

**Université Mohamed V - Rabat  
Faculté des Sciences -Agdal  
Département de Biologie**

Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Master

Option : Biotechnologies végétales pour l'amélioration des plantes

Intitulé :

**Evaluation de la performance agronomique et des  
réponses physiologiques des ressources génétiques de  
l'orge (*Hordeum vulgare*) sous conditions de stress  
thermique**

Présenté par :

**ZAHID Laila**

27 Mars 2019

Devant le jury composé de :

**Pr. Smouni Abdelaziz, Professeur à la Faculté des Sciences Rabat.....Modérateur**

**Pr. FAHR Mouna, Professeur à la Faculté des Sciences Rabat.....Encadrante**

**Dr. AMRI Ahmed, Directeur de la section des ressources génétiques ICARDA**

**Rabat.....Encadrant**

**Pr. TRIQUI Zine El Abidine, Professeur à la Faculté des Sciences Rabat**

**.....Examineur**

Année universitaire 2018 - 2019

## ***Remerciements***

Avant tout développement sur cette expérience, il apparaît opportun de commencer mon mémoire par des remerciements : tout d'abord à **Allah** qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Je tiens à remercier énormément **Pr. FAHR Mouna** qui m'a encadré, aidé et guidé toute cette période. Sa gentillesse, sa patience, et sa constante disponibilité, ainsi que son sacrifice de temps pour corriger et donner les recommandations utiles, et de m'avoir formé pour que ce travail soit bien structuré. Qu'elle retrouve ma gratitude et mes sincères remerciements.

Mes remerciements s'adressent à **Dr. AMRI Ahmed**: Chef de la Section des Ressources Génétiques -Banque de gènes de l'ICARDA-Rabat qui a accepté d'effectuer mon stage à l'ICARDA sur cet aspect important de recherche, aussi pour sa revue du document et pour son temps précieux pour l'évaluation de ce travail.

Mes profondes gratitude s'adressent à toutes les personnes qui m'ont formé, aidé, et suivi pendant la durée du stage, avec beaucoup de respect, et grand égard, à savoir: **Mr. ABERKANE Hafid** et **Dr. TSIVELIKAS Athanasios** pour leur idéal encadrement, leur gentillesse, leur sacrifice, leur soutien, et leur aide : recherche d'informations, accompagnement au champ, collecte des données, traitement statistique des données, rédaction et corrections du mémoire.

Mes chaleureux remerciements s'adressent à Monsieur le Président **Pr. SMOUNI Abdelaziz** pour sa gentillesse, son aide et bienveillance, ainsi d'avoir accepté de présider ce travail.

Je remercie fortement **Pr. TRIQUI Zine El Abidine** pour sa disponibilité, sa bienveillance à tout moment, sa gentillesse, et aussi d'avoir accepté à juger ce travail.

Mes sincères remerciements sont adressés à **Mr. TAHIR Izzat** et toute l'équipe à la station Wad Medani au Soudan, d'avoir récupérer et m'offrir les résultats de l'essai conduit à cette station, ainsi pour leur disponibilité à tout moment pour des informations supplémentaires concernant l'essai.

Mes vifs remerciements vont à **Dr. KEHEL Zakaria** pour ses explications pertinentes, son soutien, aide et ses encouragements.

Mes remerciements s'adressent à **Mr. DOUCH Ali**, à **Mme. ESSALHI Oum Keltoum** et à **Mr. ABOUSSOUBA Aly** et à toute l'équipe de l'ICARDA pour leur gentillesse, support et accueil.

Je remercie profondément **Mr. EL BAOUCHI Adil** et à toute l'équipe du laboratoire de Qualité à l'ICARDA, à **Mr. SIJILMASSI Badreddine** et à toute l'équipe du laboratoire du *Rhizobium* à l'ICARDA, de m'avoir accueilli au sein des laboratoires, m'aider, et me donner des explications

appropriées, ainsi leur contribution dans l'amélioration de mon expérience et de mes compétences au laboratoire.

Je tiens à remercier **Mr. MOULAKAT Adil** pour ses encouragements, soutien, et aide à tout moment durant la période du stage.

Je tiens à exprimer mes remerciements à **Dr. AMRI Moez** de m'avoir accueilli au sein du laboratoire de Physiologie à l'ICARDA, et de nous offrir le matériel pour effectuer les mesures physiologiques.

Mes remerciements s'adressent spécialement à ma sœur **ZAHID Samira** et à **Mr. ABOULFADEL Abdellatif** pour leur soutien, aide, support et encouragements pour toute une durée d'études et de stage. Je vous remercie énormément, que Dieu vous protège ainsi que leurs enfants.

Je remercie énormément **Pr. ZAHIDI Ahmed** pour son aide, ses encouragements, pour sa disponibilité à tout moment, et aussi pour ses conseils pertinents.

Je remercie profondément mon amie **TIKA Asma** de m'avoir aidé de près ou de loin, son soutien continu, ses encouragements, durant toute la période d'études et de stage, qu'elle retrouve mes sincères remerciements.

Un grand merci à **Mlle. EL MANSOURI Abir** pour sa gentillesse, ses encouragements, qu'elle trouve ma reconnaissance.

Gracieux remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, spécialement à tout le personnel de l'**ICARDA - Rabat** de m'avoir bien accueilli, de leur soutien, suivi, et assistance et de m'avoir accepté entre eux pour développer mes connaissances et améliorer mes compétences.

## ***Dédicaces***

*Autant de phrases et d'expressions, je dédie ce travail à toute ma famille : A mes Parents, mes Frères et Sœurs et leurs enfants, pour leur confiance, leurs sacrifices, et leur soutien continu.*

*A mes Oncles et Tantes pour leurs encouragements permanents,*

*A ma Grand-Mère maternelle et mon Grand-Père paternel, qu'ils trouvent ma reconnaissance pour leurs encouragements, leur prière. A l'âme de ma Grand-mère Paternelle et à l'âme de mon Grand-père maternel que Dieu vous accueille dans son vaste paradis.*

*A mes amies et amis et à toute personne qui m'a accompagné et soutenu tout au long de mon parcours universitaire*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux, et le fruit de votre soutien infailible  
Que Dieu vous bénisse*

*Je vous remercie infiniment d'être toujours là pour moi.*

***ZAHID Laïla***

## ***Résumé***

Notre étude a été faite sur des génotypes d'orge (*Hordeum vulgare* L.) de différentes origines pour étudier leur comportement face aux hautes températures comparativement à ceux installés sous conditions favorables. Une expérience de caractérisation de génotypes a été réalisée dans deux environnements différents : à Marchouch (conditions optimales) et à Wad Medani (conditions de stress thermique) durant la campagne 2017-2018. Les génotypes comprenaient des variétés marocaines, des variétés australiennes, des génotypes de la banque de gènes sélectionnées par l'approche FIGS, des lignées prometteuses de l'ICARDA et des lignées sélection intra-cultivars isolées pour leur potentiel de rendement élevé.

Les essais sont installés selon le protocole expérimental alpha-lattice avec deux répétitions. Dans les deux environnements, des caractéristiques physiologiques (la fluorescence chlorophyllienne et la température du couvert végétal), phénologiques (nombre de jours jusqu'à l'épiaison, nombre de jours jusqu'à maturité, période de remplissage des grains) et agronomiques en relation avec le rendement et ses composantes (nombre d'épi/m<sup>2</sup>, nombre de grains par épi, rendement biologique et le rendement en grains) ont été mesurés. L'indice de récolte et quatre indices de tolérance au stress thermique ont été calculés en fonction du rendement en grain dans les deux environnements. En outre, une analyse de corrélation entre tous les traits a été réalisée.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'effet négatif du stress thermique sur la croissance et le développement des génotypes étudiés. Ces effets se manifestent par une réduction de l'activité photosynthétique, une augmentation de la température de la canopée, un raccourcissement du cycle de croissance des plantes, et une diminution au niveau du rendement et ses composantes.

En termes de rendement en grain, cinq accessions sélectionnées par l'approche FIGS ont enregistré un rendement élevé en grain dans les conditions de stress thermique, dont le maximum a été noté pour les variétés australiennes Keel et Gairdner.

En se basant sur les indices de tolérance au stress thermique, les valeurs de GM (Moyenne géométrique) et de HTI (Indice de tolérance à la chaleur) ont montré les variétés combinant les deux caractères: potentiel élevé de rendement en grain et tolérance au stress thermique. Ces variétés sont: Baudin, Capstan, IH4-H4 et IH17. En supplément, l'analyse de corrélation a montré différents degrés de signification entre les traits physiologiques, phénologiques et agronomiques.

**Mots clés :** Orge, *Hordeum vulgare*, FIGS, stress thermique, tolérance au stress thermique, indices de tolérance à la chaleur.

## ***Abstract***

Our study evaluated barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) of different origins, for their tolerance to heat. The trials were conducted at two contrasting environments: Marchouch (optimal conditions) and Wad Medani (heat stress conditions) during the 2017-2018 season. The genotypes included Moroccan varieties, Australian varieties, genebank accessions selected using the FIGS approach (named Landraces), promising lines of ICARDA and isolated intra-cultivar selection lines which are isolated for their high yield potential.

The trials are conducted using the alpha-lattice design with two repetitions. In both environments, physiological characteristics (chlorophyll fluorescence and canopy temperature), phenological (days to heading, days to maturity, grain filling period) and agronomic traits which have a relation with yield and its components (number of spikes / m<sup>2</sup>, number of grains per spike, biological yield and grain yield) were measured. The harvest index and four heat stress tolerance indices were calculated based on grain yield in both environments. In addition, a correlation analysis between all traits was performed.

The results of this study highlighted the negative effects of heat stress on growth and development of the studied genotypes. These effects were manifested by a reduction in photosynthetic activity, an increase in canopy temperature, a shortening of the plant growth cycle, with a decrease in yield and its components. The heat stress tolerance is shown for some genotypes in the stressed environment, when compared with the results in the optimal conditions

In terms of grain yield, five accessions selected using the FIGS approach recorded high grain yield under heat stress conditions, and the highest yields under heat stress were obtained for the Australian varieties: Keel and Gairdner.

The heat tolerance indices, the GM (Geometric Mean) and HTI (Heat Tolerance Index) values showed varieties combining the two traits: high grain yield potential and heat stress tolerance index. These varieties are: Baudin, Capstan, IH4-H4 and IH17. A correlation analysis in both environments showed different degrees of significance between physiological, phenological and agronomic traits.

