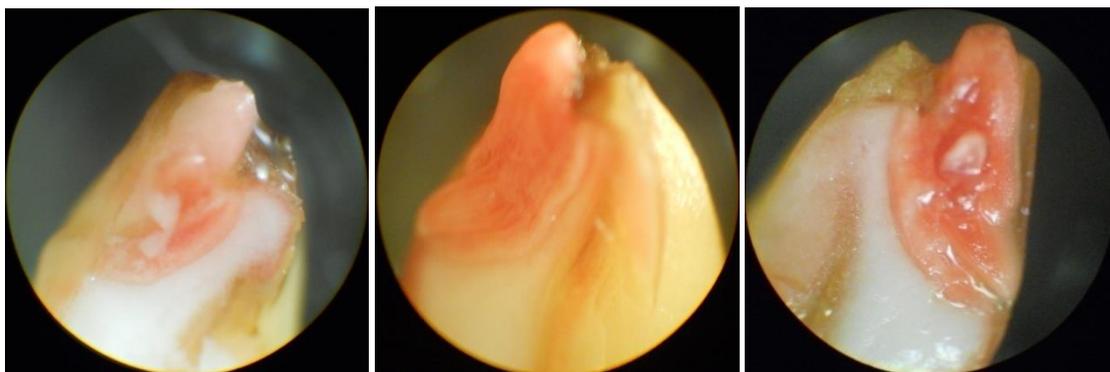
Vigoureuse



V5 : Faiblement Vigoureuse

Moins Vigoureuse

Vigoureuse



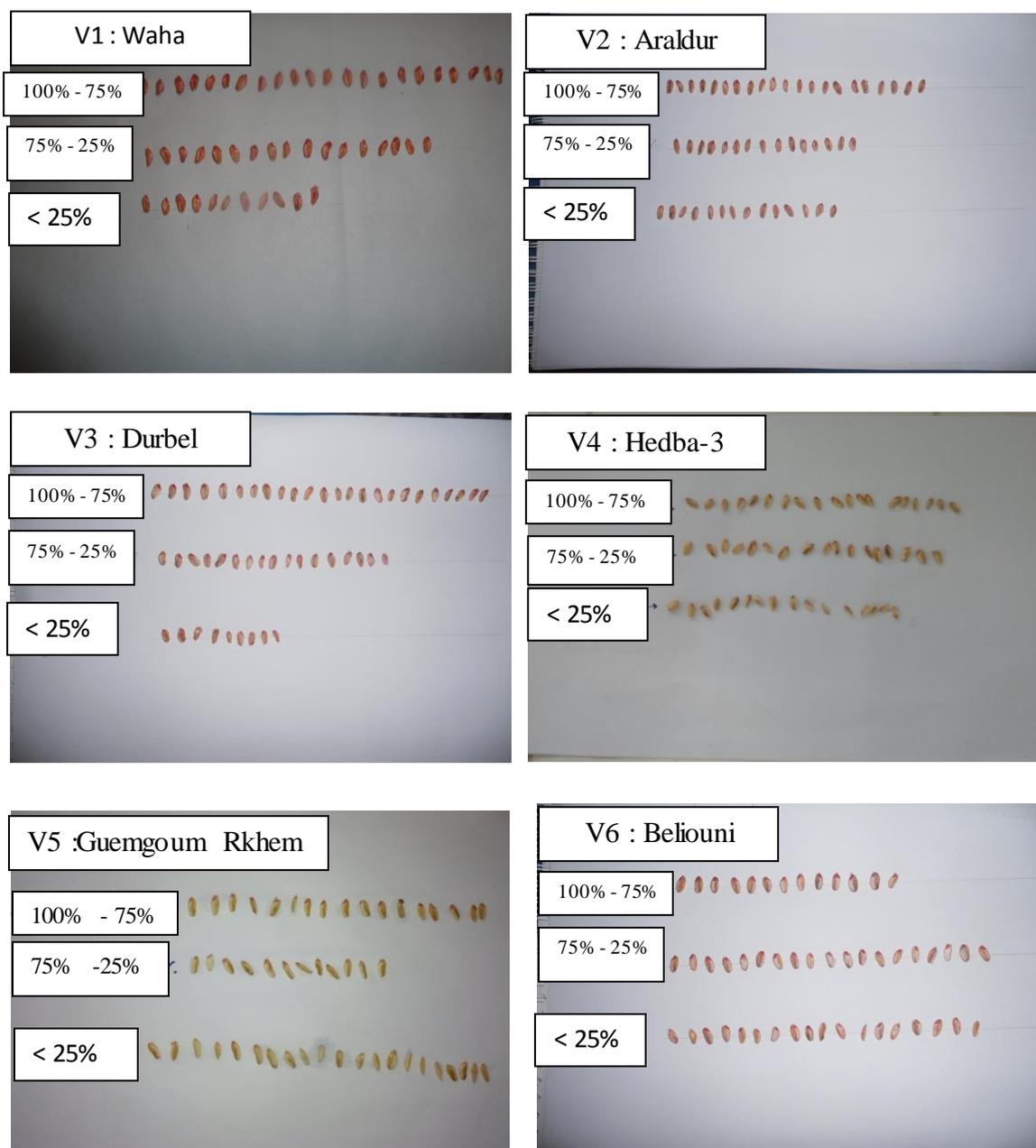
V6 : Faiblement Vigoureuse

Moins Vigoureuse

Vigoureuse

**Fig.29** : Exploration topographique au Tetrazolium

## Interprétation des résultats



**Fig 30** : Classement des variétés selon la viabilité et la vigueur des graines

Les résultats obtenus montrent que d'une manière générale, les variétés V1 ; V2 ; V3 présentent une très grande viabilité et également une forte vigueur (**Fig.30**).

Ceci est exprimé grâce aux parties embryonnaires respectives qui ont une forte coloration rouge vive, dénotant ainsi l'aptitude des graines à exprimer les facultés germinatives.

## Interprétation des résultats

Pour les variétés V4 et V6 elles ont affiché une vigueur moindre que celle des autres variétés ; ceci est vérifié notamment par quelques coléoptiles incapables de répondre à la respiration des tissus.

Pour la variété V5 le test Tetrazolium montre que la vigueur est très faible, cette variété peut être donc considérée comme une variété à faible pouvoir germinatif et n'ayant surtout aucune vigueur (**Fig.30**)

### 1.5. Capacité au champ

La capacité au champ est exprimée en (ml)

$Q_1$  : la quantité initiale d'eau d'irrigation en (ml).

$Q_2$  : la quantité excessive d'eau en (ml).

C.C : la capacité au champ (la quantité d'eau retenue par le sol) en (ml).

$$Q_1 = 500 \text{ ml}$$

$$Q_2 = 100 \text{ ml}$$

$$C.C = Q_1 - Q_2$$

$$C.C = 500 - 100$$

$$C.C = 400 \text{ ml}$$

$$500 \text{—} 100\%$$

$$400 \text{—} X$$

$$X = 80\%$$

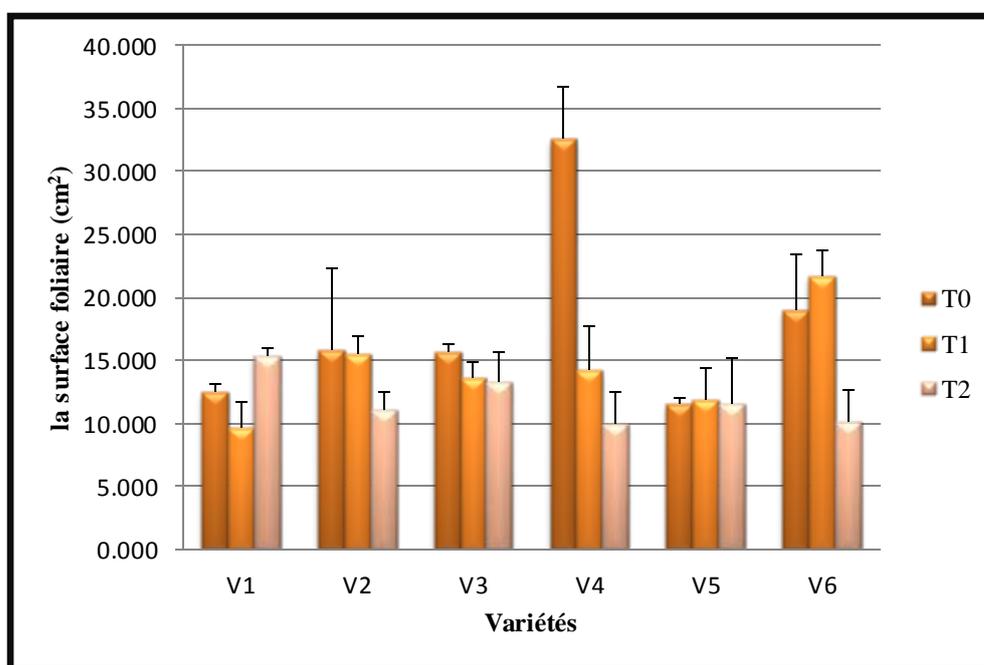
Les mesures de la capacité au champ est un indicateurs de l'état hydrique du sol Qui a été bien défini dans le cas de l'essai en pots.

Dans notre étude nous avons noté une bonne capacité au champ qui atteint à **400ml** par pot (80%).

### 2. Effet du stress hydrique sur les paramètres physiologiques chez les six variétés du blé dur

#### 2.1. La surface foliaire (SF)

Les résultats montrent une diminution de la taille des feuilles des différents génotypes étudiés en fonction du degré du stress hydrique appliqué. Dans toutes les conditions d'irrigation, on remarque que les variétés V4 et V6 représentent une forte diminution en surface foliaire, ce qui signifie qu'elle est la plus résistante vis à vis au stress hydrique (**FIG : 31**)



**Fig 31:** Variation de la surface foliaire sous l'effet du stress hydrique

Les surfaces foliaires les plus importantes aux conditions d'irrigation normale (témoin T0) sont V<sub>4</sub> et V<sub>6</sub>. Ceci est quelque peu attendu compte tenu de leurs origines locales autochtones.

Les variétés V<sub>2</sub> et V<sub>3</sub> représentent une faible diminution en surface foliaire. Le reste des autres génotypes ne répond pas aux contraintes du déficit hydrique.

Ce qui est aussi confirmé par les résultats de l'analyse de variance qui ont indiqué pour ce paramètre un effet très hautement significatif (**P=0.000**) entre les variétés, les traitements et même pour l'interaction variétés\*traitements (**P=0.000**).

L'accommodation transitoire diffère d'un génotype à un autre, cela est dû à leurs origines.

### 2.2. La teneur relative en eau (RWC)

La comparaison de l'évolution de la teneur en eau des six génotypes imposés au stress hydrique a été réalisée par rapport au témoin.

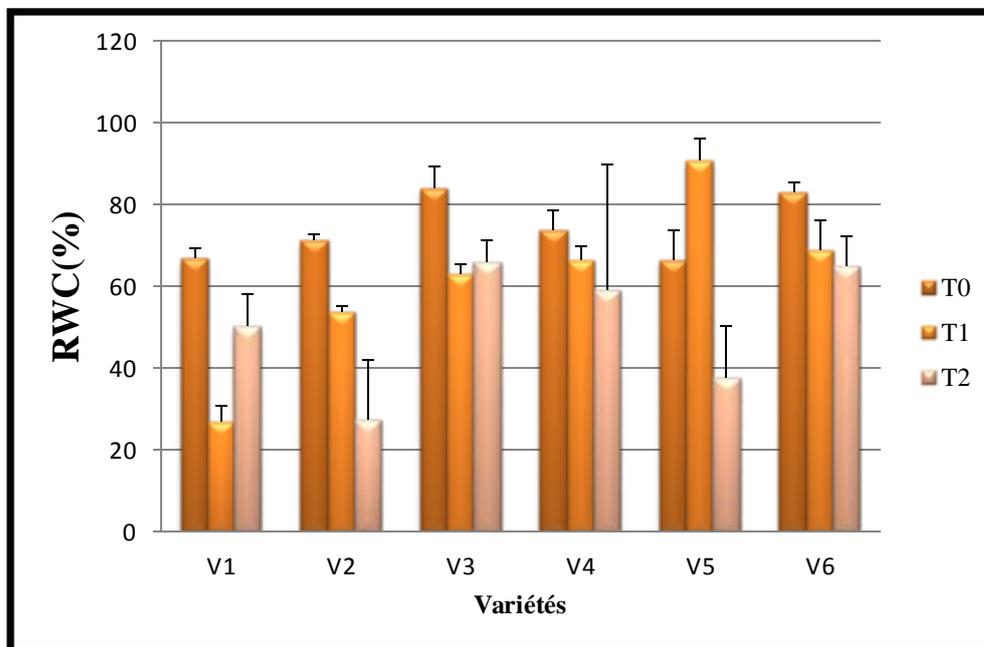


Fig 32 : Variation de la teneur relative en eau sous l'effet stress hydrique

En général la variation du contenu relatif en eau (RWC) montre une décroissance continue variable selon l'intensité du stress hydrique appliqué. Nous déduisons que le manque d'eau a un effet négatif sur la turgescence cellulaire.