**Key words:** Barley, *Hordeum vulgare*, FIGS, heat stress, heat stress tolerance, heat tolerance indices.

# Table de matière

<b>Remerciements</b> .....	
<b>Dédicaces</b> .....	
<b>Résumé</b> .....	
<b>Abstract</b> .....	
Liste des abréviations.....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux.....	
Introduction.....	1
<b>Revue bibliographique</b> .....	3
I. Généralités sur l'orge .....	4
1. Classification botanique .....	4
2. Origine des orges cultivées.....	4
3. Description du végétal et modes de reproduction .....	5
a) Appareil végétatif .....	5
b) Appareil reproducteur.....	6
4. La partie racinaire de l'orge .....	6
5. Exigences de la culture.....	6
6. Types de l'orge.....	7
7. Cycle de développement de l'orge .....	8
8. Production mondiale de l'orge .....	8
9. Importance économique de l'orge et utilisations .....	9
II. Contraintes liées à la culture de l'orge .....	10
1. Stress biotiques.....	10
2. Stress abiotiques .....	11
a) Stress hydrique.....	12
b) Stress salin .....	12
c) Stress thermique.....	13
3. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress thermique .....	15
III. Diversité génétique et amélioration de l'orge .....	16
IV. Moyens de sélection des plantes sous conditions de stress .....	17
V. Importance de l'exploitation des ressources génétiques dans l'amélioration de l'orge .....	18
1. Les collections <i>ex-situ</i> (banque de gènes) .....	18
2. L'approche FIGS : Focused Identification of Germplasm Strategy.....	19
a) Présentation de l'approche FIGS .....	19
b) Principe de l'approche FIGS .....	19

c) FIGS comme une stratégie pour identifier les traits d'adaptation aux changements climatiques .....	20
<b>Matériel et Méthodes</b> .....	22
I. Présentation des sites d'expérimentation .....	23
II. Matériel végétal .....	23
III. Dispositif expérimental et conduite d'essai .....	24
IV. Données collectées .....	24
1. Traits physiologiques .....	24
a) La Fluorescence chlorophyllienne .....	24
b) Le contenu en chlorophylle des feuilles .....	26
c) La température du couvert végétal .....	27
d) Couverture végétale ou Ground cover .....	28
2. Performances agronomiques .....	29
a) Cycle de croissance des génotypes .....	29
b) Rendement et ses composantes .....	30
❖ Nombre d'épis par mètre carré .....	30
❖ Nombre de grains par épi .....	30
❖ Rendement en biomasse et en grains .....	31
3. Calcul des indices de tolérance au stress thermique .....	32
a) Heat Tolerance Efficiency (HTE) : Efficacité de tolérance à la chaleur .....	32
b) Heat Susceptibility Index (HSI) : Indice de susceptibilité à la chaleur .....	32
c) Heat Tolerance Index (HTI) : Indice de tolérance à la chaleur .....	33
d) Moyenne géométrique (GM) .....	33
V. Analyse statistique des données .....	34
<b>Résultats et discussion</b> .....	35
I. Les données climatiques .....	36
1. Station Marchouch .....	36
2. Station Wad Medani .....	37
II. Traits physiologiques et agronomiques des génotypes étudiés .....	37
1. Traits physiologiques .....	38
a) Température du couvert végétal .....	38
b) Fluorescence chlorophyllienne .....	39
❖ Fluorescence minimale : F0 .....	40
❖ Rendement photosynthétique : Fv / Fm .....	41
c) Couverture végétale .....	43
d) Le contenu en chlorophylle .....	44
2. Traits agronomiques .....	45
a) Cycle de croissance des génotypes étudiés .....	45

❖ Nombre de jours à l'épiaison.....	47
b) Composantes du rendement.....	48
III. Évaluation de la tolérance au stress thermique .....	57
IV. Analyse des corrélations entre les traits .....	60
Conclusion générale.....	65
Perspectives.....	67
Références bibliographiques.....	68
<b>Annexes</b> .....	78
Annexe 1 .....	79
Annexe 2 .....	81
Annexe 3 .....	85
Annexe 4.....	86
Annexe 5 .....	87
Annexe 6 .....	89
Annexe 7 .....	90
Annexe 8 .....	92
Annexe 9 .....	93
Annexe 10.....	96
Annexe 11 .....	98
Annexe 12 .....	99
Annexe 13 .....	100

## Liste des abréviations

BY : Rendement biologique ou biomasse

CCI : Indice de concentration en chlorophylle

Chc : Contenu en chlorophylle

CT : Température du couvert végétal

DHE : Nombre de jours à l'épiaison

DMA : Nombre de jours jusqu'à maturité

FIGS : Focused Identification of Germplasm Strategy (Stratégie d'identification ciblée du matériel génétique)

F0 : Fluorescence initiale

Fm : Fluorescence maximale

Fv / F0 : Efficacité photosynthétique

Fv / Fm : Efficacité et rendement photosynthétique

Fv : Fluorescence variable

GC : Couverture végétale

GFP : Période de remplissage des grains

GM : Moyenne géométrique

GWAS : Genome-Wide Association Study (ou Etude d'association pangénomique).

GY : Rendement en grains

HI : Indice de récolte

HSI : Indice de susceptibilité à la chaleur

HTE : Efficacité de tolérance à la chaleur

HTI : Indice de tolérance à la chaleur

pH : Potentiel hydrogène

PHT : Longueur de la plante

QTL : Quantitative traits loci (locus des caractères quantitatifs)

Rubisco : Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase

SLF : Longueur de l'épi mesurée au champ

SLL : Longueur de l'épi mesurée au laboratoire

SNPM2 : Nombre d'épis par mètre carré

SNPSP : Nombre de grains par épi

TKW ou PMG : Poids de mille grains

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : La région de l'Asie du Sud-Ouest qui comprend le Croissant Fertile principal centre d'origine des orges cultivées (Fischer, 2015) .....	4
<b>Figure 2</b> : Vue de l'ensemble de l'appareil végétatif de l'orge au champ à la station Wad Medani .	5
<b>Figure 3</b> : (a) 1 : Vue de face d'un épi, 2 : épillet et 3 : des graines de l'orge, (b) Schéma du détail de la composition de la fleur chez l'orge .....	6
<b>Figure 4</b> : Les types d'orge : (a) orge à six rangs et (b) orge à deux rangs.....	7
<b>Figure 5</b> : Localisation des tocots (Vitamine E) et des $\beta$ -glucans dans le grain d'orge.....	10
<b>Figure 6</b> : Distribution géographique de la collection de l'orge (cultivé et sauvage) à l'ICARDA .	19
<b>Figure 7</b> : Principales étapes pour la sélection des génotypes d'intérêt par l'approche FIGS.....	20
<b>Figure 8</b> : Méthode de prise des mesures de la fluorescence chlorophyllienne au champ (a) à la station Marchouch, et (b) à la station Wad Medani, par le fluoromètre type OS-30p+ .....	25
<b>Figure 9</b> : (a) Appareil de mesure de la fluorescence chlorophyllienne et (b) le résultat affiché sur l'écran après mesure.....	26
<b>Figure 10</b> : Exemple de photo thermique prise par l'appareil thermique .....	27
<b>Figure 11</b> : Mesure de la longueur des épis et du nombre de grains par épi.....	30
<b>Figure 12</b> : Compteur automatique des grains pour la détermination du poids de mille grains .....	31
<b>Figure 13</b> : Données climatiques dans la station Marchouch de la saison agricole 2017 – 2018.....	36
<b>Figure 14</b> : Données climatiques dans la station Wad Medani de la campagne agricole 2017 – 2018 .....	37
<b>Figure 15</b> : Variation de la température du couvert végétal en fonction du type du matériel végétal des génotypes d'orge dans les stations (a) Marchouch et (b) Wad Medani durant la campagne agricole 2017-2018. ....	38

<b>Figure 16 :</b> Variation du rendement photosynthétique Fv/Fm des géotypes d’orge dans les deux stations Marchouch (MCH) et Wad Medani (WM) durant la saison agricole 2017 – 2018.....	41
<b>Figure 17 :</b> Variation de la couverture végétale durant trois stades phénologiques successifs des géotypes d’orge à la station Wad Medani durant la campagne 2017 – 2018.....	43
<b>Figure 18 :</b> Variation de la teneur en chlorophylle entre les géotypes d’orge dans l’environnement stressé à Wad Medani durant la campagne agricole 2017 – 2018 .....	44
<b>Figure 19 :</b> Variation du nombre de jours à l’épiaison dans les deux conditions de culture : MCH Marchouch (environnement non–stressé), et WM Wad Medani (environnement avec stress thermique) .....	47
<b>Figure 20 :</b> Variation du nombre de grains par épis chez les géotypes d’orge étudiés dans les deux stations MCH : Marchouch et WM : Wad Medani durant la saison 2017 – 2018.....	49
<b>Figure 21 :</b> Variation du nombre d’épis/m <sup>2</sup> chez les géotypes d’orge étudiés dans les deux stations MCH : Marchouch et WM : Wad Medani durant la saison 2017 – 2018.....	50
<b>Figure 22 :</b> Comparaison du rendement biologique des géotypes d’orge dans les deux conditions de culture MCH : Marchouch sous conditions potentielles ou normales, et WM : Wad Medani sous conditions de stress thermique durant la campagne 2017 – 2018.....	52
<b>Figure 23 :</b> Comparaison du rendement en grains des géotypes dans les deux conditions de culture MCH : Marchouch conditions non stressées, et WM : Wad Medani conditions de stress thermique durant la campagne 2017 – 2018 .....	52
<b>Figure 24 :</b> Diagramme bidimensionnel pour le rendement en grains exprimé en valeurs de (BLUE) entre les deux sites d’expérimentation (Marchouch et Wad Medani) .....	54
<b>Figure 25 :</b> Variation du poids de mille grains chez les géotypes d’orge évalués dans les deux stations : MCH : Marchouch et WM : Wad Medani durant la campagne 2017 – 2018 .....	55
<b>Figure 26 :</b> Graphe bidimensionnel entre le rendement en grains dans l’environnement favorable (Marchouch) et les deux indices (HTE à gauche) et (HSI à droite).....	58
<b>Figure 27 :</b> Graphe bidimensionnel entre le rendement en grains dans l’environnement favorable (Marchouch) et les deux indices (GM à gauche) et (HTI à droite).....	59
<b>Figure 28 :</b> Matrice des corrélations (méthode de Pearson) basée sur les coefficients de corrélation France des 17 caractères enregistrés à Marchouch, au Maroc, en utilisant 77 géotypes d’orge.....	61
<b>Figure 29 :</b> Matrice des corrélations (méthode de Pearson) basée sur les coefficients de corrélation France des 25 caractères enregistrés à Wad Medani Sudan, en utilisant 63 géotypes d’orge .....	63

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> Les principales maladies et insectes qui attaquent l'orge et leur distribution (Ullrich, 2011) .....	11
<b>Tableau 2 :</b> Analyse de la variance des paramètres du cycle de croissance des géotypes dans les conditions non-stressées.....	46
<b>Tableau 3 :</b> Analyse de la variance du cycle de croissance des géotypes dans les conditions de stress thermique (Wad Medani) .....	46

## Introduction

L'orge (*Hordeum vulgare* L.) est l'une des céréales les plus importantes du point de vue économique, sociologique, et nutritionnel. Elle est située au quatrième rang des céréales productrices de grains après le blé, le maïs et le riz (Carena, 2009). L'orge est cultivée à des latitudes et altitudes plus élevées, largement adaptée dans les zones semi-arides et dans les zones méditerranéennes, et présente une bonne tolérance à la sécheresse, au froid et à la salinité (Ullrich, 2011).

La production mondiale de l'orge entre 2008 et 2016 était en moyenne de 141.4 millions de tonnes qui est optimale dans les pays de l'Asie, de l'Europe, et de l'Amérique. Pour la même période, la production moyenne de l'orge au Maroc était d'environ 2.2 millions de tonnes, avec une superficie nationale récoltée moyenne de 2 millions d'hectares (FAOSTAT).

Vue la composition de ses grains en éléments nutritifs essentiels pour la nutrition humaine, l'orge est exploitée dans différents domaines : en alimentation humaine et en alimentation du bétail, ainsi que dans le malt et la fabrication de la bière.