La comparaison de l'évolution du pourcentage de la teneur relative en eau des six variétés de blé dur a montré que le stress hydrique appliqué entraîne une chute du pourcentage d'eau aussi bien pour les variétés V2 et V5 que pour les autres variétés.

L'analyse de variance indique pour ce paramètre un effet très hautement significatif ( $P=0.000$ ) entre les variétés, les traitements et même pour l'interaction variétés\*traitements.

Dans toutes les conditions d'irrigation; le pourcentage le plus élevé a été marqué chez la variété V5 et qui atteint 90.84% au stress modéré (T1).

Les variétés V3 et V6 qui ont un RWC plus élevé que les autres au stress prononcé, semblent être les plus prometteuses, quant à une adaptation possible au stress.

### 2.3. La teneur de déperdition d'eau (RWL)

Il y a d'une manière générale, une diminution de la surface foliaire des variétés soumises aux différents traitements (T1 et T2).

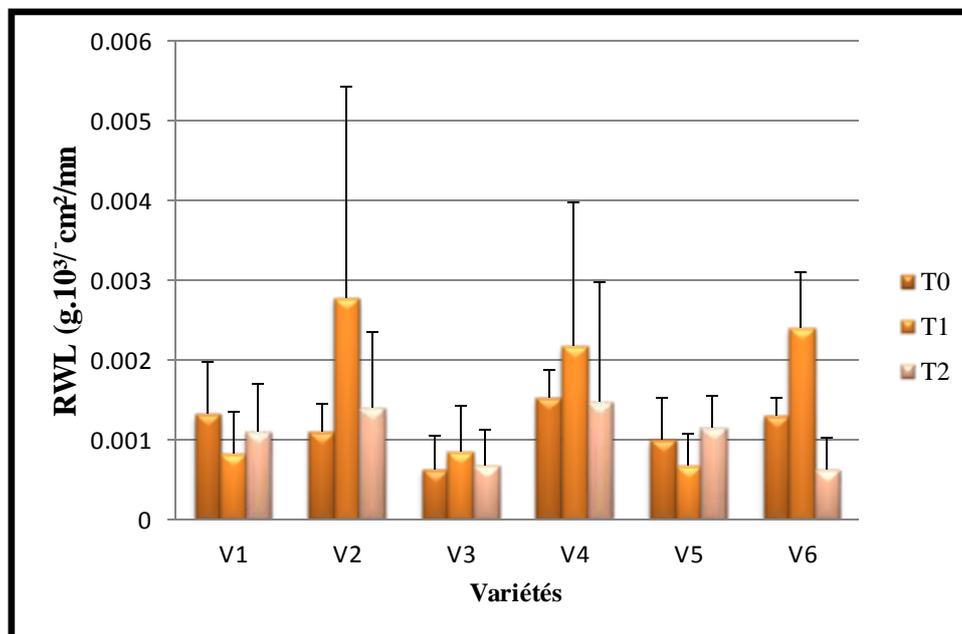


Fig 33: Variation de la teneur de déperdition d'eau sous l'effet du stress hydrique

Les résultats de l'étude statistique concernant la teneur de déperdition d'eau représentent des différences non significatif entre les variétés ( $P=0.138$ ), les traitements ( $P=0.198$ ) et même pour l'interaction variétés\*traitements ( $P=0.550$ ).

Nous avons noté au niveau de stress modéré une augmentation de la déperdition d'eau notamment pour les variétés V2, V4 et V6 puis ces dernières ont subis une diminution au stress prononcé.

Ceci nous permet d'associer implicitement ce résultat avec une certaine forme d'accommodation, ou d'ajustement morphologique.

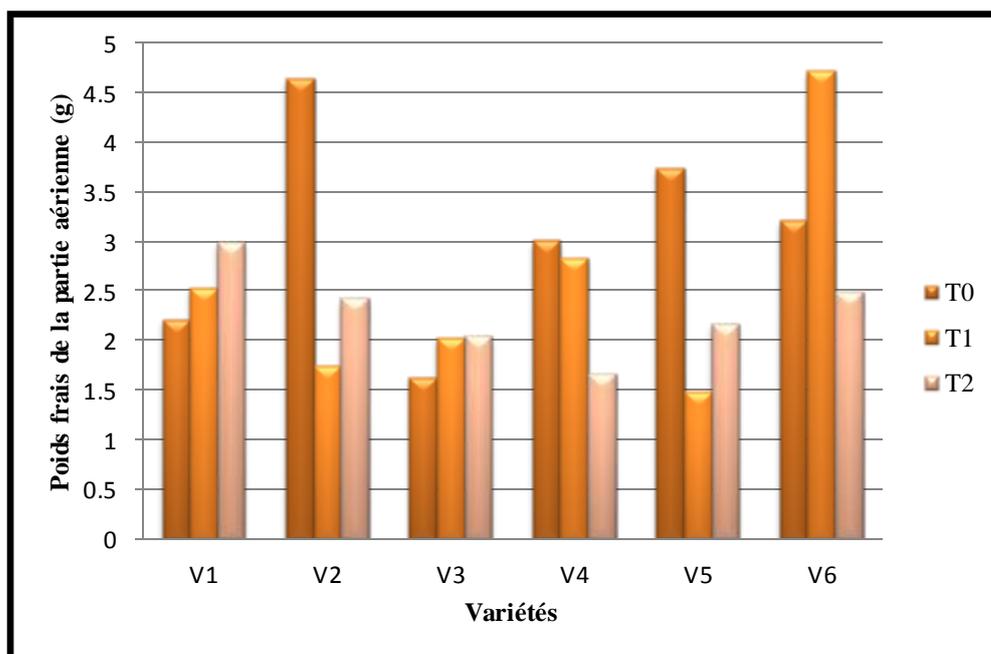
Les variétés V1, V3 et V6 qui ont un RWL plus bas que les autres, présentent une bonne adaptation vis-à-vis au stress hydrique.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a un effet de stress hydrique.

### 2.4. La biomasse

#### 2.4.1. Biomasse de la matière fraîche

En général, il ressort de la figure (34) que la biomasse de la matière fraîche de la partie aérienne est d'autant plus faible que le déficit hydrique a été plus accentué.



**Fig 34** : Biomasse du poids de la partie aérienne (matière fraîche) en fonction du stress hydrique des six variétés exprimée en gramme (g).

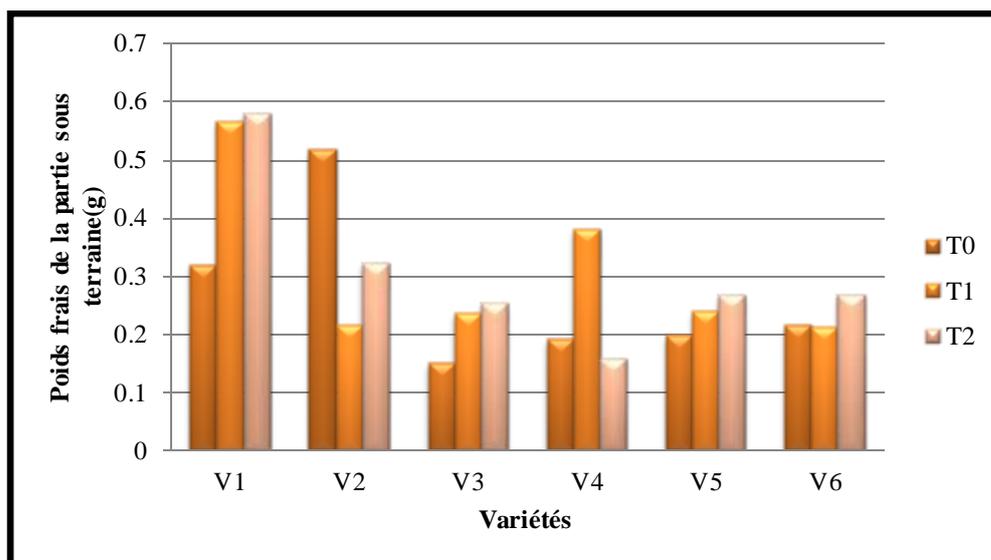
La matière fraîche est une fonction à la fois du génotype, mais aussi du stress imposé. Les réponses variétales sont le résultat d'une biomasse aérienne faible (ce qui prouve qu'il existe une forme d'accommodation morphologique).

On remarque que le poids frais de la partie aérienne des variétés V2, V4, V5 et V6 a été diminué pour les traitements T1 et T2.

Par contre on a enregistré une augmentation du poids pour la variété V1 de **3,003g** et même pour la variété V3 de **2.05g** au stress prononcé.

Cependant on peut affirmer que les variétés V<sub>1</sub> et V<sub>3</sub> résistent plus au stress hydrique.

## Interprétation des résultats

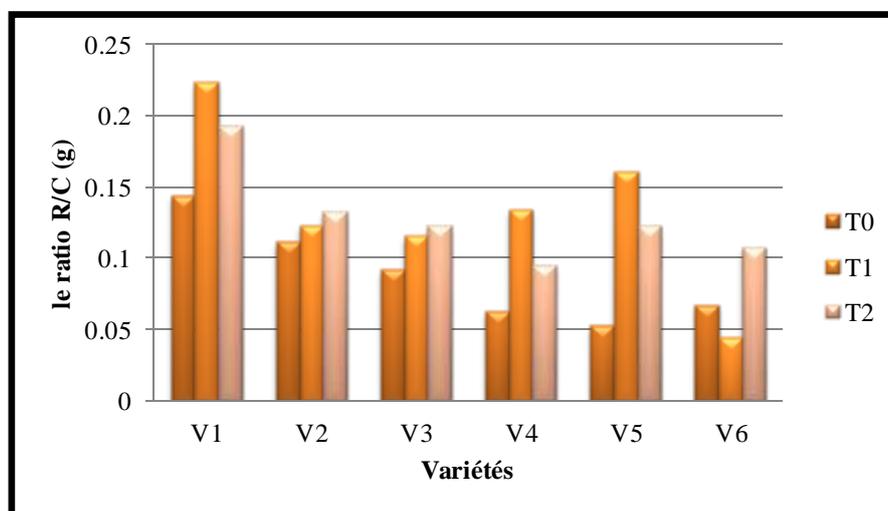


**Fig 35** : Biomasse du poids de la partie racinaire (matière fraîche) en fonction du stress hydrique des six variétés exprimée en gramme (g).

En général et comme il ressort de la figure (35) le poids de la matière fraîche de la partie racinaire est d'autant plus élevé que le déficit hydrique qui a été plus accentué ; Ceci nous amène à dire que le développement racinaire chez les plantes stressées est une des formes d'accommodations morphologique.

De même, on a constaté que les variétés V2 et V4 ont diminué du poids frais qui atteint le **0.21g** pour le stress modéré et **0.32g** pour le stress prononcé chez la variété V2. Concernant la variété V4 nous avons noté une forte diminution de **0.15g** au stress prononcé.

Dans ce cas, on peut dire que ces variétés résistent moins au stress hydrique.

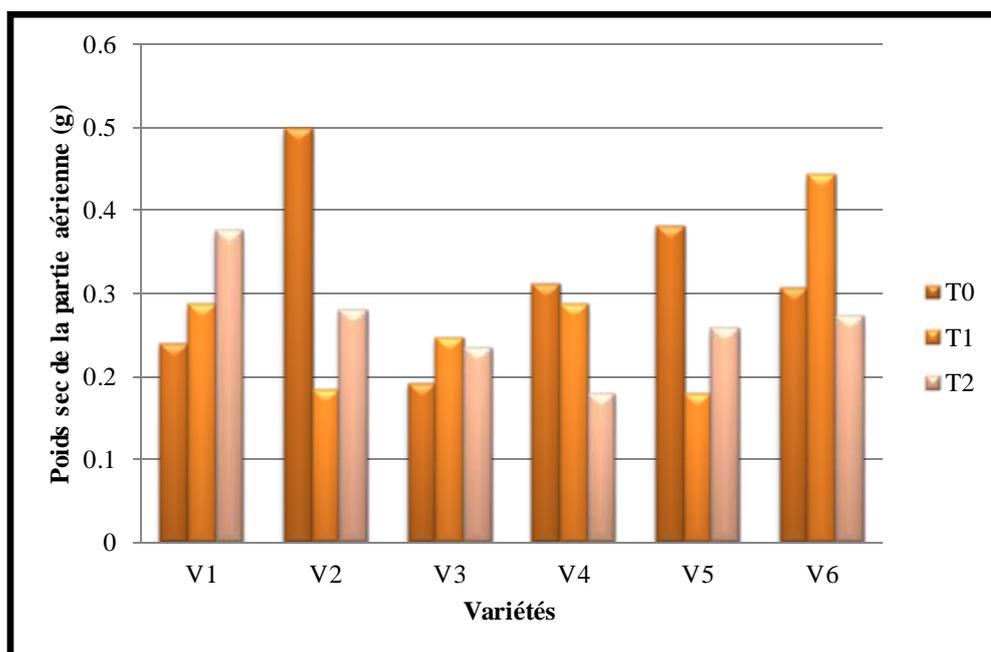


**Fig 36** : Le ratio R/C de la biomasse de la matière fraîche

## Interprétation des résultats

Concernant le rapport R/C de la biomasse de la matière fraîche on a remarqué qu'il est plus important aux traitements T1 et T2 qu'au témoin. Cela indique par la même que la croissance racinaire a été dans certains cas moins affectée que celle de la partie aérienne sous l'effet du stress hydrique.

### 2.4.2. Biomasse matière sèche



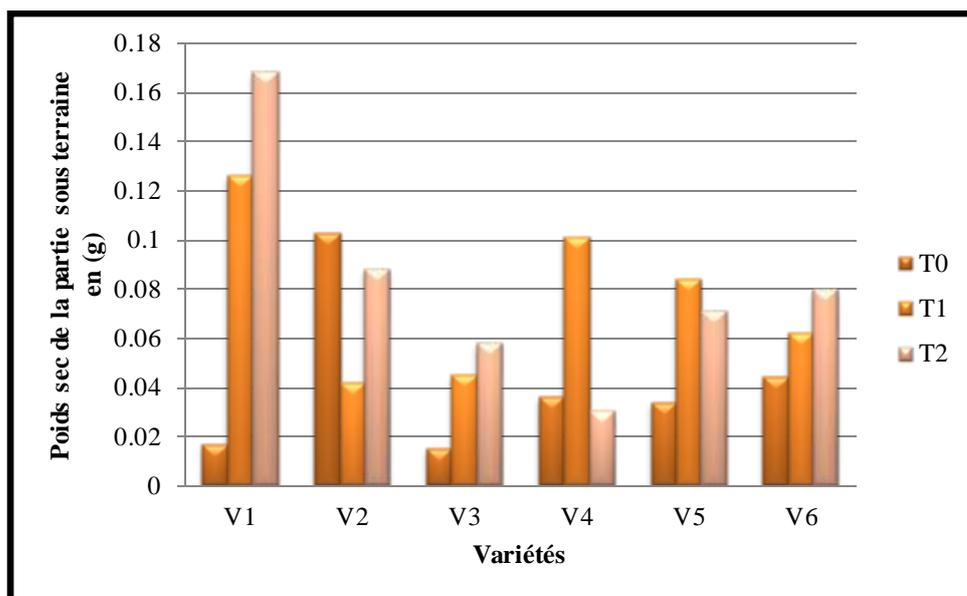
**Fig.37** : résultats de la biomasse du poids de la partie aérienne (matière sèche) en fonction du stress hydrique des six variétés (Exprimée en g).

Les résultats observés pour la matière sèche de la partie aérienne reflètent une similarité avec ceux déjà obtenus pour la biomasse de la matière fraîche de la partie aérienne.

On remarque alors une diminution dans la matière sèche après l'application de stress, ceci est enregistré chez les variétés V2 V4 V5 et V6 pour les deux traitements T1 et T2.

En même temps on a remarqué une augmentation dans le poids sec de la partie aérienne pour les variétés V1 et V3, ce qui prouve qu'elles sont des variétés tolérantes vis-à-vis aux stress hydrique

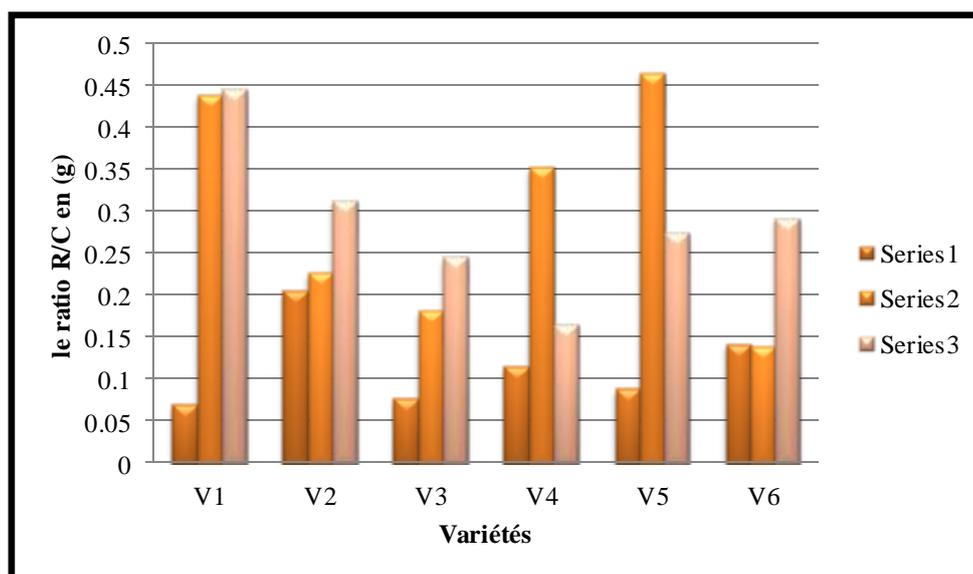
## Interprétation des résultats



**Fig.38** : résultats de la biomasse du poids de la partie sous terrain (matière sèche) en fonction du stress hydrique des six variétés exprimée en gramme (g).

Les résultats obtenus pour la matière sèche reflètent une similarité avec ceux déjà observés pour la biomasse de la matière fraîche de la partie racinaire.

Après l'application de stress hydrique, nous avons noté une augmentation de la biomasse au niveau de stress modéré et prononcé chez les variétés V1, V3, V5 et V6. De même nous avons remarqué une diminution de la biomasse chez les variétés V2 et V4.



**Fig.39** : Le ratio R/C de la biomasse de la matière sèche en (g)

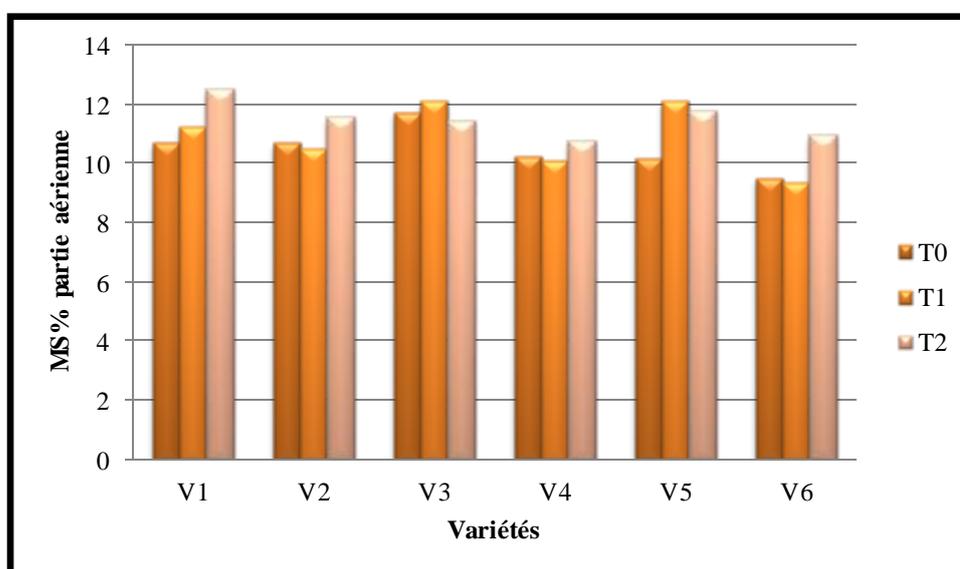
## Interprétation des résultats

Ce qui est intéressant à relever dans ce résultat c'est le comportement de la variété V1 qui a enregistré un R/C très élevé pour les stress modéré et prononcé .

En effet, on observe que plus le stress exercé est élevé, plus la biomasse est importante. Ce génotype constituerait en fait un bon modèle d'étude pour l'expression végétative sous contrainte hydrique.

### 2.4.3. Pourcentage de la matière sèche (MS%)

En condition de bonne alimentation hydrique la teneur en matière sèche est significativement importante qu'aux conditions de sécheresse.



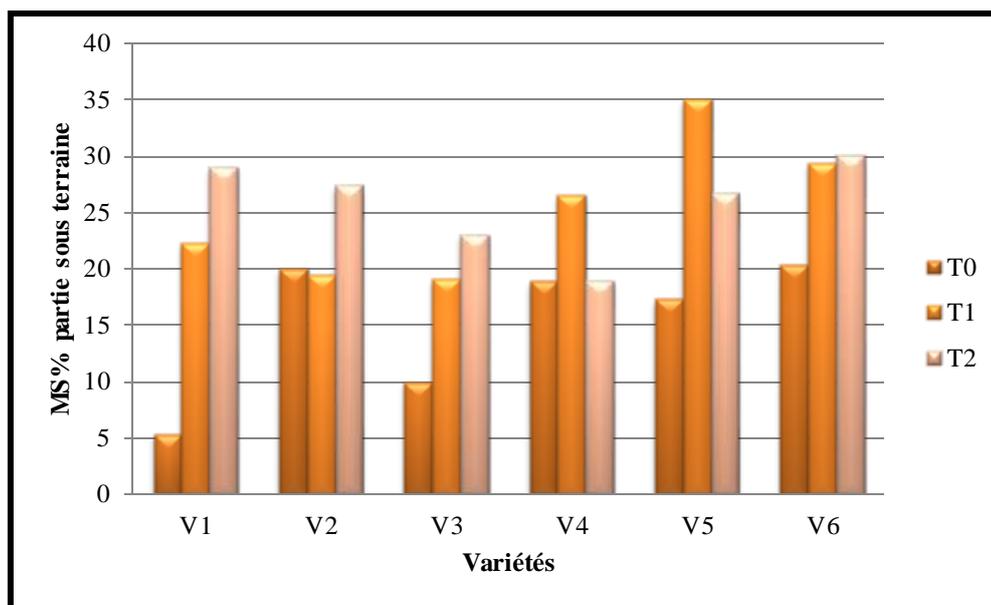
**Fig 40 :** Variation de pourcentage de la matière sèche (MS%) de la partie aérienne sous l'effet de stress hydrique

On remarque également les variétés V1 et V5 représentent une capacité d'adaptation au stress hydrique plus que les autres génotypes.

Nous avons noté une augmentation du pourcentage de la matière sèche de la partie aérienne chez ces dernières par rapport aux autres variétés, cela signifie que les variétés étudiées diffèrent dans leurs comportements vis-à-vis au contrainte hydrique.

Les réponses variétales sont le résultat d'un pourcentage de la matière sèche de la biomasse racinaire, elles sont plus élevées que le déficit hydrique qui a été plus accentué ; ce qui nous amène à dire que le développement racinaire chez les plantes stressées est une des formes d'accommodation morphologique.