Comme toute culture, l'orge est confrontée à un certain nombre de contraintes biotiques et abiotiques, ce qui affecte négativement la croissance et le développement des plantes, et cause ainsi la diminution de la production et du rendement. L'une des principales contraintes abiotiques les plus redoutables chez l'orge : le stress thermique, qui est défini lorsque les températures environnementales sont élevées ou supérieures aux besoins des plantes. Le stress thermique a un impact sur la croissance et le développement des plantes, son effet peut atteindre aussi bien les phases végétative et reproductive, ainsi que la réduction du rendement économique (Mittler *et al.*, 2011 et Wahid *et al.*, 2007).

Depuis 1984, les sélectionneurs ont pu inscrire plusieurs variétés d'orge au catalogue national de l'ONSSA (Office National de Sécurité Sanitaire des produits Alimentaires), maintenues par les institutions nationales et internationales. La sélection et l'amélioration génétique se basent sur la biodiversité existante. Les programmes d'amélioration ont visé en grande partie l'amélioration du rendement, ainsi que l'amélioration de la tolérance aux stress biotiques et abiotiques (Saidi *et al.*, 2007).

La conservation des ressources génétiques dans des banques de gènes reste la solution fiable contre la perte du matériel végétal. Ces ressources génétiques conservées sont exploitées par les sélectionneurs dans les programmes d'amélioration. Ces derniers visent les croisements avec des

espèces qui constituent un réservoir de gènes d'intérêt, et qui peuvent être sélectionnés par l'approche d'identification ciblée du matériel génétique (FIGS) (Amri et *al.*, 2015).

Dans le présent travail, nous évaluons la tolérance de cinq types de variétés d'orge: Lignées prometteuses de l'ICARDA, variétés sélectionnées par l'approche FIGS, lignées sélection intra-cultivars, variétés marocaines, et des variétés australiennes au stress thermique. Pour ce fait, nous avons évalué la performance agronomique et la réponse physiologique de ces génotypes dans deux stations d'expérimentation: Marchouch (au Maroc) représentant l'environnement favorable et Wad Medani (au Soudan) sous les conditions de stress thermique.

Les objectifs de cette étude se résument à :

- L'évaluation de la tolérance au stress thermique (hautes températures) des génotypes sélectionnés par l'approche FIGS et autres germoplasmes
- L'évaluation de l'effet de stress thermique sur quelque paramètres physiologiques et agronomiques de l'orge dans l'environnement stressé.

## **Revue bibliographique**

# I. Généralités sur l'orge

## 1. Classification botanique

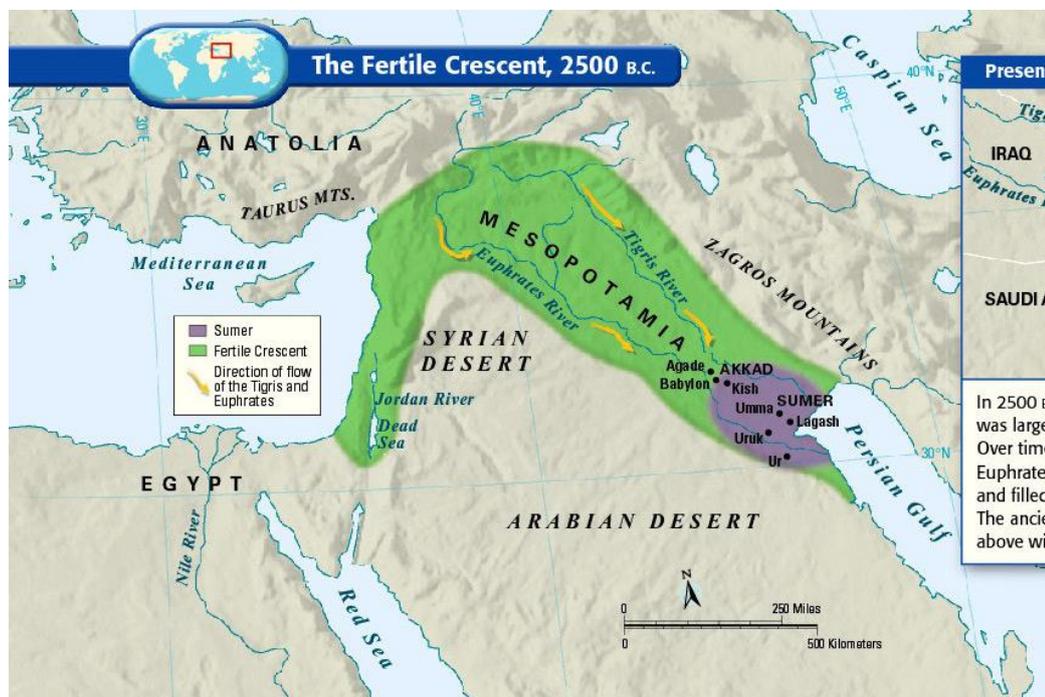
L'orge est une culture monocotylédone, déclarée parmi les plantes importantes économiquement dans le monde entier. Elle appartient à la tribu des *Triticeae*, Famille des *Poaceae*, dont les principaux genres sont : le blé (*Triticum*), le seigle (*Secale*), et l'orge (*Hordeum*). L'espèce cultivée d'orge est *Hordeum vulgare* subsp. *vulgare* L.

Linné (1753) a établi une classification des orges selon la fertilité ou non des épillets latéraux, la compacité ou la densité des épis, et la présence ou l'absence des barbes (Benmhammed, 2005).

## 2. Origine des orges cultivées

La distribution de la culture d'orge est cultivée principalement dans les régions tempérées du monde mais sa culture s'étend vers les latitudes et altitudes élevées. La zone d'origine était l'Asie du sud-ouest (Ullrich, 2011).

Le centre d'origine et de domestication d'*Hordeum* a été proposé par Vavilov (1926, 1951) : « Le croissant Fertile », y compris l'Asie Mineure, le Caucase, l'Irak, la Turquie, la Jordanie, la Syrie, Palestine et le Liban. Par contre l'orge sauvage (*H. vulgare* subsp. *spontaneum*) s'étend jusqu'en Asie centrale (Nevo, 2006).



**Figure 1** : La région de l'Asie du Sud-Ouest qui comprend le Croissant Fertile principal centre d'origine des orges cultivées (Fischer, 2015)

### 3. Description du végétal et modes de reproduction

#### a) Appareil végétatif

L'appareil végétatif est constitué d'un nombre de talles qui partent d'une base appelée : plateau de tallage, chacune de ces talles est formée d'une tige cylindrique creuse feuillée, portant à son extrémité une inflorescence en épi de 6 à 10 cm de long. La partie aérienne de l'orge est représentée du plateau de tallage jusqu'aux barbes des épis (Figure 2) (Ullrich, 2011).



**Figure 2 :** Vue de l'ensemble de l'appareil végétatif de l'orge au champ à la station Wad Medani

Les feuilles partant des nœuds sont alternes. Sur leur base il existe une gaine ; aux extrémités de laquelle partent une ligule et deux oreillettes, appelées stipules, assemblées bien développées formant un cylindre entourant la tige ; ce qui caractérise les feuilles d'orge (Moule, 1971). Chez certains types d'orge les grains sont protégés par deux glumelles sous-jacentes, tandis qu'il existe d'autres types où les grains sont nus et non protégés par des glumelles.

## b) Appareil reproducteur

L'architecture générale de l'appareil reproducteur d'*Hordeum* est décrite par Carena (2009). L'axe central appelé rachis porte des nœuds et des entre-nœuds, dont sont attachés des épillets pouvant se développer en noyaux par la suite. Chaque nœud du rachis possède trois épillets (Figure 3-a), mais leur stérilité ou leur fertilité est différente entre les deux types : le type d'orge à six rangs dont les trois épillets étant fertiles, et le type d'orge à deux rangs, généralement, l'épillet centrale est fertile, et les épillets latéraux sont stériles (Moule, 1971). Chaque épillet ne renferme qu'une seule fleur développée et hermaphrodite possédant trois étamines (Figure 3-b), ce qui explique le mode de reproduction par autogamie.



**Figure 3 :** (a) 1 : Vue de face d'un épi, 2 : épillet et 3 : des graines de l'orge, (b) Schéma du détail de la composition de la fleur chez l'orge

## 4. La partie racinaire de l'orge

Deux systèmes racinaires successifs sont distingués chez les céréales :

- Le premier système est dit système de racines primaires ou séminales qui est constitué d'une racine principale et de deux paires de racines latérales, soit 5 racines ; éventuellement se développe une sixième racine à partir de l'épiblaste.
- Le deuxième type est dit système de racines secondaires ou de tallage : type de racines fasciculées superficielles et moins importantes chez l'orge (Moule, 1971).

## 5. Exigences de la culture

L'orge est une céréale qui se développe bien dans les milieux présentant une grande variabilité climatique (Ceccarelli et al., 1998). Elle peut être cultivée dans toutes les régions agricoles du Maroc.

L'orge est une culture peu exigeante en eau et en fertilisants comparativement aux blés. Elle préfère des sols drainés avec une texture sablo-limoneuse à argileuse, calcaire, de pH alcalin ou neutre.

Lorsque les grains sont semés à des profondeurs supérieures à 5 cm, le risque d'avoir des plantes chétives sera élevé, avec un taux de levée faible et donc des rendements faibles. Il est donc recommandé de semer les grains d'orge en profondeur entre 3.5 et 5 cm.

La culture doit être exposée au soleil pour assurer une photosynthèse élevée et donc une croissance rapide, permettant ainsi d'optimiser le rendement (Alaoui, 2003).

## 6. Types de l'orge

Selon la morphologie de l'épi on distingue deux types : l'orge à deux rangs et l'orge à six rangs. Les orges à six rangs se distinguent par la présence de trois épillets par nœud du rachis, les trois sont fertiles, et lorsqu'on effectue une vue d'en haut il apparaît qu'il existe six rangées de grains (Figure 4-a).

Les orges à deux rangs se distinguent par leur forme aplatie, possédant aussi trois épillets par nœud (Figure 4-b), dont un central fertile et deux latéraux stériles (Ullrich, 2011).



**Figure 4 :** Les types d'orge : (a) orge à six rangs et (b) orge à deux rangs

La fertilité des épillets est contrôlée par le locus *vrs1* localisé dans le chromosome 2H, et dont le locus est dominant pour le type d'orge à deux rangs et récessif pour le type d'orge à six rangs.

La taille des épillets latéraux est aussi contrôlée par un locus *Int-c* localisé dans le chromosome 4H, étant dominant pour le type d'orge à six rangs, et récessif dans le type d'orge à deux rangs (Carena, 2009).

## 7. Cycle de développement de l'orge

Le processus de germination chez les céréales est un ensemble de divisions cellulaires et d'activités enzymatiques issus des conditions d'humidité du sol, qui permet l'émergence de la racicule de l'embryon (Beweley, 1997). Cette racicule traverse les enveloppes de la graine, et donne naissance à une plantule par la suite.

Il existe plusieurs échelles créées par des chercheurs ; pour caractériser les stades de développement de l'orge comme celle de Zadoks, et celle de Feekes. La meilleure échelle et la plus utilisée par les agronomes et les physiologistes est celle de Zadoks (Zadoks et *al.*, 1974).

Les stades de développement des orges comprennent les phases suivantes :

La levée : la phase qui suit la germination des graines, caractérisée par l'allongement de la racine principale et des racines séminales, et donc l'émergence du coléorhize, suivit de l'apparition du coléoptile. Vient par la suite la phase du début de tallage qui est caractérisée par l'apparition de la première feuille, qui parte du plateau de tallage, suivie de l'émergence des autres feuilles et leur croissance. Cette phase dépend de la température. Les feuilles continuent à croître, puis il y a émission d'une ramification définie par la formation des bourgeons sous chaque première feuille. Ensuite, il y a l'apparition des talles primaires, secondaires et tertiaires, jusqu'au stade fin tallage.