## Interprétation des résultats

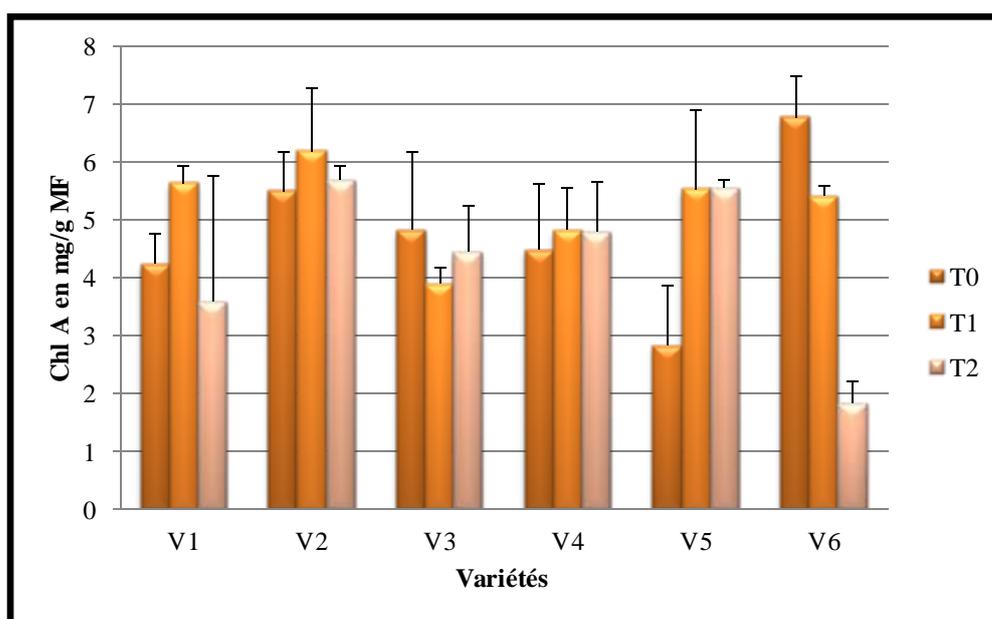


**Fig 41 :** Variation de pourcentage de la matière sèche (MS%) de la partie sous terraine sous l'effet de stress hydrique

Nous avons enregistré un pourcentage de la matière sèche très élevé chez tous les géotypes même sous contrainte hydrique. Les variétés V1, V3, V5 et V6 qui ont le pourcentage le plus élevé de matière sèche de la partie racinaire, semblent être les plus résistantes vis à vis au stress hydrique.

### 2.5. La teneur en chlorophylle

#### 2.5.1. Chlorophylle a (Chl a)



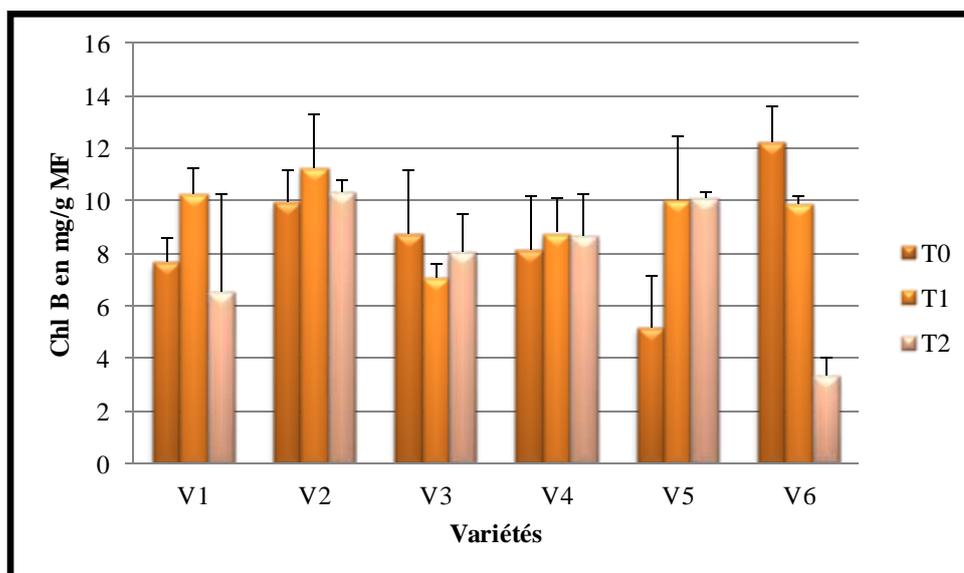
**Figure 42 :** Variation de la teneur en chlorophylle (a) sous l'effet du stress hydrique

## Interprétation des résultats

La figure (42) représente le taux de la chlorophylle (a) mesuré chez les six variétés de blé dur. Les résultats de l'étude statistique montrent qu'il existe des différences significatives entre les variétés ( $P=0.037$ ) et les traitements ( $P=0.018$ ). Pour l'interaction variétés\*traitements ( $P=0.000$ ) il signifie un effet très hautement significatif.

En effet ; le déficit hydrique augmente la teneur en chlorophylle (a) chez les variétés V2, V4 et V5. Par contre, chez les autres variétés V1, V3 et V6 le déficit hydrique fait diminuer la teneur en chlorophylle. Ceci a été vérifié par les résultats de l'analyse de la variance qui montrent une différence très hautement significatif pour l'interaction variétés\*traitements.

### 2.5.2 Chlorophylle b (Chl b)



**Fig 43 :** Variation de la teneur en chlorophylle (b) sous l'effet du stress hydrique

Les résultats concernant le taux de la chlorophylle (b) sont rapportés sur la figure (43) ; Il en ressort qu'il existe des différences significatives entre les variétés ( $P= 0.035$ ) et entre traitements ( $P=0.016$ ) et nous avons noté un effet très hautement significatif pour l'interaction variétés\*traitements ( $P=0.000$ ) chez les témoins et les stressés.

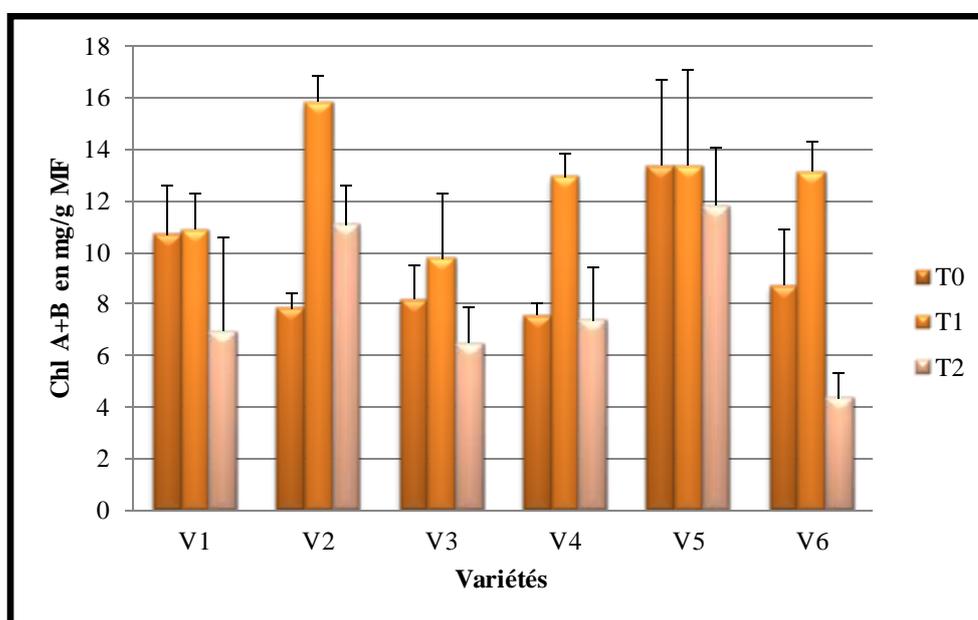
L'application des différents traitements à des concentrations ne semble provoquer qu'une forte diminution de la teneur en chlorophylle (b) beaucoup plus chez les variétés V1, V3 et V6 surtout pour le traitement T2 ce qui montre qu'elles sont des variétés non tolérantes.

## Interprétation des résultats

De même on a enregistré une augmentation de la teneur en Chl (b) chez les variétés V2, V4 et V5 ce qui affirme qu'elles sont des variétés tolérantes vis à vis au stress hydrique.

### 2.5.3. Chlorophylle a+b (Chl a+b)

Les résultats illustrés sur la figure (44) montrent que la teneur en chlorophylle (a+b) diminue au fur et à mesure avec les traitements (T1 et T2), cette diminution devient de plus en plus considérable en stressant les variétés avec des taux d'irrigation variés.



**Fig 44 :** Variation de la teneur en chlorophylle (a+b) sous l'effet du stress hydrique

En général, cette diminution est plus observée chez les variétés V1, V3 et V6 au traitement prononcé.

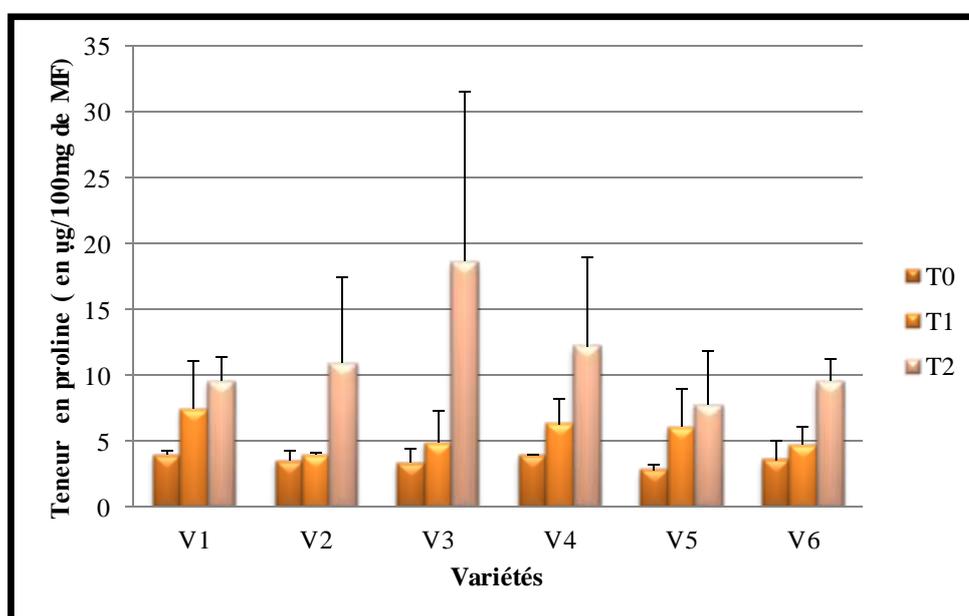
Les résultats de l'analyse de la variance qui montrent une différence très hautement significatif entre les variétés ( $P=0.000$ ) et entre les traitements ( $P=0.000$ ) et une différence hautement significatif pour l'interaction variétés\*traitements ( $P=0.021$ ).

Il est à signaler que les variétés les plus tolérantes sont celles qui ont un Chl (a+b) élevé. C'est le cas des variétés V2, V4 et V5.

### 3. Effet du stress hydrique sur les paramètres biochimiques chez les six variétés du blé dur

#### 3.1. La teneur en proline

L'osmorégulation chez les végétaux est utilisée de manière intensive dans les travaux d'adaptation aux contraintes biotiques et abiotiques. L'accumulation de proline reflète les niveaux de manifestation biochimique en vue de maintenir des performances élevées pour des caractères de productivité.



**Fig 45 :** Variation de la teneur en proline sous l'effet du stress hydrique

La proline est un bon indicateur de la tolérance au stress hydrique. Selon la figure (45) sous un stress hydrique, la teneur augmente fortement chez tous les génotypes par rapport aux témoins, donc il y a un effet d'accommodation.

En condition de bonne alimentation hydrique, on constate que les teneurs en proline restent faibles et relativement proches d'un génotype à un autre.

Dans le premier niveau du stress hydrique, on remarque que les différents génotypes testés enregistrent des teneurs en proline très proches des témoins. Les résultats suggèrent que les plantes utilisées n'ont pas encore été affectées par ce niveau de stress hydrique.

## Interprétation des résultats

L'étude statistique a montré qu'il existe une différence non significative entre les variétés ( $P=0.552$ )

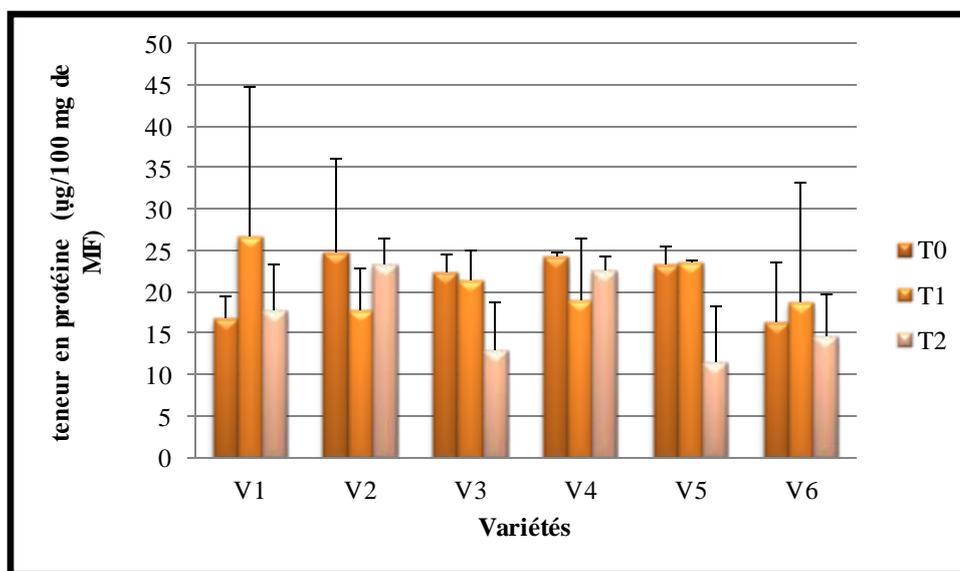
Cependant, l'étude des résultats entre les génotypes eux même pour le deuxième niveau du stress hydrique montre que l'accumulation de proline a enregistré une évolution très importante pour tous les variétés et une supériorité pour les variétés V2 V3 V4 que pour les autres.

Pour le traitement T2 ou la variété V3 mentionne la teneur maximale. Ceci a été confirmé par les résultats de l'analyse de la variance qui montrent une différence très hautement significative entre les traitements ( $P=0.000$ ).

Cette accumulation de proline indique à quel point ces variétés plus que les autres se montrent plus aptes vis-à-vis au stress hydrique.

### 3.2. La teneur en protéine

Selon les résultats obtenus nous avons remarqué que les six génotypes répondent différemment vis-à-vis au déficit hydrique.



**Fig 46 :** Variation de la teneur en protéine sous l'effet du stress hydrique

Selon les résultats de teneurs en protéines obtenus (Fig.46) on remarque qu'il existe des différences non significatives dans les réponses entre les six variétés ( $P=0.630$ ); entre traitements ( $P=0.175$ ) et même pour l'interaction variétés\*traitements ( $P=0.417$ ).

Cependant, on observe une faible accumulation de protéine chez les Variétés V1, V2 et V6 en comparaison aux autres variétés.

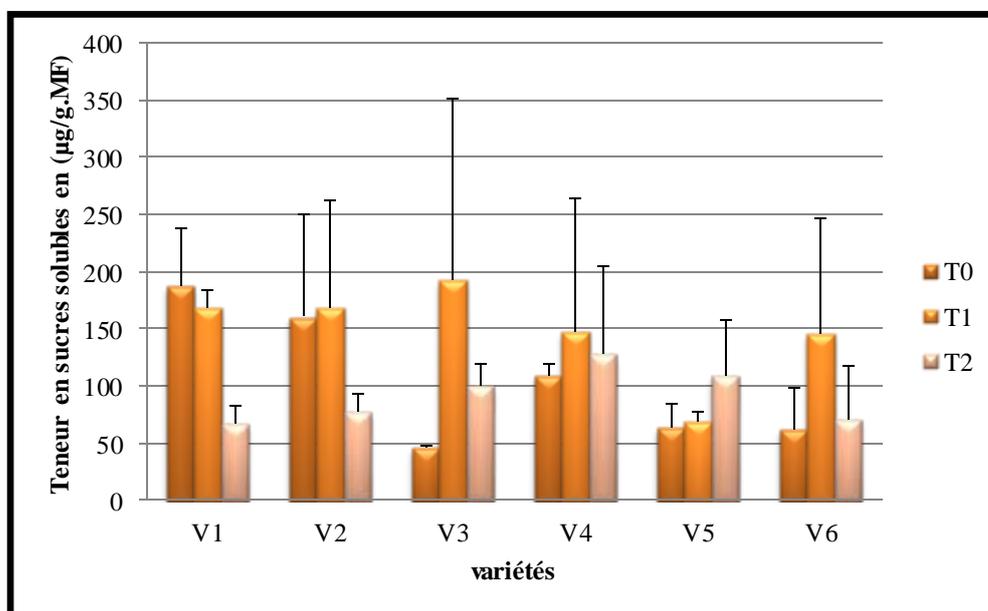
## Interprétation des résultats

Par contre on remarque une diminution de la teneur en protéine lors du traitement T2 chez les variétés V3, V4 et V5.

### 3.3. La teneur en sucres solubles

La teneur en sucres solubles (**Fig.47**) augmente corrélativement au fil du degré de stress chez la majorité des génotypes étudiés.

Les fortes accumulations des sucres solubles sont observées au témoin, par contre les plus faibles teneurs en sucres solubles sont enregistrées en conditions d'irrigation stressantes.



**Fig 47** : Variation de la teneur en sucre sous l'effet du stress hydrique

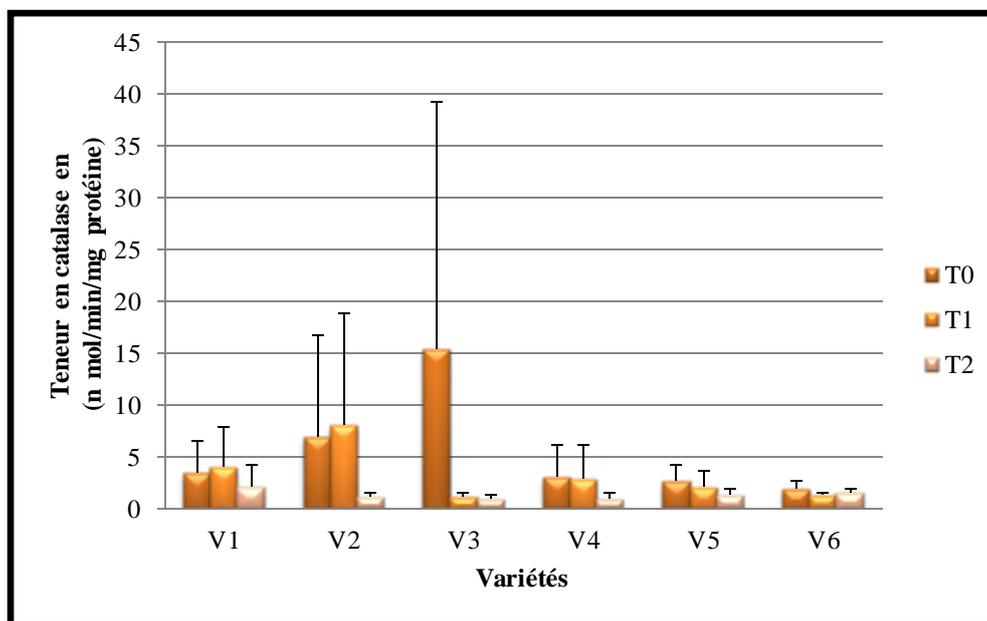
Les résultats de l'analyse de la variance montrent une différence hautement significatif dans la réponse entre les variétés (**P=0.001**) vis-à-vis aux stress appliqués.

Sous conditions de stress hydrique, on remarque que les génotypes V3, V4, V5 et V6 enregistrent une augmentation dans la teneur en sucre par rapport aux témoins.

En fait, les sucres solubles sont considérés comme étant des osmo-protecteurs, des indicateurs biochimiques de tolérance au stress hydrique.

Les variétés ayant accumulées des teneurs élevées en sucres sont supposées être celles qui résistent le mieux au stress hydrique.

### 3.4.L'activité enzymatique : Le catalase (CAT)



**Fig 48** : Variation de la teneur en catalase sous l'effet du stress hydrique

Suite aux mesures de la teneur en catalase chez les six variétés de blé dur, nous pouvons constater que sous l'effet d'un stress hydrique, les six génotypes étudiés présentent une diminution de leur teneur en catalase par rapport aux témoins.

Mais aussi on a remarqué que cette diminution n'est pas importante (**Fig.48**). Celle-ci a été aussi présentée dans les résultats de l'analyse de la variance qui montrent une différence non significative dans la réponse entre les variétés ( $P=0.677$ ), entre les traitements ( $P=0.189$ ) et aussi pour l'interaction variétés\*traitements ( $P=0.678$ ).

Cependant, l'étude des résultats entre les génotypes eux-mêmes montre que l'activité de catalase a donné une supériorité pour la V1, V3 et V4 que les 3 autres pour les deux traitements.

### Discussion générale

La sécheresse représente tout manque d'eau qui ne permet pas à la plante cultivée d'exprimer le rendement qu'elle pourrait donner en situation favorable. Une variété tolérante à la sécheresse est, dans ce cas, celle qui produit de manière satisfaisante en présence de la contrainte (**Tardieu, 2004**). L'effet le plus commun des stress abiotiques sur la physiologie des plantes est ainsi la réduction de la croissance (**Zhu, 2001; Munns, 2002**).

En premier temps, les résultats du poids de 1000 grains donnent une supériorité à la variété Gemgoum Rkhem (V5) puis les variétés Hedba-3 (V4) et Beliouni(V6). Selon **Chastain et al. ; (1995)**, les variétés à fort **PMG** sont composées en général de semences grosses, ces dernières qui ont forcément de gros albumens et par conséquent un embryon gros et robuste ; pouvant engendrer une plantule normale. Car la différence résiderait dans leur vigueur et leur capacité d'utilisation de leurs ressources qui sont dans la graine et dans ce cas, les grosses graines partent avec un léger avantage. Le test de germination révèle que les génotypes Hedba-3 (V4) et Durbel (V3) ont toujours le pouvoir de germination le plus élevé. De même la cinétique de croissance a été très importante pour les variétés Hedba-3(V4) et Beliouni (V6). On peut donc constater qu'il y a une relation entre la grosseur des graines et les tests de germinations.

Un deuxième volet, celui de l'exploration topographique au Tétrazolium, où il s'agissait de vérifier à la fois la viabilité mais aussi et surtout la vigueur des semences; les variétés Waha (V1), Araldur (V2) et Durbel (V3) présentent une très grande viabilité et également une forte vigueur.

Selon **Hacini et Brinis (2012)**, la viabilité des semences a été expliquée selon la coloration qui a été présentée au niveau des parties embryonnaires des graines. Plus que les variétés répondent de manière négative au Tétrazolium, plus que ces variétés peuvent être donc considérées comme des variétés à faible pouvoir germinatif et n'ayant surtout aucune vigueur.

Dans notre travail, il a été montré que le stress hydrique entraîne une diminution significative de la surface foliaire des six variétés de blé dur. Cette diminution a été observée pour toute les variétés et beaucoup plus pour les variétés Hedba-3 (V4) et Beliouni (V6).

## Discussion générale

Ces résultats se confirment par les travaux de **Lebon et al. (2004)** qui ont montré que la surface foliaire est un déterminisme important de la transpiration. Une des premières réactions des plantes au déficit hydrique est de réduire la surface foliaire. Le développement végétatif sous conditions limitantes d'alimentation hydrique est fortement perturbé (**Ferryra et al., 2004**)

Il a été noté principalement une diminution importante de la taille et de la surface foliaire. Cette diminution est une des réponses des plantes à la déshydratation ; elle contribue à la conservation des ressources en eau, ce qui permet la survie de celles-ci selon **Lebon et al.(2004)**.

Au niveau du statu hydrique la teneur en eau des feuilles de blé dur diminue proportionnellement avec la réduction d'eau contenue dans le sol (**Bajji et al., 2001**).

Les résultats du test de la turgescence cellulaire (RWC) révèlent que la diminution de quantité d'eau d'irrigation influe directement sur la teneur relative en eau. Cette diminution a été observée chez les six variétés et beaucoup plus la variété Araldur(V2) et Gemgoum Rkhem(V5).

Ces résultats sont justifiés par **Scofield et al. (1988)** qui notent que cette diminution de la RWC est plus rapide chez les variétés sensibles que chez les variétés résistantes. D'autre part, **Nouri (2002)** montre que les génotypes qui maintiennent une RWC élevée en présence de stress hydrique sont des génotypes tolérants.

De même nous avons notamment enregistré un pourcentage très élevé en RWC chez les variétés Durbel(V3) et Beliouni(V6) ce qui prouve que ces variétés sont les plus tolérantes au stress hydrique. Plusieurs chercheurs ont montré que les feuilles qui proviennent de plantes stressées perdent plus d'eau que les plantes non stressées (**Clark et Mac-Caig, 1982**).

Par contre nos résultats indiquent que les plantes stressées perdent une quantité d'eau moindre que chez les plantes non stressées, présentés par les variétés Waha (V1), Durbel (V3) et Beliouni(V6). Ce sont justement ces mêmes variétés qui ont réduit leurs surfaces foliaires face au stress hydrique.