La phase qui suit le tallage est appelée : montaison. Elle se fait en conditions de vernalisation (basses températures pour arriver à épiaison) et de photopériode (pour la différenciation des méristèmes en organes végétatifs), caractérisée par la formation des parties florales glumes et lemme, puis le gonflement de la gaine de la dernière feuille.

En fin de la phase de montaison, paraît la phase d'épiaison (de la sortie des barbes à la sortie de tous les épis), et finalement la phase de la formation et maturation des grains (aux différents stades : laiteux, pâteux, grain dur, et grain mûr) (Boyeldieu, 1997).

## 8. Production mondiale de l'orge

La production de l'orge à l'échelle mondiale est concentrée dans les zones arides et semis- arides, dans les zones d'altitudes et latitudes différentes, ainsi que dans les montagnes.

Le maximum de production mondiale de l'orge a été enregistré dans les pays d'Europe incluant la Russie et l'Ukraine, qui ont pu produire en moyenne 62,5% d'orge entre 2008 et 2016, suivie de l'Asie avec une moyenne de production mondiale d'ordre de 13,9%, l'Amérique 13%, le minimum de production mondiale a été déclaré en Afrique avec 4,5% uniquement de production de l'orge (FAOSTAT).

Ces changements de production illustrent bien l'adaptation de l'orge aux différents étages climatiques (Ullrich, 2011).

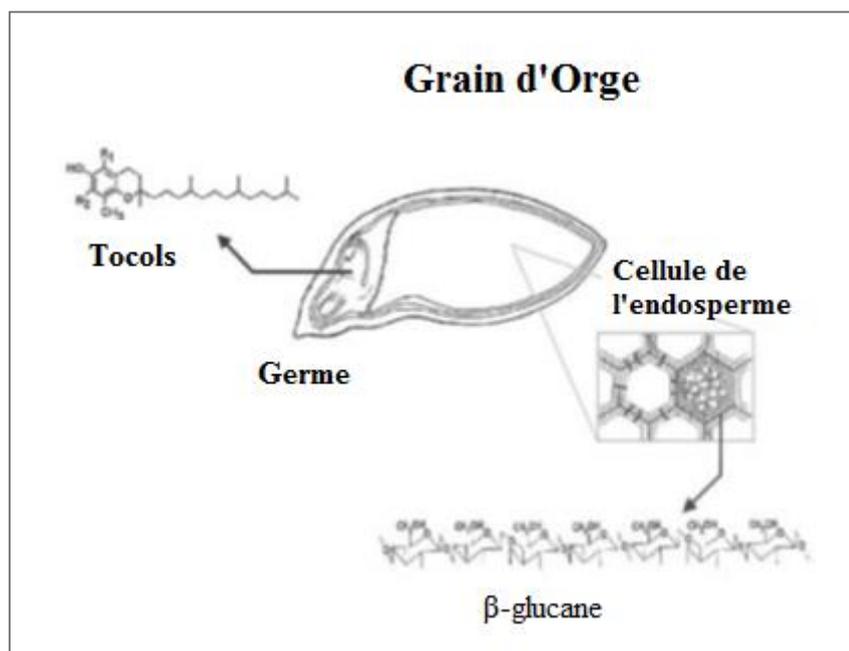
Le Maroc a été classé 24<sup>ème</sup> dans le monde au niveau de la production de l'orge avec une production de 1 638 090 tonnes en 2014, en comparaison avec la Russie 20 444 258 tonnes, la France 11 770 680 tonnes, et l'Allemand 11 562 800 tonnes.

L'orge au Maroc a connu un éventail changement entre 2009 et 2016 au niveau de la production nationale qui était, respectivement, de 3 769 500 tonnes et 619 919 tonnes. Les superficies agricoles nationales qui présentaient une variation allant de 2 182 800 ha en 2009 jusqu'à 1 207 615 ha en 2016, avec une diminution de 44%.

Le rendement moyen d'un pays, les superficies récoltées, et la production totale reflètent les conditions de croissance : principalement les précipitations, et les techniques culturales : la fertilisation du sol et la gestion des insectes (Ullrich, 2011).

#### 9. Importance économique de l'orge et utilisations

Les céréales sont classées parmi les aliments qui ont un rôle socio-économique et nutritionnel. Elles fournissent au corps humain ses besoins énergétiques en protéines, en glucides et en vitamines. L'orge est une céréale possédant une grande importance économique, vue qu'elle représente un aliment de base dans plusieurs pays. Ainsi, elle est reconnue pour son importance nutritionnelle car elle contient deux classes de composés à fort intérêt fonctionnels : les tocols (vitamine E) reconnus par leur activité biologique notamment leur activité antioxydante, et les  $\beta$ -glucanes (fibres solubles) (Jadhav et al. 1998).



**Figure 5 :** Localisation des tocots (Vitamine E) et des  $\beta$ -glucans dans le grain d'orge.

La consommation des céréales au Maroc est importante pouvant atteindre jusqu'à 210 Kg par habitant et par an, et c'est dû à une large demande de la farine industrielle. Cependant la consommation de l'orge ne représente que 14% de la consommation totale des céréales (Bartali, 1995).

#### ❖ Utilisations de l'orge

Le grain d'orge a de multiples utilisations dans le maltage, pour le fourrage, et pour l'alimentation humaine (Saidi et *al.*, 2005).

Depuis longtemps l'orge est utilisée pour l'alimentation du bétail, dans le maltage et dans les industries pour la fabrication de la bière. Aujourd'hui, l'utilisation de l'orge dans l'alimentation humaine est très limitée malgré qu'elle est composée d'un degré élevé en  $\beta$ - glucans qui est utile pour réduire le risque de maladies cardio-vasculaires, et aussi pour réduire le taux de cholestérol et de glucose dans le sang (Ullrich, 2011).

## II. Contraintes liées à la culture de l'orge

### 1. Stress biotiques

Au champ, la culture de l'orge est exposée à plusieurs agents pathogènes. Ces derniers provoquent l'apparition de plusieurs maladies influençant négativement la croissance et le développement de cette culture, et réduisent ainsi le rendement en grains. Généralement, ces agents pathogènes sont hétérotrophes ; tirent leurs besoins en carbone à partir des plantes hôtes. Ils peuvent être des bactéries, champignons, virus. Les insectes et nématodes peuvent aussi affecter la productivité des orges.

Les principales maladies de l'orge sont la rayure réticulée, la strie d'orge, le charbon et l'oïdium. Ces maladies sont prédominantes la plupart des années, mais la différence est remarquée au niveau de leur gravité (Shroyer et *al.*, 1990).

La majorité des maladies de l'orge dues aux agents pathogènes affectent les feuilles et les épis. Certains sont des parasites obligatoires et d'autres facultatifs (Tableau 1).

**Tableau 1 :** Les principales maladies et insectes qui attaquent l'orge et leur distribution (Ullrich, 2011)

Maladie	Agent pathogène	Type	Parties infectées	Distribution dans le monde	Existence ou non au Maroc
La fusariose de l'orge : pourriture des racines	<i>Fusarium graminearum</i>	Champignon	Feuilles et épis	Tout le monde.	Développement dans les zones semi arides
La rouille de la tige	<i>Puccinia graminis f.sp tritici</i>	Champignon	Les tiges, les gaines, et le pédoncule de la plante, et même les barbes.	Tout le monde Apparu pour la première fois en Uganda en 1999	Développement dans les régions Tadla, Tassaout, et le Saïs.
Virus de la jaunisse nanisante	Barley yellow dwarf virus (BYDV)	Virus	Toute la plante	Tout le monde	Présent dans tout le Maroc
La mouche de Hess	<i>Mayetiola destructor</i>	Insecte	Le collet et les entre nœuds	L'amérique du Nord, La Russie, L'Europe, et Le Maroc	Nord et centre du Maroc

## 2. Stress abiotiques

Le stress abiotique, que ce soient températures élevées ou basses, sécheresse, anaérobiose, ou anomalies du sol, cause d'innombrables dommages. Il peut toucher les fonctions physiologiques des plantes, empêcher la plante d'exprimer son potentiel génétique, et provoquer ainsi des pertes en grains importantes.

### a) Stress hydrique

La sécheresse est une des contraintes permanentes à la production agricole à l'échelle mondiale. Elle est définie comme la disponibilité de l'eau qui est inférieure à celle nécessaire pour la plante. L'effet de la sécheresse sur la plante est généralement associé à des températures élevées, ce qui définit un niveau supplémentaire de stress chez la plante (Ullrich, 2011).

La présence d'un stress hydrique chez les plantes limite le transport de l'eau du sol vers les parties aériennes, réduisant ainsi le processus de transpiration.

Le déficit hydrique favorise la fermeture des stomates, et provoque des perturbations biochimiques et biophysiques dans le mésophylle.

L'effet simultané du stress hydrique et thermique provoque une limitation de la croissance et de la productivité végétale (Araus et *al.*, 2002).

Les études de Khaldoun et *al.*, (1990) sur l'orge, ont montré un effet distinct et net du déficit hydrique sur les parties aériennes et racinaires. La réduction de la hauteur de la paille est un résultat observé chez les plantes d'orge soumises à un stress hydrique.

Le rendement et la croissance du grain d'orge ont été étudiés par Samarah, (2005), qui a rapporté que les génotypes d'orge soumis au stress hydrique ont un taux de croissance précoce comparativement aux génotypes non stressés. Il a été démontré aussi que le stress hydrique réduit la durée de remplissage des grains, le rendement en grains dus à la réduction du nombre de talles, des épis et des grains par plante.

### b) Stress salin

L'orge est considérée comme la culture la plus tolérante au stress salin parmi les céréales (Walia et *al.*, 2006).

Les effets du stress salin sont exprimés dans deux phases différentes : une phase osmotique rapide ; qui inhibe la croissance des jeunes feuilles, et une phase ionique lente ; qui accélère la senescence des feuilles matures (Munns et Tester, 2008).

Une étude comparative a été faite par Djerah et Oudjehih, (2015), concernant le test de la germination des grains d'orge (*Hordeum vulgare L.*) dans des conditions de stress salin (grains placés dans des solutions de NaCl à 3, 6 ou 9 g/l) et en conditions de témoin (grains placés dans de l'eau distillée).

Cette étude a montré que le stress salin affecte négativement les paramètres étudiés : le taux de germination, la taille des plantules, la longueur et le nombre des racines, ainsi que la biomasse sèche aérienne et racinaire (Nibau et *al.*, 2008).

Les résultats de cette étude ont révélé que la tolérance au stress salin se traduit par le développement d'un système racinaire particulier : les plantules tolérantes ont un pouvoir de maintenir un pourcentage d'allongement racinaire jusqu'à une concentration de 6g/L de sel, et l'effet négatif de ce type de stress a été observé au-delà de cette concentration (Ben Naceur *et al.*, 2001).

Le stress salin induit l'accumulation des ions ( $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) dans les tissus et donc provoque une toxicité directe et un déséquilibre de la nutrition minérale qui est dû aux phénomènes de compétitions entre les éléments minéraux (Djerah et Oudjehih, 2015 ; Soltani *et al.*, 1990).

### c) Stress thermique

#### ❖ Stress thermique chez les plantes

Le stress thermique présente une des contraintes affectant la croissance et le développement des cultures à travers le monde. Il agit au niveau de l'organisation biochimique, physiologique, morphologique de la plante dans différents stades phénologiques. Il agit sur le cycle de vie des cultures, et sur le rendement et ses composantes (Al Khatib et Paulsen, 1984).

Les mécanismes de la tolérance des plantes au stress thermique sont définis au niveau métabolique, biochimique, physiologique et moléculaire.

Les études de Bourdu, (1984) ont montré aussi que des modifications pouvant être mises en place dues aux hautes températures comprenant une réduction du cycle de croissance des cultures et la réduction de maturation de leurs organes. La hauteur des plantes, la biomasse, le rendement, et les paramètres physiologiques sont négativement affectés par les hautes températures.

Le stress thermique agit au niveau de la photosynthèse dans la destruction de la membrane des thylakoïdes en inhibant la chaîne de transport des électrons (Ristic *et al.*, 2007), et provoquant ainsi la réduction du processus de photosynthèse. Par conséquent, la teneur en chlorophylle connaît une réduction par deux manières différentes : soit par le blocage de sa biosynthèse ou par accélération de sa dégradation. L'inhibition de l'assimilation photosynthétique du  $\text{CO}_2$ , l'augmentation de la fluorescence de la chlorophylle, et la destruction du mécanisme de transfert de l'énergie de PSII, sont d'autres effets observés lors des températures élevées.

Ainsi, le stress thermique induit une réduction de la fixation du  $\text{CO}_2$  ce qui affecte négativement l'activité de la Rubisco, et donc une perturbation du processus de la photosynthèse (Dutta *et al.*, 2009).

Les températures élevées et le stress thermique sont principalement liés à une évapotranspiration élevée des feuilles conduisant à une sénescence précoce et à des rendements réduits. Généralement,

elles provoquent un ensemble d'effets résumé en : une perte de l'eau des plantes, une réduction de la croissance, une perturbation de la photosynthèse, un flétrissement, et des pertes de pigmentations des feuilles (Faralli et *al.*, 2015).

Du point de vue transpiration, les températures élevées induisent une ouverture des stomates, ce qui détermine un taux élevé d'échange du gaz entre les feuilles et l'environnement. Ceci provoque par la suite une augmentation de la transpiration des plantes et influence l'assimilation du CO<sub>2</sub> (Najafpour, 2012).

Au niveau moléculaire, les hautes températures affectent le métabolisme des plantes, elles provoquent une déstabilisation de la membrane, une rupture des liaisons hydrogènes des protéines, une augmentation des forces hydrophiles des membranes d'où la fluidité de l'état physique de la plante, et une déformation des molécules fragiles telles que les protéines et les enzymes (Howarth, 2005).

Lorsque les plantes subissent une augmentation progressive de la température, des modifications au niveau de l'expression de certains gènes sont mises en place. Cette augmentation de la température conduit à la synthèse de certaines protéines à n'importe quel stade phénologique, elles sont appelées protéines de choc thermique (HSP : Heat Shock Proteins). Ces dernières sont synthétisées dans les organes végétatifs ou parfois dans les organes reproductifs chez certaines cultures en présence ou absence de conditions de stress thermique (Vierling, 1991).

Ledesma et *al.*, (2004) et Krishnan et *al.*, (1989) ont rapporté que chez certaines plantes et lors des conditions de températures élevées, la synthèse des protéines de choc thermique est liée à une acquisition de la thermotolérance ; même à des températures mortelles.

Ces protéines jouent un rôle important dans la protection du PSII, dans le maintien du transport d'électrons du PSII, et dans la tolérance des plantes au stress thermique (Preczewskiet et *al.*, 2000).

Il existe trois classes de HSPs produites par les plantes lors d'un stress thermique ; On distingue HSP90, HSP70, et LMW HSP (Low Molecular Weight) : protéines à faible poids moléculaire de 15 à 30 Da, et leurs proportions diffèrent selon les espèces (FAO, 2010).

#### ❖ Cas de l'orge

Au niveau physiologique, les réponses des céréales sensibles aux températures élevées se manifestent par un endommagement de l'appareil photosynthétique et une baisse du contenu en chlorophylle des plantes (Hakala et *al.*, 2011).

Généralement, le stress thermique seul ou combiné à la sécheresse affectent simultanément la croissance et le développement des plantes. D'après Jedmowski et *al.*, (2015), l'effet du stress

thermique sur des plantes d'orge affecte leur développement floral, réduit le nombre de grains par plante et inhibe la fonction du PSII.

Selon Hakala et *al.*, (2011), au cours du cycle de développement de l'orge, les rendements réduits sont dû à la sécheresse, aux pluies excessives, à la température élevée en début de saison, et au rythme d'accumulation de la température avant la montaison.

D'autres études ont montré les effets des hautes températures sur les plantes de l'orge. Hossain et *al.*, (2012) ont déclaré que, lorsque les températures sont élevées au stade de la reproduction des plantes d'orge, la durée du cycle de croissance diminue, et le rendement et ses composantes sont également affectés. Une réduction de 46% du rendement en grains d'orge a été observée lorsque la température a augmenté lors de la phase d'élongation de la tige (Ugrate et *al.*, 2007).

Savin et Nicolas (1999) ont rapporté que sous des conditions de stress thermique, la qualité et la quantité de l'amidon des grains d'orge ont diminué. En revanche, le pourcentage de l'azote du grain n'a pas changé en présence ou en absence de conditions de stress thermique.

### 3. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress thermique

Les stress environnementaux ont généralement un effet négatif sur la croissance et le développement des plantes. Pourtant, ces dernières doivent faire face aux différentes perturbations de leur métabolisme causées par ces types de stress. Il s'agit d'une chaîne de réactions initiées par la perception du signal au niveau de la membrane, sa transmission et sa transduction, ce qui engendre la production des facteurs de transcription impliqués dans la réponse des plantes au stress, et qui peut être un ensemble de changements métaboliques biochimiques, morphologiques et physiologiques.

Les mécanismes d'adaptation des plantes se résument en :

L'échappement qui correspond à la capacité de la plante d'achever son cycle de croissance lors des périodes favorables, évitant ainsi les périodes de contraintes hydrique ou thermique (cas des plantes en milieux désertiques).

L'évitement correspond à la capacité de la plante à éviter les phénomènes de déshydratation des tissus, à la fois en maintenant le prélèvement d'eau du milieu et en diminuant les déperditions du composé absorbé. L'un des mécanismes fondamentaux de l'évitement est : l'ajustement osmotique. Ce processus permet notamment le maintien de la turgescence des apex et des feuilles en croissance, qui, associé à l'extensibilité des parois, permet le maintien de la croissance cellulaire malgré la déficience en eau (Calatayud et *al.*, 2013).

### III. Diversité génétique et amélioration de l'orge

Les sources importantes de l'obtention des gènes d'intérêt dans les programmes de sélection variétale sont les ressources génétiques inclues les espèces sauvages apparentées. Les espèces sauvages sont reconnues pour leur grande variabilité génétique et leur tolérance aux stress abiotiques et biotiques (Bothmer *et al.*, 1992).

La composition génétique des espèces cultivées est modifiée suite aux croisements avec ces espèces sauvages. Ces croisements permettent d'apporter des caractères inexistant chez les populations cultivées, ce qui conduit à l'assemblage d'un cumul de nouveaux génotypes. Les gènes transférés aux espèces cultivées regroupent les caractères responsables d'un bon rendement, d'une bonne adaptation aux conditions de culture, et d'une meilleure résistance aux maladies et aux insectes (Abbad et Chahbar, 2005).

Généralement, les croisements entre deux espèces ayant des génomes un peu éloignés donnent des descendance hétérogènes, impliquant des caractères sans intérêt, ou parfois peuvent être stériles (Bouharmont, 1994). Parmi les limites de ces types de croisements, Ullrich (2011) a mentionné l'ouverture partielle des fleurs, immaturité du pollen, et le niveau de réception du pollen dans le stigmate. Il s'agit de l'incompatibilité pollen-style. Ce type de réactions chez les graminées est appelé : système gamétophytique observé lorsque le grain de pollen déposé sur le stigmate ne germe pas (Berthaud, 1980).

Puisque les espèces *Hordeum vulgare* subsp *spontaneum* et *Hordeum vulgare* subsp *vulgare* L. partagent le même génome, leur croisement ne pose aucun problème du point de vue compatibilité et fertilité, donc leur descendance serait totalement fertile (Zohary *et al.*, 2012).

Un exemple d'amélioration a été abordé concernant le transfert des gènes de *Hordeum bulbosum* L., possédant le gène de résistance à l'oïdium, aux orges cultivées. Mais, l'efficacité du transfert des gènes dépend des conditions de croissance ; notamment la température et les génotypes des parents croisés (Pickering, 1989).

Au cours des premiers cycles de division, et après la fécondation, les chromosomes de *Hordeum bulbosum* sont éliminés pour générer des plantes haploïdes (Gernand *et al.*, 2006, Forster *et al.*, 2007). Dans ce type de croisements, il est obligatoire d'effectuer un sauvetage d'embryon pour générer des plantes viables (Carena, 2009).

A travers le monde, la diversité génétique de l'orge n'a pas été abordée ou évaluée correctement. La description et la caractérisation de tous les génotypes reste très difficile, d'où l'utilisation des sous-ensembles de la collection entière ; appelés « core collection ». Ces dernières pouvant conserver au moins 70% des allèles de la collection entière (Liu *et al.*, 2002).

Le programme d'amélioration de l'orge au Maroc a débuté par la sélection des variétés étrangères et leur introduction, ainsi que l'amélioration des variétés d'orge locales. Ce programme d'amélioration a visé l'introduction des gènes d'intérêt aux cultures d'orge cultivée (*Hordeum vulgare* subsp *vulgare*), en utilisant les croisements avec les espèces sauvages (*Hordeum vulgare* subsp *spontaneum*) ; ayant un certain nombre de gènes de résistance à plusieurs maladies (Li et al., 2006), espèce à performance agronomique (Pillen et Leon, 2003), et à possibilité d'avoir une bonne qualité du malt (Matus et al., 2003 ; Erkkila et al., 1998), et donc conférer aux variétés cultivées les caractères désirés.

#### IV. Moyens de sélection des plantes sous conditions de stress

Il existe plusieurs moyens de sélection des plantes, identifiés soit par mesure de la performance agronomique des plantes, soit par mesure des paramètres physiologiques.

La température du couvert végétal est l'un des moyens de sélection utilisé pour indiquer la tolérance des plantes au stress environnemental. Pour la sélection du blé, la température du couvert végétal est un bon critère de sélection pour l'identification des génotypes tolérants les hautes températures (Amani et al., 1996, Reynolds et al., 1998).

Lorsque la quantité d'eau est réduite, les stomates se ferment, donc la température des feuilles change par rapport à celle de l'air. Dans ces conditions les génotypes qui indiquent une faible température de leur couvert végétal vont donc utiliser l'eau disponible dans le sol, ce qui aboutit à la réduction de l'effet du stress hydrique sur le rendement en grains.

Les résultats de plusieurs études montrent que les mesures de la température de la canopée pourraient être utilisées comme technique pour évaluer la réponse des génotypes à la sécheresse (Pask et al., 2012, Garrity et O'Toole, 1995, et Blum, 1996).

La teneur en chlorophylle est un autre critère de sélection des génotypes à haut rendement sous les conditions de stress thermique ou hydrique. Une corrélation négative significative a été trouvée entre la teneur en chlorophylle et le rendement en grains de l'orge (Mohammadi et al., 2009).

La mesure de la fluorescence chlorophyllienne permet la sélection des plantes soumises ou non à un stress. Elle indique l'état de santé général de la plante, même s'elle est affectée par les hautes températures (Mohammadi et al., 2009).