**Kirkham et al.(1980)** relie directement la perte d'eau à la surface foliaire, plus la surface est large, plus le taux de déperdition augmente, comme dans le cas de notre étude. Certaines variétés ont la particularité de l'enroulement des feuilles lors d'un déficit hydrique. Cet enroulement lui permet la diminution des pertes d'eau par transpiration cuticulaire (**Zeghida et al., 2004**).

## Discussion générale

En conditions de stress hydrique, les poids des deux parties aérienne et racinaire des plantes ont été diminués à cause de la diminution de la croissance des plantes. Dans notre résultats cette diminution a été observée chez les deux variétés Waha (V1) et Belioni (V6). Par contre, on a déterminée une forte adaptation pour la variété Araldur (V2), Durbel (V3) et Guemgoum Rkhem (V5).

Les résultats de la biomasse, montrent généralement que le stress hydrique a un effet négatif sur la biomasse totale des plantes de blé dur. Ils sont en accord avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs. En outre, beaucoup d'auteurs avancent que cette diminution serait attribuée à une forme particulière d'adaptation morphologique (**Baldy, 1986**).

Les teneurs en chlorophylles a, b et a+b sont sensiblement inférieures chez les six variétés pour le traitement avec déficit hydrique par rapport au traitement sans déficit hydrique.

Cette diminution comparative peut s'expliquée par les conditions environnementales défavorables où il y a une réduction de la surface foliaire qui diminue l'activité photosynthétique. Ce résultat confirme des travaux antérieurs sur le blé dur ; (**Ermez et Lannoye ; 1991**) qui montrent que la diminution des teneurs en chlorophylles (a) et (b) pour les feuilles des plantes de blé sous l'effet du déficit hydrique.

Les variétés Araldur (V2) ; Hedba-3 (V4) et Guemgoum Rkhem (V5) représentent des fortes accumulations en pigments chlorophylliens par rapport aux autres variétés au niveau du stress hydrique. Cette différence observée entre les génotypes pour la teneur en chlorophylle est liée à la tolérance à la sécheresse selon **Mékliche et al.(2003)**.

Le dosage de la proline a montré que le stress hydrique a entraîné l'accumulation de cette molécule chez les six variétés de blé dur étudiées. C'est-à-dire les six variétés ont une réponse adaptative semblable par le mécanisme d'accumulation de la proline libre. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs, en effet **Monneveux et Nemmar (1987)** montrent une accumulation très importante de proline chez le *T.durum* par l'effet de stress hydrique.

## Discussion générale

Les sucres solubles sont des indicateurs des degrés de stress, à cause de son importante augmentation lors de la sévérité. Les sucres métaboliques (glucose, galactose, saccharose, et fructose) permettent la résistance aux différents stress (**Zerrad et al., 2006**).

Selon nos résultats, le dosage des sucres solubles chez les six variétés de blé dur montre que sous l'effet d'un stress hydrique, les six génotypes étudiés présentent une augmentation de leur teneur en sucres, par rapport aux témoins. L'étude et l'analyse des résultats révèlent que les six variétés de blé dur ont une réaction similaire dans leur réponse à accumuler des sucres solubles à cause du stress hydrique.

Ceci est en accord avec de nombreux travaux qui rapportent que l'accumulation des sucres solubles est un moyen adapté par les plantes en cas de stress, afin de résister aux contraintes du milieu (**Loretti et al., 2001**).

En effet, les protéines de stress jouent un rôle dans l'adaptation de la plante et de ce fait de nombreux chercheurs abordent la résistance au stress par l'isolement et l'étude de ces molécules (**Campalans et al., 1999**).

Selon les résultats obtenus on remarque que les valeurs de teneurs en protéines chez les six variétés étudiées pour les trois traitements avec et sans stress hydrique sont sensiblement très faibles. L'évolution des teneurs en protéines, extraites à partir des feuilles des six variétés de blé dur a montré qu'il y a une augmentation très légère chez génotypes Waha (V1), Araldur (V2) et Beliouni(V6) pour le traitement avec déficit hydrique par rapport au traitement sans déficit hydrique. Ceci a été mentionné par certains auteurs. (**Rai et al., 1983**) qui ont décrit que le stress hydrique peut provoquer une baisse ou une hausse des protéines totales.

Les éléments du système antioxydant et particulièrement la catalase, sont connus par leur implication contre le stress oxydatif (**Khosravinejad et al., 2008**). En outre, la catalase constitue une enzyme majeure dans la détoxification du peroxyde d'hydrogène.

Cependant nos résultats montrent une augmentation plus forte de l'activité de CAT chez les variétés Waha (V1), Durbel (V3) et Guemgoum Rkhem (V5) par rapport aux autres variétés. Les mêmes résultats ont été signalés par plusieurs auteurs.

## Discussion générale

Selon **Noctor et Foyer (1998)**, les catalases ont une affinité assez faible avec le  $H_2O_2$  et seraient donc moins efficaces que les APX. Ce résultat indique que la catalase est une enzyme majeure dans la détoxification des peroxydes d'hydrogène

Enfin, on peut retenir que les variétés Waha (V1), Hedba-3 (V4) et Belioni (V6) manifestent un mode d'adaptation sous l'effet du stress hydrique. Les résultats obtenus nous permettent d'inscrire certains de ces traits dans un programme d'amélioration génétique des plantes comme étant des paramètres de sélection vis à vis d'un déficit hydrique.

### Conclusion

Cette étude comparative qui avait pour but de mettre en évidence l'influence du stress hydrique sur quelques paramètres physiologiques et biochimiques chez six variétés de blé dur (Waha, Araldur, Hedba-3, Durbel, Guemgoum Rkhem et beliouni) a montré que la réponse à ce type de stress abiotique diffère d'une variété à l'autre et dépend de la dose d'irrigation et même de leurs origines.

Au terme de ce travail, et à la lumière des résultats obtenus, et ce grâce aux divers tests et analyses en cours, un certain nombre de points ont pu être précisés.

D'une manière générale, tous tests confondus, il existe une diversité génétique qui se traduit dans la nature même des résultats.

En effet, les génotypes étudiés ne répondent pas de façon similaire.

Un premier test physique effectué a concerné le PMG (Poids de mille grains) et place la variété Guemgoum Rkhem (V5) en première position. (PMG le plus élevé).

Le test de germination met en valeur la supériorité des génotypes Hedba-03 (V4) et Durbel (V3). Cette toute première réponse confirme l'hypothèse que l'aptitude à la germination dépend de la valeur génotypique ; d'autant que Hedba-03 (V4) est une variété locale ; autochtone (Algérienne).

Concernant la cinétique de croissance, Hedba-03 (V4) et Beliouni (V6) ont eu des réponses supérieures aux autres variétés ; ce qui encore une fois, prouve que les variétés locales sont plus privilégiées.

Quant au test de Tétrazolium, où il s'agissait de vérifier à la fois la viabilité mais aussi et surtout la vigueur des semences ; il a été procédé à un classement selon le seuil de vigueur (vigoureuse, moyennement vigoureuse, faiblement vigoureuse). Nos résultats mettent en évidence, que les Variétés Waha (V1), Araldur (V2) et Durbel (V3) sont les plus vigoureuses.

La discussion des paramètres physiologiques nous a permis d'aboutir un ensemble de résultats qui, met en exergue l'action des trois traitements sur les jeunes plantules germées des six génotypes. Les altérations causées, se sont présentées sous forme de perturbations affectant la croissance des différentes parties de la plante (aérienne et racinaire).

## Conclusion

Par analyse comparative des paramètres physiologiques, le test de surface foliaire donne une préférence à la variété Hedba-03(V4) et Beliouni (V6).

Selon le test de la turgescence cellulaire (RWC) et de la perte graduelle en eau (RWL), la variété Waha (V1), Hedba-03(V4) et Beliouni (V6) s'illustrent comme étant les plus efficaces quant aux équilibres hydriques.

La biomasse totale est encore plus élevée chez les variétés Waha (V1), Durbel (V3) et Beliouni (V6).

La teneur en pigments chlorophylliens donne une préférence aux variétés Araldur (V2) et Hedba-3 (V4). Concernant l'accumulation d'un osmoticum, la proline en l'occurrence, les variétés Araldur (V2) Durbel (V3) et Hedba-03 (V4) ont été celles qui, en conditions de stress hydrique, ont le plus accumulé de cet acide aminé.

L'analyse des paramètres biochimiques a montré une faible accumulation de protéine chez les variétés Waha (V1), Araldur (V2) et Beliouni (V6), ce qui signifie que ces variétés sont les plus tolérantes au stress par rapport aux autres qui ont marqué une forte diminution en protéines vis-à-vis du stress hydrique.

De même les teneurs des sucres solubles augmentent beaucoup plus chez les variétés Durbel (V3), Hedba-03 (V4), Guemguoum Rkhem (V5) et Beliouni (V6). L'analyse de l'activité enzymatique indique que le manque d'eau dans le milieu de culture des plantes, provoque une forte activation de catalase chez les variétés Waha (V1), Durbel (V3) et Hedba-03 (V4).

Enfin, l'étude a montré que les six génotypes étudiés ont utilisé les mêmes stratégies de la réponse au stress hydrique mais avec des fréquences différentes selon la capacité d'adaptation de chacune.

Il est à conclure que les génotypes Waha (V1), Hedba-03 (V4) et Beliouni (V6) manifestent des voies d'accommodations physiologiques et biochimiques transitoires. Ceci est à mettre sur le compte de l'origine autochtone de ces variétés.

A l'origine, l'interaction Génotype-milieu est d'une grande importance. Aussi, nous retiendrons que nombreuses et diverses sont les voies d'adaptation au stress hydrique.

## Conclusion

Celles-ci peuvent être de simples réponses physiologiques, comme elles peuvent aussi être des réponses biochimiques.

Ces résultats enfin, constituent un pas supplémentaire dans la compréhension des mécanismes complexe d'adaptation. Ils offrent aussi la possibilité d'inclure ces paramètres dans un programme de sélection du blé dur.

### A

- **Abbassenne F., Bouzerzour H. et Hachemi L., 1998.** Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum Desf.*) en zone semi-aride. Ann. Agron. INA., (18):24 – 36pp.
- **Alhachemi Mohammed., 2014.** Effet de la fertilisation phosphatée Sur quelques paramètres biométriques Et biochimique du blé. Agronomie Saharienne. Université KasdiMerbah – Ouargla, 5p.
- **Amokrane A., Bouzerzour H., Benmahammed A. et Djekoun A., 2002.** Caractérisation des variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. Sciences et Technologie. Univ. Mentouri. Constantine., spécial D:33 -38pp.
- **Anonyme., 1981.** Larousse agricole, publié sous la direction de Jean Michel Clément. 1207 pages. In Hennouni Nacera, 2012. Evaluation du métabolisme respiratoire et enzymatique des racines de blé dur (*Triticum durum Desf*) issues de plantes infectées par les maladies cryptogamiques et de plantes traitées avec un fongicide (ARTEA EC 330). Université Badji Mokhtar, Annaba, 6p.
- **Anonyme., 2002.** Conseil international des céréales. International Grains Council. World Grains Statistics: 13-17pp.
- **Araus J.L., G.A. Slafer., M.P. Reynolds et C. Royo., 2002.** Plant breeding and water relations in C3 cereals: what should we breed for? Annals of Botany, 89: 925-940p

### B

## Références bibliographiques

- **Bada., 2007.** Variabilité génotypique du blé dur (*Triticum durum Desf*) vis-à-vis de la nuisibilité directe du brome (*Bromus rubens L*) en conditions semi aride. Mémoire de magister.
- **Bagga A.K., Ruwal K.N. et Asana R.D., 1970.** Comparison of some Indian and semi-dwarf Mexican wheat to unirrigated cultivation. IndianJ. agric. Sci. 40:421-427pp.
- **Bahlouli F., Bouzerzour H., Benmahammed A. et Hassous K.L., 2005.** Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum Desf.*) cultivars under semi arid conditions. Pakistan Jour. of Agronomy, (4) : 360 – 365pp.
- **Bajji M., 1999.** Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur : caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variant soma clonaux sélectionnés In vitro. Thèse de doctorat. Univ. Louvain.
- **Bajji M., Lutts S. et Kinet J.M., 2001.** Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum Desf.*) cultivars performing differently in arid conditions. Plant Sci., 160: 669 -681pp.
- **Baldy C., 1986.** Comportement des blés dans les climats méditerranéens Ecologie méditerrané. Tome XII, (3 - 4) :73 – 88pp.
- **Bansal Kc, Sinha Sk.;** 1991. Assesment of draught resistance in 20 accessions of *triticum aestivum* and related species .I. Total dry matter and grain yield stability - euphytica 56 : 7- 14.
- **BarrsH., 1968.** Determination of water deficit in plant tissues. In: Water Deficit and Plant Growth. Koslowski T. Academy Press. New York. 235-368 pp.
- **Belhassen E., This D., Monneveux Ph., 1995.** L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. Synthèse. Cahier Agriculture, (4): 251 – 261pp.