Lorsque l'énergie lumineuse est absorbée par la plante, trois phénomènes peuvent être mis en place : cette énergie soit elle est utilisée dans le processus de la photosynthèse, dissipée en chaleur ou réémise sous forme de fluorescence. Il s'agit de mesurer l'activité du Photosystème II, qui présente une grande variabilité de mesure par rapport au Photosystème I.

La fluorescence chlorophyllienne donne des informations sur l'état du PS II. Elle nous permet de savoir dans quelle mesure le PS II utilise l'énergie absorbée, et dans quelle mesure il y aura endommagement de l'énergie par l'excès de lumière (Baker, 2008).

## V. Importance de l'exploitation des ressources génétiques dans l'amélioration de l'orge

Les ressources génétiques représentent un réservoir important de gènes pour les programmes d'amélioration génétique. Il est donc important de développer des stratégies qui vont préserver ces ressources parce qu'elles représentent la base biologique de la sécurité alimentaire mondiale, afin d'assurer une agriculture et un développement durable. La conservation des ressources génétiques se fait selon deux stratégies :

- Conservation *in-situ* : qui permet la conservation et le sauvegarde de la diversité intra et inter-espèces dans leur écosystème.
- Conservation *ex-situ* : qui consiste à la collecte, le transfert et la conservation des ressources hors leur environnement naturel afin de limiter la perte de la diversité génétique des génotypes et les préserver contre l'extinction.

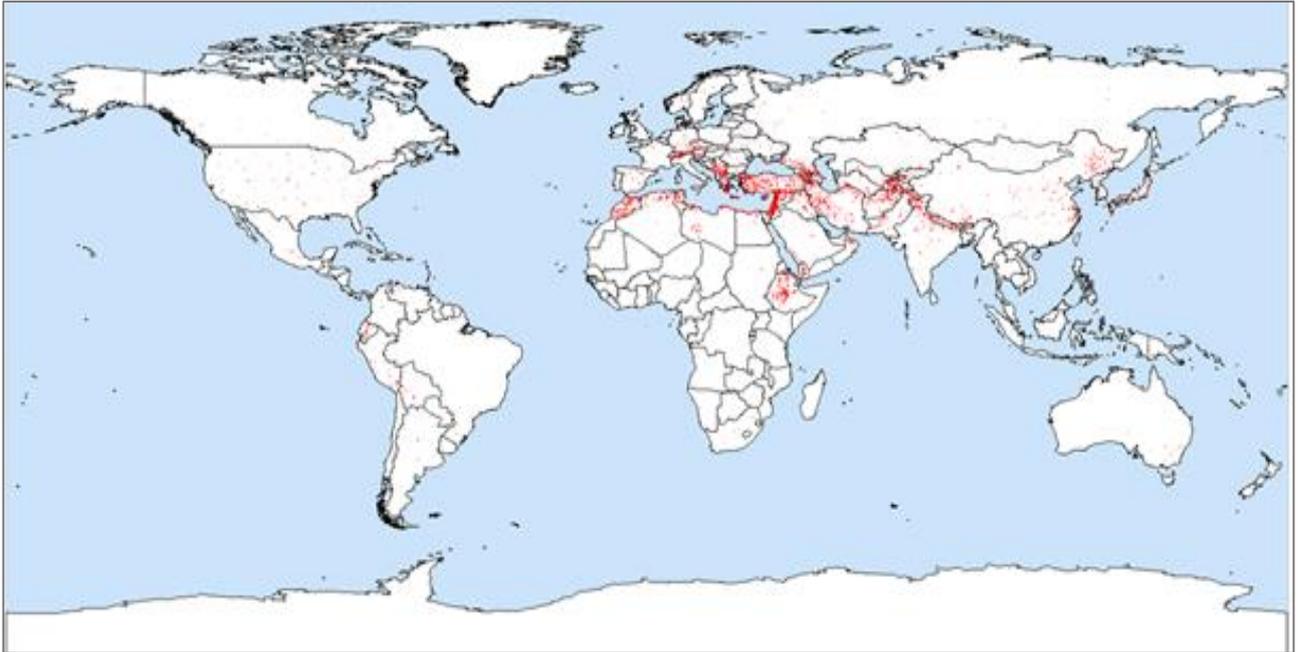
L'utilisation complémentaire de ces deux stratégies permet d'assurer une quantité maximale de la diversité conservée (Gollin et *al.*, 2000, Amri et *al.*, 2015).

### 1. Les collections *ex-situ* (banque de gènes)

La conservation des ressources génétiques dans des banques de gènes est la stratégie la plus importante. Elle permet le maintien de la totalité des ressources en utilisant la conservation active des semences à moyen et à long terme dans des conditions de température et d'humidité contrôlées, dans le but d'exploiter la variabilité génétique existante (Saidi, 2007).

Le centre international de recherche agricole dans les zones arides (ICARDA) est une organisation internationale créée en 1975. Ses activités primordiales sont intégrées dans : l'amélioration génétique, l'évaluation et la maintenance des cultures, dans le cadre des recherches scientifiques, ainsi que la distribution de ces ressources selon la demande, et de donner de l'aide aux pays en voie de développement dans les aspects ayant des traits de développement dans les zones arides. Le programme d'amélioration de l'INRA en collaboration avec l'ICARDA a permis de l'enregistrement de plus de 280 nouvelles variétés d'orge.

L'ICARDA dispose d'une des plus importantes collections d'orge à l'échelle mondiale avec un total de 32 790 génotypes dont 2 575 appartiennent aux espèces sauvages.



**Figure 6 :** Distribution géographique de la collection de l'orge (cultivé et sauvage) à l'ICARDA

## 2. L'approche FIGS : Focused Identification of Germplasm Strategy

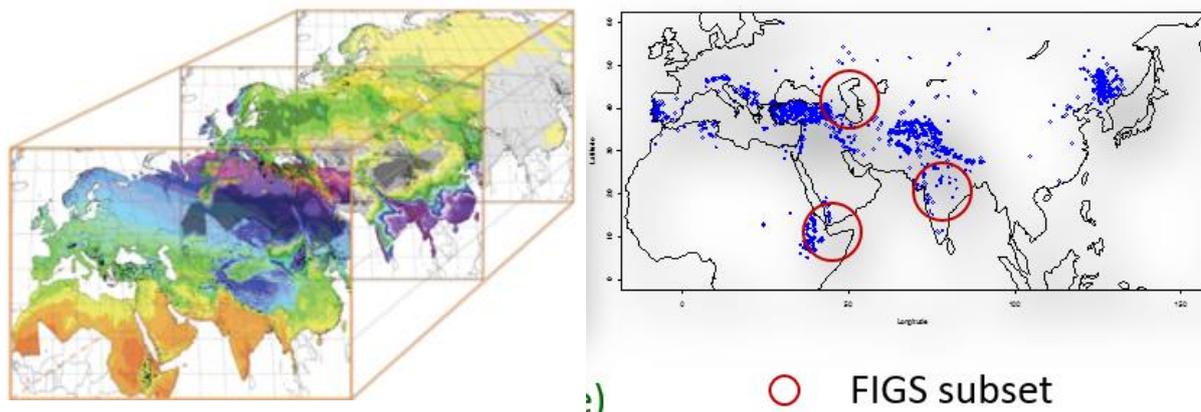
### a) Présentation de l'approche FIGS

Focused Identification of Germplasm Strategy (FIGS) est une approche développée, testée et affinée par une équipe de recherche de l'ICARDA – Centre international de recherche agricole dans les zones arides en collaboration avec l'Institut Vavilov (Russie), la banque de gènes des graines d'Australie. Cette approche utilise les informations disponibles sur l'environnement à partir duquel les génotypes ont été collectés pour prédire les caractères d'adaptation dont elles peuvent disposer (ICARDA, 2013).

### b) Principe de l'approche FIGS

L'approche FIGS consiste à l'utilisation de deux méthodologies distinguées pour lier les caractères adaptatifs à l'environnement dans lequel les génotypes ont été collectés. Ces génotypes ont évolué pendant une longue période leur permettant une meilleure adaptation aux contraintes abiotiques et biotiques.

L'élaboration du modèle de cette approche consiste à rechercher les traits dans des environnements géoréférencés, en tenant compte de la diversité génétique, qui présente un des paramètres les plus importants du gain génétique.



**Figure 7 :** Principales étapes pour la sélection des génotypes d'intérêt par l'approche FIGS

La première méthode utilisée lorsque les données d'évaluation ne sont pas disponibles, consiste à faire un filtrage ; qui sert à présenter la pression de sélection sous forme d'imitations, permettant ainsi de refléter l'environnement d'origine des génotypes à tester. Elle se fait à travers le calcul d'un certain nombre de paramètres (GDD : growing degree days ou température moyenne, l'humidité relative moyenne, la fréquence, les fréquences consécutives...), puis la création d'un index des moyennes pondérées, qui permet de former un sous-ensemble, ayant une forte probabilité de contenir le caractère recherché.

La deuxième méthode, utilisée lorsque les données d'évaluation sont valables, est appelée la modélisation prédictive. Dans ce cas l'application d'un modèle statistique ou d'un algorithme de prédiction des données est nécessaire, afin d'optimiser une fonction liant les données d'évaluation et les données environnementales (linkage trait- environnement). Cela nous permettra de prédire les génotypes pouvant contenir le trait d'intérêt dans le site évalué.

RF « Random Forest » est un exemple de modèle optimisé à ces fins. Il nous renseigne sur deux paramètres qui sont : le nombre de variables prédictives, et le nombre d'arbres de précisions des génotypes prédits et ceux observés. Ces paramètres permettent la mise en place d'une matrice de confusion permettant la visualisation des résultats, et de faire diminuer les résultats retenus (prédites et non observées au site d'évaluation), ainsi de prédire la probabilité de résistance des génotypes.

Les génotypes des zones d'évaluation ont une probabilité plus élevée de contenir les traits et les gènes d'intérêt (ICARDA, 2013).

### c) FIGS comme une stratégie pour identifier les traits d'adaptation aux changements climatiques

L'approche FIGS se base sur l'utilisation des algorithmes associant les caractéristiques environnementales, aux caractères reflétés par le matériel végétal dans l'environnement où il a

évolué. C'est un outil efficace pour rechercher les caractères de résistance des plantes aux maladies et d'adaptation aux changements climatiques. Elle permet de générer et développer une information pouvant donner une idée sur la quantification de la relation entre trait x environnement.

## **Matériel et Méthodes**

## I. Présentation des sites d'expérimentation

Les essais de notre étude sont localisés dans deux stations différentes :

- La station Marchouch, qui se situe dans la région Rabat – Salé – Zemmour – Zaer, située à la latitude : 33 ° 5'N et longitude : -6 ° 7166'E
- La station Wad Medani au Soudan qui est située dans la plaine argileuse centrale de l'État de Gezira (Latitude : 14 ° 24'N, Longitude : 33 ° 31'E, et d'Altitude : 407 m), la texture du sol dans cette station est argileuse lourde, de pH 8,0-8,4, avec une faible teneur en matière organique (<5 %) et de faibles niveaux d'azote (380 ppm) et de phosphore.