## Références bibliographiques

- **Bellinger Y., Bensaoud A. et Larher F., 1991.** Physiological significance of proline (France). Les colloques .55. (éd). Inra. Paris.
- **Benbelkacem A. et Kellou K., 2001.** Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum L. var. durum*) cultivées en Algérie. Options méditerranéennes, (6): 105 – 110pp.
- **Benlaribi M., Monneveux P. 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): 305p.
- **Bensari M., Calme S.J. et Viala G., 1990.** Répartition du carbone fixé par photosynthèse entre l'amidon et le saccharose dans la feuille de soja : influence d'un déficit hydrique : Plant physiol. Biochimie., 28: 113-124pp.
- **Benseddik B. et Khelloufi B., 2000.** Impact du risqué climatique sur le rendement du blé dur (*Triticum durum Desf.*) en zone semi-aride : approche éco- physiologique. Science et changements planétaires / Sécheresse, 11(1):45 – 51pp.
- **Bergareche C., Llusia J., Febrero A., Bort J. et Araus J.L., 1993.** Effect of water stress on proline and nitrate content of barley relationships with osmotical potential, carbon isotope ratio and grain yield. Colloque Diversité génétique et amélioration variétale. Montpellier (France). Les colloques.64. (éd). Inra. Paris.
- **Blomstedt C.K., Gianello R.D., Gaff D.F., Hamill J.D. et Neale A. D., 1998.** Differential gene expression in desiccation-tolerant and desiccation-sensitive tissue of the resurrection grass, *Sporobolus stapfianus*. Australian J. Plant Physiol., 25:937-946pp.
- **Blum A., 1996.** Crop responses to drought and the interpretation of adaptation plant growth regulation, 20: 135 – 148pp.

## Références bibliographiques

- **Bootsma A., Boisvert J.B., Dejong R. et Baier W., 1996.** La sécheresse et l'agriculture canadienne. Sécheresse. 277 - 285 pp.
- **Boyeldieu., 19880.** Les cultures céréalières. Nouvelles Encyclopédie des Connaissances Agrocoles. Ed. Hachette 255P
- **Boyer J.S., 1982.** Plant productivity and environment. Sci, New séries, 218:443-448pp.
- **Bozzini A., 1988.** Origin, distribution and production of durum wheat in the world.
- **Braam J., Sistrunk M., Polisensky D.H., Xu W., Purugganan M.M., Antosiewicz D.M., Campbell P. et Johnson K.A., 1997.** Plant responses to environmental stress: regulation and functions of the Arabidopsis TCH genes. Planta, 203: 35 – 41pp.
- **Bradford M., 1976.** A Rapid and Sensitive Method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principal of protein-Dye Binding. Analytical Biochem ,72: 248-254pp.
- **Brancourt - Hulmel B., Doussinault G., Lecomte C., Berard P., LE Buance B. et Trottet M., 2003.** Genetic improvement in agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. Crop Sci., (43):37 – 45pp.
- **Brisson N. et Delecolle R., 1992.** Utilisation des modèles mécanistes de la culture comme outils de raisonnement de la composante génétique de la résistance à la sécheresse. in : Monneveux P., Ben Salem M. Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Colloque Diversité génétique et amélioration variétale. Les colloques.64. (éd). Inra. Paris.

C

## Références bibliographiques

- **Campalans A., Messeguer R., Goday A. et Pagès M., 1999.** Plant responses to drought, from ABA signal transduction events to the action of the induced proteins. *Plant Physiol. Biochem* ,37. 5: 327 –340pp.
- **Cauderon, 1979 :** Etude des relations phylogénétiques chez le blé ; cytogénétique et biochimique. Journées d'études : biochimie, génétique du blé INRA, Paris pp 30-33.
- **Chaker Amina., 2003.** Etude de l'effet des stress thermiques (chaleur et froid) sur quelques paramètres physiologiques et biochimiques du blé du (*Triticum durum* .Desf) mémoire de Magistère en Biologie Végétale - Université Badji Mokhtar Annaba, p77 .
- **Chaib G., 1998.** Teneur en proline chez les différents organes de blé dur (*Triticum durum* Desf) : Essai d'explication des conditions d'accumulation sous manque d'eau. Thèse de magister. Univ. Constantine.
- **Chastain L.G., Ward K. J. and Wysocki D. J., 1995.** Seedbed residue and seed size relationships in winter barley. *Agronomy journal*; 87 (3) , 517-520
- **Chennafi H., AidaouiA., Bouzerzour H. et 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 – 860pp.
- **CIC., 2000.** Rapport annuel du Conseil International des Céréales "CIC" pour l'année 2000.
- **Clarcket Mac-Caig., 1982.** Excised leaf water relation capability as an indicator of drought resistance of *Triticum* genotypes. *Can.J . Plant Sci.*, 62: 571-576pp.
- **Clark J.M., Norvell W.A., Clark F.R. et Buckley T.W., 2002.** Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum line.
- **Clement Grancourt et Prats., 1971.** Les céréales. Ed.J.B. Bailliers et Fils, 360p.

## Références bibliographiques

- **Clement-Grandcourt et Prats., 1970.** Les céréales. Collection d'enseignement agricole. 2ème Ed. 351-360pp.
- **Condon A.G., R.A. Richards G.J., Rebetzke., 2004.** Breeding for high water-use efficiency. Journal of Experimental Botany ,55: 2447-2460pp.
- **Crowe J.H., Hoekstra F.A. et Crowe L.M., 1992.** Anhydrobiosis. Physiol., 54 :579-599pp.
- **Cushman J.C. et Bohnert H., 2000.** Genomic approaches to plant stress tolerance. Cur Opin.Plant Biol ,3: 117 – 124pp.



- **Daday Hf, Biner E, Gressia A, and peak Jw – 1973:** The effect of environment on heritability and predicted selection response in *Médicago sativa* – Heredity 231- 293.
- **Day W., legg B.J., French B.K., Lohnston A.E., Lawlor D.W. et Jeffers W.DE.C., 1978.** A drought experiment using mobile shelters: The effect of drought on barley yield. J. Agric. Sci. Camb.,(91): 599 – 623pp.
- **Debaeke P., Cabelguenne M., Casals M.L. et Fuech J., 1996.** Élaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : Epie phase-BI. Elsevier, INRA, Agronomie : Agronomie and Environnement,(16) : 25 – 46pp.
- **Decoin S., 1999.** Evolution des produits de protection depuis deux ans : Nouvelles familles, promesses tenues Phytomadéf. Vég. 1999, 521p, 28-33pp.

## Références bibliographiques

- **Deepika M. et Anil G. ,1999.** Transcript levels of genes encoding various glycolytic and fermentation enzymes change in response to abiotic stresses. *Plant Sci.*, 146: 41 – 51pp.
- **Déjardin A., Sokolov L.N. et Kleczkowski L.A., 1999.** Sugar/osmoticum levels modulate differential abscisic acid-independent expression of two stress-responsive sucrose synthesis genes in *Arabidopsis*. *Biochem J.*, 344: 503 -509pp.
- **Dixon R. et Paiva N. L., 1995.** Stress - induced phenyl propanoid metabolism. *The plant cell.*, 7: 1085 – 1097pp.
- **Djekoun A. etYkhlef N., 1996.** Déficit hydrique, effets stomatiques et non-stomatiques et activité photosynthétique chez quelques génotypes de blé Tétraploides.3ème Réunion du réseau SEWANA, de blé dur IAV HASSAN II (Maroc).
- **Dubos C., 2001.** Réponse moléculaire de jeunes plants de pin maritime soumis à un stress hydrique en milieu hydroponique. Thèse de doctorat. Univ. Henri Poincaré, Nancy-I.France.
- **Dupont., 1982.** Hemicellulosic polymers from cell walls of beeswing wheat bran: Part I, polymers solubilised by alkali at 2 °. *Carbohydr. Research* 163: 99pp.

ε

- **El hassani T.A. et Persoons E., 1994.** Agronomie moderne. Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. (éd). AUPELF-UREF, 544 p.
- **El Mourid M., Karrou M. et El Gharous M., 1996.** La recherche en arido-culture respectueuse de l'environnement. *Al Awamia*, 92 : 69 – 81pp.

## Références bibliographiques

- **Eliard, J – L., 1979.** Manuel d'agriculture générale. Bases de la production végétale. ED. J.B.B. cillière.344p.
- **Ermez M. et Lannoye R., 1991.** Quantification of physiological disorders in stressed plants, 414 – 433pp. in: Acevedo, E., Conesa, A.P., Monneveux, P. et Srivastava, J.P. édit. Physiology - Breeding of Winter Cereals for Stressed Mediterranean Environments. Montpellier, France, 3 - 6 Jui. colloques, (55).

### F

- **FAO STAT., 2005.** Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations.
- **FAO STAT., 2007.** Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations.
- **Feillet P., 2000.** Le grain de blé : composition et utilisation. INRA. Paris.
- **Ferryra R., Sellés G., Ruiz R.S. et Sellés I.M., 2004.** Effect of water stress induced at different growth stages on grapevine cv. Chardonnay on production and wine quality. Acta Hort., 664: 233- 236pp.

### G

- **Garnier L., 2004.** Petit atlas des plantes cultivées. Ed : petit encyclopédie. Larousse pp 24-29.

## Références bibliographiques

- **Geigenberger P., Reimholz R., Geiger M., Merlo L., Canale V. et Stitt M ., 1997.** Resolution of sucrose and starch metabolism in potato tubers in response to short-term water deficit. *Planta*. 201: 502 -518 p.
- **Guan L.M. et Scandalios J.G., 2000a.** Hydrogen peroxide-mediated catalase gene expression in response to wounding. *Free Radic. Biol. Med.* 28, 1182-1190 pp.
- **Guan L.M. et Scandalios J.G., 2000b.** Catalase transcript accumulation in response to dehydration and osmotic stress in leaves of maize viviparous mutants. *Redox. Rep.* 5, 377-383pp.

*H*

- **Hacini N. et Brinis L., 2012.** Utilisation de quelques marqueurs physiologiques et biochimiques dans l'expression de tolérance au stress hydrique chez 10 géotypes de blé dur (*Triticum durum Desf.*). *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 25: 6- 16pp.
- **Hadjichistodoulou A., 1985.** Stability performance of cereals in low rainfall areas as related to adaptive traits. in : drought tolerance in winter cereals. Srivastava J.P., Porceddu E., Acevodo E., Varma S.(éd). John Wiley and sons.UK., 191 -200 pp.
- **Hafsi M., 2001.** Adaptation du blé dur dans les conditions des hautes plaines sétifiennes – Thèse de Doctorat – Univ. Ferhat abbes Setif.
- **Hamel Lylia., 2010.** Appréciation de la variabilité génétique des blés durs et des blés apparentés par les marqueurs biochimiques. *Biologie végétale et d'écologie*. Université Mentouri Constantine, 15p.
- **Hare P.D. et Cress W.A., 1997.** Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant cell and environment*, 21: 535 – 553pp.

## Références bibliographiques

- **Hariri., 1999.** Mosaïques sur blé: mise en évidence d'un nouveau virus. Phytoma - La Défense des Végétaux, no. 519p, 21-22pp.
- **Henry Y. et B uyser. J., 2000.** L'origine du blé. Pour la Science, Hors série.26 :60-62pp.

## J

- **Jones H.G., Flowers T.J. et Jones M.B., 1989.** Plants Under Stress. Univ. Cambridge.

## K

- **Cakmak I., Horst JH, 1991.** Effects of aluminum on lipidperoxidation, superoxidedismutase, catalase, and peroxidaseactivities in roottips of soybean (*Glycine max*).*PhysiologiaPlantarum*, 83, 463-468 p.
- **Khosravinejad F., Heydari R. et Farboodnia T. 2008.** Effet of salinity on photosynthetic pigments, respiration, and water content in two barley varieties. *Pak. J. Biol. Sci.*, 11:2438-2442pp.
- **Kim C.Y., S. Zhang., 2004.** Activation of a mitogen-activated protein kinase cascade induces WRKY family of transcription factors and defense genes in tobacco. *Plant J.*, 38: 142-151pp.
- **Kirkham M.B., Smith E.L., Danasobhon C. et Draket T.I., 1980.** Resistance to water loss of winter wheat flag leaves. *Cer. Res. Commun.* 8: 393 pp.
- **Kramer Pj – 1983:** Water relation of plants – Department of Botany – Duke – Univ Durham North. Carolina.