## II. Matériel végétal

Pour l'essai de Marchouch (conditions favorables au champ), un total de 77 génotypes d'orge a été évalué. Ils représentent les catégories suivantes : i) 11 variétés commerciales marocaines, ii) 20 variétés commerciales australiennes, iii) 10 lignées prometteuses de l'ICARDA sélectionnées pour les conditions de température, iv) 3 lignées sélectionnées pour leur potentiel de rendement élevé sur une base de plante individuelle en appliquant une sélection intra cultivar au sein d'une variété tunisienne améliorée, et v) 33 accessions (variétés locale ou landrace) sélectionnées par l'approche FIGS pour la tolérance au stress thermique.

Pour l'essai réalisé à Wad Medani au Soudan (conditions de stress thermique), un sous-ensemble de 63 génotypes susmentionnés a été évalué, distribués selon les catégories suivantes : i) 11 variétés commerciales marocaines, ii) 19 variétés commerciales australiennes, iii) 9 lignées prometteuses de l'ICARDA sélectionnées pour les conditions de température, iv) 3 lignées sélectionnées pour leur potentiel de rendement élevé sur une base de plante individuelle en appliquant une sélection intra cultivar au sein d'une variété tunisienne améliorée, et v) 21 accessions (variétés locale ou landrace) sélectionnées par l'approche FIGS pour la tolérance au stress thermique (Annexe 1).

### III. Dispositif expérimental et conduite d'essai

L'essai du site Marchouch a été réalisé durant la campagne 2017 – 2018, dont la date de plantation était le 26/12/2017, et la récolte était le 21/06/2018. Les génotypes ont été distribués, selon le protocole expérimental alpha lattice complet en blocs randomisés avec deux répétitions, dans chaque répétition 11 blocs. La dose de semis est de 300 graines /m<sup>2</sup>, et chaque parcelle élémentaire est constituée de quatre lignes de 2m de longueur et 0,25m espacement entre les lignes. Sachant que la parcelle a été précédée par une culture de pois chiche, la fertilisation par les engrais N, P, K a été appliquée 14-28-14 unités plus 10-20-20, et 33 unités d'azotes sont ajoutées au stade tallage. L'essai est conduit sous régime pluvial.

L'essai du site Wad Medani au Soudan a été réalisé durant la campagne 2017 – 2018. La date de semis était le 07/12/2017. Les génotypes ont été distribués en deux répétitions, selon le protocole expérimental alpha lattice complet en blocs randomisés. Chacune des répétitions comprend 9 blocs, avec 7 génotypes par bloc. La parcelle élémentaire est composée de 4 lignes de 2m de longueur, espacées de 0.25m. La dose de semis est de 300 graines/m<sup>2</sup>. Les grains ont été traités par un mélange insecticide et fongicide : Celest top vitavax afin d'éviter la distribution des maladies transmises par semences comme les caries, les charbons et la fusariose. L'essai est conduit sous irrigation complète.

### IV. Données collectées

Durant la période de plantation, un certain nombre de paramètres physiologiques et agronomiques ont été mesurés dans les deux stations Marchouch et Wad Medani, afin de comparer les performances agronomiques des génotypes dans les deux environnements.

Deux autres paramètres physiologiques ont été pris dans la station Wad Medani qui indiquent l'état de santé des plantes : Le contenu en chlorophylle comme un indicateur de la présence et le niveau du stress, et la couverture végétale qui nous renseigne sur le pourcentage de surface du sol couverte par le feuillage, ainsi que la vigueur précoce des plantes.

#### 1. Traits physiologiques

##### a) La Fluorescence chlorophyllienne

La fluorescence chlorophyllienne est un paramètre qui représente la mesure quantitative des performances photosynthétiques des plantes dans les conditions de stress, c'est un moyen de prévoir la tolérance au stress hydrique et thermique. Il s'agit de mesurer l'activité du Photosystème II, qui présente une grande variabilité de mesure par rapport au Photosystème I (Krause et Weis 1991).

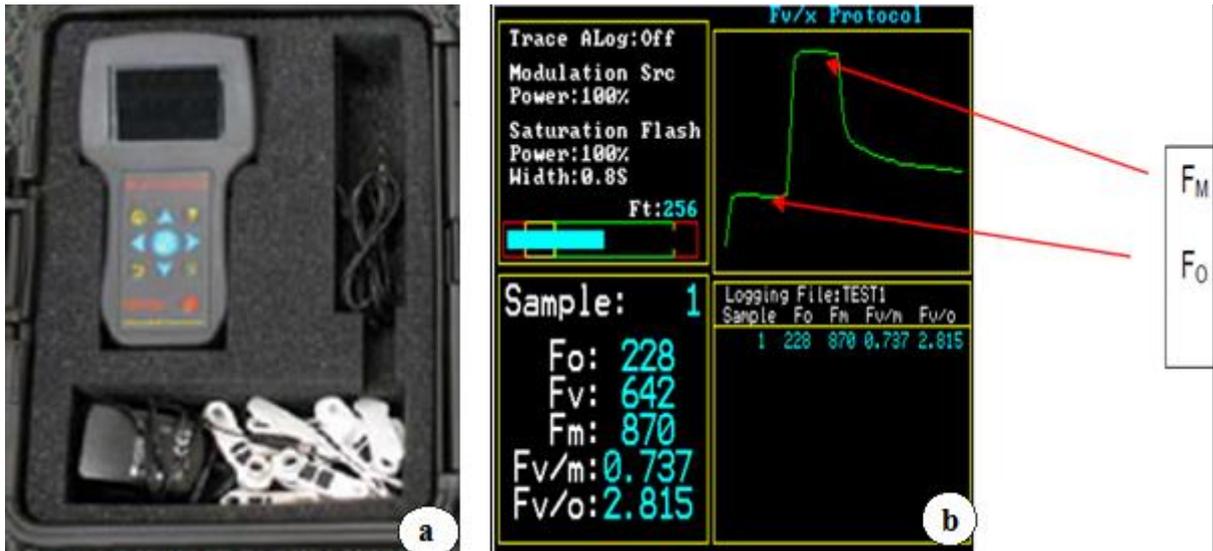
La prise des mesures au champ a été faite à l'aide d'un fluoromètre Os30p+. Les mesures ont été prises sur la face ventrale de la feuille étendard (Flag leaf) dans trois différentes feuilles dans chaque parcelle élémentaire en évitant les bordures. Les feuilles ont été soumises à environ 20 à 30 min d'obscurité pour fixer un point de référence non contraint par rapport aux mesures des parties de la plante non obscures. Les clips sont placés dans la surface foliaire obscure et puis placer l'appareil pour prendre les mesures.



**Figure 8 :** Méthode de prise des mesures de la fluorescence chlorophyllienne au champ (a) à la station Marchouch, et (b) à la station Wad Medani, par le fluoromètre type OS-30p+

Durant la période d'obscurité, la chaîne de transfert d'électrons sera donc vide et les centres réactionnels seront disponibles. Lorsqu'on lance la mesure, l'appareil émet un flash lumineux sur la face obscure. Il y aura donc saturation des accepteurs d'électrons du PSII pouvant atteindre un régime stationnaire. Ainsi, l'intensité de fluorescence est affichée (Benderraji, 2013).

Le fluoromètre affiche le résultat en forme de courbe appelée courbe OJIP, dont O représente la fluorescence minimale à l'état adapté à l'obscurité, J et I représentent les points d'inflexions ou de changement de la courbe, et P représente le pic à l'intensité de fluorescence maximale.



**Figure 9 :** (a) Appareil de mesure de la fluorescence chlorophyllienne et (b) le résultat affiché sur l'écran après mesure

Les paramètres calculés et mesurés par l'appareil sont affichés et ils représentent :

**F<sub>0</sub>** : C'est la fluorescence minimale à l'état initial ( $t=2\mu s$ ), il s'agit d'une intensité de la fluorescence dans le temps où tous les centres réactionnels du PSII sont ouverts (quinones oxydées) et lorsque les feuilles sont adaptées à un temps d'obscurité de 20 à 30 min.

**F<sub>m</sub>** : C'est la fluorescence maximale, intensité de la fluorescence lorsque tous les centres réactionnels du PSII sont exposés au maximum de l'intensité lumineuse et sont donc tous saturés, réduits et fermés. Cette mesure est prise toujours dans les mêmes conditions adaptées à l'obscurité.

**F<sub>v</sub>** : C'est la fluorescence variable. Elle est calculée comme la différence entre la fluorescence maximale et la fluorescence initiale  $F_v = F_m - F_0$ .

**F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>** : Représente le rendement photosynthétique. C'est une mesure de l'efficacité quantique maximale du PSII chez les plantes. Noté comme rapport  $F_v/F_m$ , avec  $F_v = F_m - F_0$ . Ce rapport montre un degré de corrélation élevé avec le rendement quantique d'une photosynthèse nette. Généralement chez une plante saine non stressée, ce rendement photosynthétique est d'environ 0.8 et en cas de stress cette valeur diminue.

**F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub>** : Représente le paramètre le plus sensible, il permet la détection de la présence du stress (Manuel 1, 2012).

#### b) Le contenu en chlorophylle des feuilles

C'est un paramètre qui nous indique sur le contenu en chlorophylle dans les feuilles des plantes. Les mesures sont faites sur des petites surfaces de 2 – 3 mm de la face ventrale des feuilles étendards. Ce paramètre nous donne une idée sur l'état nutritionnel de la plante.

Les mesures ont été effectuées uniquement à la station Wad Medani au Soudan. Le détecteur de l'appareil a été appliqué directement sur la feuille étandard. C'est un paramètre mesuré à Wad Medani utilisant le SPAD (Soil and Plant Analyze Development), révélant l'association de la couleur des feuilles avec la tolérance à la sécheresse sous conditions de stress hydrique. Ainsi, il permet le calcul d'une valeur numérique (en unité CCI : Chlorophyll Concentration Index) qui est proportionnelle à la quantité de chlorophylle présente dans les feuilles, d'une manière rapide et non destructive d'échantillons.

Les mesures ont été prises durant trois stades phénologiques différents : stade trois feuilles, début tallage, et période avant épiaison.

### c) La température du couvert végétal

La température de la canopée correspond à l'évaluation de la réponse des plantes au stress environnemental : stress hydrique et thermique. C'est une mesure utilisée comme un indicateur d'adaptation à la sécheresse et de la performance du rendement sous ces conditions. Il s'agit d'une mesure plus sensible à l'environnement et fortement liée à la transpiration (Pask *et al.*, 2012).

**Période de mesure au champ** : avant épiaison jusqu'à début épiaison

La prise des mesures de la température de la canopée au champ a été réalisée à l'aide d'une caméra thermique, permettant la prise d'une photo thermique révélant l'état thermique de chaque parcelle élémentaire (température maximale et minimale) en conditions de jour ensoleillé.

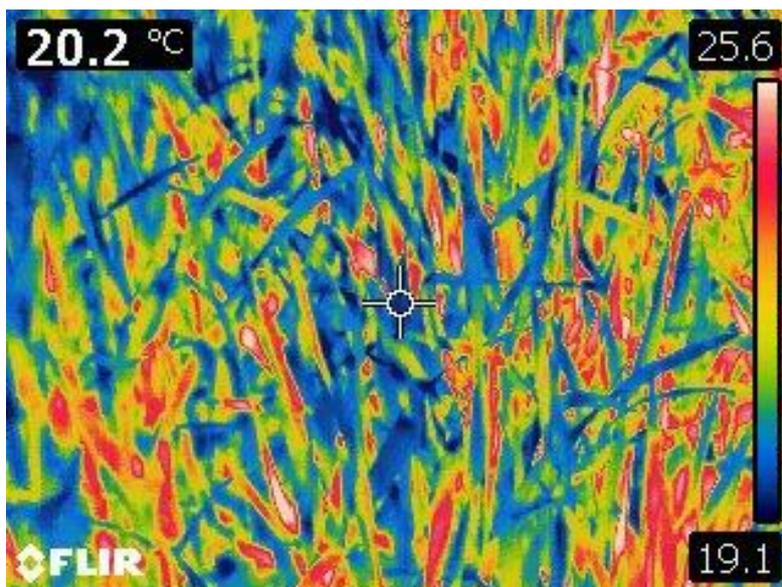


Figure 10 : Exemple de photo thermique prise par l'appareil thermique

Les données ont été collectées et analysées par le logiciel FLIR tools, qui sert à positionner trois spots ou plus dans la même parcelle élémentaire. Ces spots sont positionnés dans les feuilles en couleur bleue, elles présentent une température moyenne.