### L

- **Laberche J.C., 2004.** La nutrition de la plante In Biologie Végétale. Dunod. 2e (éd). Paris, 154 -163 pp.
- **Larbi A., 1992.** Détermination de quelques caractères agronomiques d'adaptation à la secheresse chez le blé tender et chez le blé dur. Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement – Agro 6 : 583 – 590pp.
- **Lebon E., Pellegrino A., Tardieu F. et Lecoœur J., 2004.** Shoot development in grapevine is affected by the modular branching pattern of the stem and intra and inter-shoot trophic competition. *Annals of Botany*, 93 : 263 -274 pp.
- **Le Boulc et Franque Mangne., 1999.** Evaluation de la qualité sanitaire du blé. A propos des mycotoxines et des moyens de les détecter. *Phytoma*, 21-26pp.
- **Levitt J., 1980.** Responses of plants to environmental stresses. Academic Presse, New York.
- **Loggini B., Scartazza A., Brugnoli E. et Navari-Izzo F., 1999.** Antioxidative defense system, pigment composition and photosynthetic efficiency in tow wheat cultivars subjected to drought. *Plant Physiologie*, 119: 1091-1099pp.
- **Loretti E., De Bellis L., Alpi A. et Perata P., 2001.** Why and how do plant cells sense sugars, *Ann Bot* ,88 : 803 - 812 pp.
- **Loue A., 1982.** Le potassium et les céréales. Dossier K<sub>2</sub>O, (02) :1-41pp.

### M

## Références bibliographiques

- **M.A.D.R., 2007.** Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Annuaire statistiques, Série B.
- **Madhava Rao K.V., Raghavendra A.S. et Janardhan Reddy K., 2006.** Printed in the Netherlands. Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. Springer, 1-14 pp.
- **Martin PREVEL P., 1984.** L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales 653-667pp.
- **Maume L et Dulac J., 1936.** Echantillonnage rationnel de la plante en vue des analyses chimiques comparatives, C.R.A.cd Agric Franc 26, 906-913pp.
- **Maurel C. et Chrispeels M.J., 2001.** Aquaporins: a molecular entry into plant water.
- **Mazliak. P, 1982** Physiologie végétale Tome II croissance et développement p : 177, 178,179.
- **Mc Kinney. G., 1941.** Absorption light by chlorophyll solutions. J BiolChem140: 315-322
- **Mekhlouf A.H., Bouzerzour, A., Benmahammed A., HadjSahraoui, N., Harkati., 2006.** Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) au climat semi-aride. Sécheresse, 17: 507-513pp.
- **Mekliche A., 1983.** Contribution à l'établissement de la fertilisation azotée du blé d'hiver dans le haut Chélif. Mémoire de magistère. I.N.A. Alger .81p.
- **Mekliche A., Boukecha D. et Hanfi – Mekliche L., 2003.** Etude de la tolérance à la sécheresse de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) .L' Effet de l'irrigation de complement sur les caractères phénologiques, Morphologiques et physiologiques. Annales de l'institut Nat. Agro. El Harrach, 24, (1) : 97 – 110pp.

## Références bibliographiques

- **Monneveux P. et Nemmar M., 1986.** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) et chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*): étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement agronomie, 6:583-590pp.
- **Monneveux Ph, Depigny., 1995.** Intégration des approches physiologiques, génétiques et moléculaires par l'amélioration de la tolérance à la sécheresse chez les céréales – Congrès AUPELF.URF – Namur 18 – 21 oct 1993.
- **Monneveux P. et Nemmar M., 1987.** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) et chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*) ; Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. Agronomie, (6) : 583 – 590pp.
- **Mouhouche B. et Boulassel A., 1997.** Gestion rationnelle des irrigations des compléments des cultures de légumineuses alimentaires et céréales. Recherche agronomique. INRA.1:21-31pp.
- **Munns R., 2002.** Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ 25:239-250pp.



- **Nemmar M., 1983.** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez les variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) et le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) évolution des teneurs en proline au cours de cycle de développement. Thèse de Doctorat, ENSAN, 142 p.

## Références bibliographiques

- **Noctor G, Arisi A., Jouanin L., Kunert K., Rennenberg H. et Foyer C., 1998.** Review article. Glutathione: biosynthesis, metabolism and relationship to stress tolerance explored in transformed plants. *Journal of Experimental Botany* 49(321): 623-647pp.
- **Nouri L., 2002.** Ajustement osmotique et maintien de l'activité photosynthétique chez le blé dur (*Triticum durum, Desf.*), en condition de déficit hydrique. Thèse de Magistère en Biologie végétale Univ-Mentouri. Constantine. 77p.
- **Nouri L., Ykhlef N. et Djekoun A., 2002.** Ajustement osmotique et comportement.
- **Nyabyenda P., 2005.** Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique. pp 181-189.



- **Oufroukh F. et Hamadi M., 1993.** Maladies et ravageur des céréales. In benchabane K.D. et Ould-Mekgloufi L., 1998. Evaluation phénologique de quelques variétés d'orge (*hordeum vulgare L.*) et leur sensibilité vis-à-vis de *drechsler agraminea* Rab.Mém. Ing Agro.INA.El-harrach, 59-62pp.



- **Passioura , J.B. 1994.** The yield of crops in relation to drought. In : Boote KJ, et al., eds. *Physiology and Determination of Crop Yield*. Madison, WI, USA: Crop Science Society of America : 343-359pp.
- **Paul M.H., Planchton C. et Ecochard R., 1979.** Etude des relations entre le développement foliaire, le cycle de développement et la productivité chez le soja. *Amélioration des plants*, 29: 479 -492 pp.

## Références bibliographiques

- **Pena R.J., W.H. Pfeiffer., 2005.** Breeding methodologies and strategies for durum wheat quality improvement. In: Conxita, R., Nachit, M., di Fonzo, N., Araus, J.L., Pfeiffer, W.H., & Slafer, G.A. (eds.). Durum wheat breeding: current approaches and future strategies. Food Product press.663-686pp.
- **Percevaux S., 1963.** Transpiration végétale et production végétale. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu – Ann . agro., 14(5) :655 – 742pp.
- **Pfeiffer W.H., Sayre K.D. et Reynolds M.P., 2000.** Enhancing genetic grain yield potential and yield stability in durum wheat. Options méditerranéennes .40: 83-93pp.

## R

- **Rai V.K., SinghG., Thakur P.S. et Banyal S., 1983.** Protein and amino-acid relationship during water stress in relation to drought resistance. Plant Physiol. Biochem., (Suppl.), (10): 161p.
- **Ramanjulu S. & Bartels D. 2002.** Drought and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. *Plant Cell* . **25**: 141-151 p.
- **Rascio A – 1985:** Water retention capacity of *triticum durum* cultivars receiving two different water regions – Gent – Agro 39: 409 – 416.
- **Reitz LP., 1974.** Breeding for more efficient water-use - is it real or a mirage? Agrie Meteorol : 14 : 3-7

## Références bibliographiques

- **Reynolds M.P., Pellegrineschi B., Skovmand., 2005.** Sink-limitation to yield and biomass: a summary of some investigations in spring wheat. *Ann. Appl. Biol.*, 146:39-49pp.

### S

- **Sakamura T,** 1918: Kurze Mitteilung ueber die chromosom enzahl und die Verwandtschaftsverhaeltnisse der Triticum Arten. *Bot. Mag ;Tokyo.* 32, 151-154p.
- **Samaras Y., Bresson R.A., Csonka L.N., Garcia-Rios M.G., Paino D'Urzo M. et Rhodes D., 1995.** Proline accumulation during drought and salinity. In :Sminoff N. *Environment and plant metabolism, flexibility and acclimation.* Oxford BIOS.,161: 79-88pp.
- **Schiels R. et Burnett W., 1960.** Determination of protein bound carbohydrate in serum by a modified anthronemethod. *An. Chem., (32)* :885 – 886pp.
- **Schulze E-D. Beck E. et Müller-Hohenstein K., 2005.** *Plant ecology.* Springer. Berlin, 117-143pp.
- **Scofield T., Evans J., Cook M.G. et Wardlow I.F., 1988.** Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust.J. Plant physiol.* 4: 785 - 797 pp.
- **Slafer G.A., J.L.Araus C., Royo LG., Del Moral., 2005.** Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *J. AppliedBiology,* 146 : 61-79pp.

## Références bibliographiques

- **Slama A., Ben Salem M. et Zid D., 2004.** La proline est-elle un osmorégulateur chez le blé dur, Communication aux 15es Journées biologiques. Forum des sciences biologiques. Association tunisienne des sciences biologiques.
- **Smart L.B., Moskal W.A., Cameron K.D. et Bennett A.B., 2001.** MIP Genes are downregulated under drought stress in *Nicotianaglauca*. *Plant CellPhysiol.* 42:686-693 pp.
- **Soltner., 1988.** Les grandes productions végétales. Les collections sciences et le role d'accumulation de proline par les halophytes. *Planta*, 120 p.
- **Soltner D., 1990.** les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairie. Coll. Sciences et techniques agricoles. 17ème Ed.464p.
- **Soltner D., 1998.** Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. Sainte-Gemme-sur-Loire, Sciences et Techniques Agricoles.

## T

- **Tardieu F., 2004.** Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science*, 8 : 9–14p.
- **Tetrazolium Testing Committee, 1970.** Tetrazolium Testing Handbook. For Agricultural seeds. Contribution N° 29 to the Handbook of Seed Testing. Eds. Association of Official Seed Analysts, p: 62.
- **Troccoli A., G.M. Borrelli P.D. Vita C. Fares N.D., Fonzo., 2000.** Durum wheat quality: a multi disciplinary concept.*JournalofCerealScience*32:99–113pp.

## Références bibliographiques

- **Tsimilli-Michael M. M., Pêcheux R.J. et Strasser., 1998.** Vitality and stress adaptation of the symbionts of coral reef and temperate foraminifers probed in hospite by the fluorescence kinetics O-J-I-P. Archs. Sci. Genève.51: 205 - 240 pp.

W

- **Wang W.X., Brak T., Vinocur B., Shoseyov O. et Altman A., 2003.** Abiotic resistance and chaperones: possible physiological role of SP1, a stable and stabilising protein from Populus. In: Vasil IK (ed), Plant biotechnology 2000 and beyond. Kluwer, Dordrecht, 439 – 443pp.
- **Willekens H., Langebartels C., Tike C., Montagu M. V., Inze D., Camp W. V., 1995.** Differential expression of catalase genes in *Nicotiana plumbaginifolia* (L.). proc NatlAcadSci USA., 91: 10450-10454pp.

X

- **Xu W., Campbell P., Vargese A.K. et BraamJ., 1996.** The Arabidopsis XET-related gene family: environmental and hormonal regulation of expression. Plant J., 9: 879 - 889 pp.

Y

- **Yamada S., Komori T., Myers P.N., Kuwata S., Kubo T. et Imaseki H., 1997.** Expression of plasma membrane water channel genes under water stress in *Nicotiana excelsior*. Plant CellPhysiol., 38 : 1226 -1231pp.



- **Zeghida A., Amrani R., Djennadi F., Ameroun R., Khldoun A.A., et Belloucif M., 2004.** Etude de la variabilité de réponse des plantules de blé dur (*Triticum durum Desf*) à la salinité. Céréaliculture. ITGC. 42. Constantine ,5p.
- **Zerrad W., Hillali S., Mataoui B., El Antri S. et Hmyene A., 2006.** Etude comparative des mécanismes biochimiques et moléculaires de résistance au stress hydrique de deux variétés de blé dur. Biochimie, Substances naturelles et environnement. Congrès international de biochimie. Agadir.
- **Zouaoui G., 1993.** Etude en F1 et F2 des hybrides issus du croisement de 05 variétés de blé dur :détermination génétique des principaux caractères a intérêt agronomique. Mem.Ing. D'état. I.N.R.A.El Harrach.Alger.7p.
- **Zhu J.K., 2001.**Plant salt tolerance. Trends in plant Sci., 6: 66-71. water deficit. Planta, 201: 502 -518 pp.

## Site Web

- [www.UNCTAD.org](http://www.UNCTAD.org).