Les feuilles représentées en rouge indiquent la température maximale dans la parcelle élémentaire. Il faut éviter le positionnement des spots dans ces feuilles.

Les spots positionnés sur la photo doivent avoir une température comprise entre le minimum et le maximum affiché à la droite de la photo. Les valeurs ont été enregistrées et le calcul de la température moyenne du couvert végétal de chaque parcelle élémentaire a été effectué.

#### d) Couverture végétale ou Ground cover

C'est une mesure importante permettant l'établissement de la culture, et indiquant la vigueur précoce des plantes. Lorsqu'une surface est totalement couverte par le feuillage, l'évaporation du sol diminue, ce qui conduit à l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau.

Parmi les méthodes de mesure de la couverture du sol on cite :

\*L'estimation et l'évaluation visuelle, qui est une méthode subjective et ne permet pas de distinguer entre les génotypes.

\*Analyse des photos prises par un camera digital comme mesure objective et quantitative (Pask et *al.*, 2012).

A la station Wad Medani, trois mesures ont été prises au champ durant trois stades phénologiques différents : stade trois feuilles, début tallage, et période avant épiaison.

Après l'analyse des photos digitales, le calcul du pourcentage ground cover par la relation suivante :

$$\%GC = (\text{Mean Grey Value} / 255) * 100$$

Dont : Mean Grey Value : elle est fonction de la profondeur de luminosité des pixels de la photo prise par chaque parcelle élémentaire, et varie entre 0 pour les photos noires et 255 pour les photos blanches (Pask et *al.*, 2012).

## 2. Performances agronomiques

### a) Cycle de croissance des génotypes

#### ❖ Nombre de jours à l'épiaison

La date d'épiaison représente une étape clé du développement pour améliorer le rendement et l'adaptation. Généralement elle est influencée par les conditions environnementales (Alqudah et Schnurbusch, 2017).

La date d'épiaison est notée quand plus de 50% des plantes de la parcelle élémentaire ont développé l'épi. Cette date est utilisée pour le calcul du nombre de jours à l'épiaison par la relation suivante :

$$\text{Nombre de Jours à l'épiaison} = \text{Date d'apparition des épis} - \text{Date de premières pluies significatives ou de la première irrigation.}$$

#### ❖ Nombre de jours jusqu'à maturité

La date de maturité des grains est enregistrée, quand, plus de 50% de plantes de la même parcelle élémentaire présentent des grains mûrs, la date de maturité a été utilisée pour calculer le nombre de jours jusqu'à maturité utilisant la relation suivante :

$$\text{Nombre de Jours jusqu'à maturité} = \text{Date de maturité des grains} - \text{Date de premières pluies significatives ou de première irrigation.}$$

Ce paramètre incluant les stades de maturité des grains depuis leur stade laiteux (début épiaison) jusqu'au stade grains mûrs. Il est calculé par la relation :

$$\text{Remplissage des grains} = \text{Nombre de jours jusqu'à maturité} - \text{Nombre de jours à l'épiaison.}$$

#### ❖ Hauteur de la plante

La hauteur des plantes est indiquée comme la distance, en centimètres, entre le sol et le sommet de l'inflorescence, à l'exclusion des barbes.

Les mesures de hauteurs des plantes et de la longueur de l'épi sans barbes et avec barbes ont été effectuées sur trois plantes par parcelle élémentaire. La moyenne des trois valeurs a été calculée pour servir dans l'analyse statistique.

## b) Rendement et ses composantes

### ❖ Nombre d'épis par mètre carré

**\*Date du dénombrement** 10, 12, et 20 Juin 2018

Représente un paramètre d'adaptation en conditions méditerranéennes arides, et constitue une des composantes importantes du rendement (Hadjichristodoulou, 1993), il change avec les variétés et les conditions de culture (Guérif et Seguin, 1991).

Le dénombrement a été réalisé dans les deux lignes centrales de la parcelle élémentaire, à l'aide d'un carré en fer (0.5m par arrêt). Le comptage manuel d'épis entrant dans le carré mène au calcul du nombre exacte d'épis/m<sup>2</sup> en multipliant le nombre trouvé par 4.

### ❖ Nombre de grains par épi

C'est une des composantes du rendement les plus importantes. Elle dépend de la fertilité des épillets et joue un rôle dans la variabilité du rendement (Auriau et *al.*, 1992).

Au champ, à partir d'un même génotype, trois épis ont été collectés afin de mesurer leur longueur (cm) et de calculer le nombre moyen de grains qu'ils comportent. La mesure de la longueur des épis a été effectuée à l'aide d'une règle, et le nombre de grains par épi a été effectué manuellement pour les trois épis collectés par parcelle élémentaire.



**Figure 11** : Mesure de la longueur des épis et du nombre de grains par épi

### ❖ Rendement en biomasse et en grains

Après la récolte des lignes centrales de chaque parcelle élémentaire, et avant battage, la biomasse (paille et grains) a été pesée, c'est un paramètre utilisé pour l'estimation du rendement biologique (BY : Biological Yield).

Après battage de la biomasse, l'ensemble de grains recueillis ont été pesés afin d'estimer le rendement en grains pour chaque génotype (GY : Grain Yield).

Le rendement biologique et le rendement en grains sont représentés en kg/ha. Ils sont utilisés pour le calcul de l'indice de récolte (HI : Harvest Index) représenté en pourcentage, par la relation :

$$HI = (GY/ BY) *100.$$

L'indice de récolte permet de mesurer le succès et l'efficacité de la reproduction. Il est influencé par les températures extrêmes, et sa variation dépend de la variabilité des climats et des sols (Unkovich et al., 2010).

### ❖ Poids de 1000 grains

C'est la principale composante du rendement et qui reflète un des importants traits agronomiques. Elle nous permet de déterminer le rendement en grains (Auriau et al., 1992).



**Figure 12 :** Compteur automatique de grains pour la détermination du poids de mille grains. Après la récolte des deux génotypes, le poids de 1000 grains a été déterminé à la station Marchouch en utilisant un compteur automatique de type Data Count S25 qui nous permet de dénombrer 1000 grains et par la suite les peser en utilisant une balance.

### 3. Calcul des indices de tolérance au stress thermique

Pour estimer la tolérance des génotypes étudiés au stress thermique, les indices suivants ont été utilisés :

a) Heat Tolerance Efficiency (HTE) : Efficacité de tolérance à la chaleur

Proposé par Fisher et Wood (1981), calculé par la relation suivante :

$$HTE = 100 \times \frac{Y_{si}}{Y_{pi}}$$

Dont :  $Y_{si}$  : Rendement en grains des génotypes sous conditions de température élevée (environnement stressé)

$Y_{pi}$  : Rendement en grains des génotypes dans l'environnement non-stressé

b) Heat Susceptibility Index (HSI) : Indice de susceptibilité à la chaleur

Proposé par Fisher et Mauer (1978), calculé par la relation suivante :

$$HSI = \frac{1 - \frac{Y_{si}}{Y_{pi}}}{1 - \frac{X_s}{X_p}}$$

Dont :  $Y_{si}$  : Rendement en grains sous l'effet du stress thermique

$Y_{pi}$  : Rendement en grains dans l'environnement non-stressé

$X_s$  : Moyenne du rendement en grains de tous les génotypes sous conditions de stress thermique

$X_p$  : Moyenne du rendement en grains de tous les génotypes sous conditions non-stressées

c) Heat Tolerance Index (HTI) : Indice de tolérance à la chaleur

Proposé par Fernandez (1993), calculé par la relation suivante :

$$HTI = \frac{Y_{si} * Y_{pi}}{X_p^2}$$

Dont :  $Y_{si}$  : Rendement en grains des génotypes sous conditions de stress thermique

$Y_{pi}$  : Rendement en grains des génotypes dans l'environnement non-stressé

$X_p$  : Moyenne du rendement en grains de tous les génotypes sous conditions non-stressées

d) Moyenne géométrique (GM)

Proposée par Fernandez (1993), calculée par la relation suivante :

$$GM = \sqrt{Y_{si} * Y_{pi}}$$

Dont :  $Y_{si}$  : Rendement en grains des génotypes sous conditions de température élevée (environnement stressé)

$Y_{pi}$  : Rendement en grains des génotypes dans l'environnement non-stressé

L'interprétation de ces indices se fait selon leur signification physiologique, et selon leurs valeurs optimales. Généralement, les génotypes plus performants sous les deux conditions indiquent des valeurs élevées de HTE (Heat Tolerance Efficiency), HTI (Heat Tolerance Index), et de GM (Geometric Mean), tandis qu'ils indiquent des valeurs faibles de HSI (Heat Susceptibility Index).

## V. Analyse statistique des données

L'analyse de la variance (ANOVA) avec trois facteurs (génotypes, blocs et répétition) a été réalisée pour tous les paramètres mesurés, en tenant compte du protocole expérimental alpha lattice. En raison du nombre différent de génotypes impliqués dans chaque essai, l'analyse des données a été effectuée séparément pour chaque environnement. Les meilleures estimations linéaires objectives (BLUE : Best Linear Unbiased Estimates) ont été calculées, ainsi que, l'erreur-type des différences des moyennes utilisées pour déterminer les différences significatives. Des coefficients de corrélation simples entre tous les caractères ont été calculés pour tous les génotypes dans chaque environnement. L'analyse en composantes principales (ACP) a également été menée sur la base de chaque ensemble de données d'essais afin d'identifier les principaux caractères contribuant à la variabilité observée entre les génotypes.

De plus, pour chaque environnement, les génotypes ont été regroupés selon leurs catégories de reproduction respectives, à savoir les variétés commerciales marocaines (MV), les variétés commerciales australiennes (AV), les lignées élite de l'ICARDA (EL), les sélections intra-cultivars (IS), et les variétés locales (landraces) sélectionnées par l'approche FIGS (LA\_FIGS). Sur la base de ces groupes, des comparaisons des moyennes en tant qu'échantillons indépendants ont été effectuées en utilisant le test t pour  $\alpha = 0,05$ .

Pour identifier les génotypes performants à haut rendement et tolérants au stress thermique, une analyse de régression a été effectuée de deux manières : i) en utilisant les données de rendement en grains (GY) dans un environnement favorable (Marchouch) et stressé (Wad Medani), et ii) en utilisant les données sur le rendement en grains dans un environnement favorable (Marchouch) et les données basées sur l'indice de tolérance thermique calculé pour chaque génotype.

Le logiciel Excel a été utilisé pour calculer les indices de tolérance au stress thermique, tandis que l'analyse de la variance a été effectuée à l'aide de la version 64 bits de logiciel statistique R version 3.4.2 (R Development Core Team, 2017) et du logiciel statistique JMP. 14.0.0 (SAS Institute, 2018).

## **Résultats et discussion**

# I. Les données climatiques

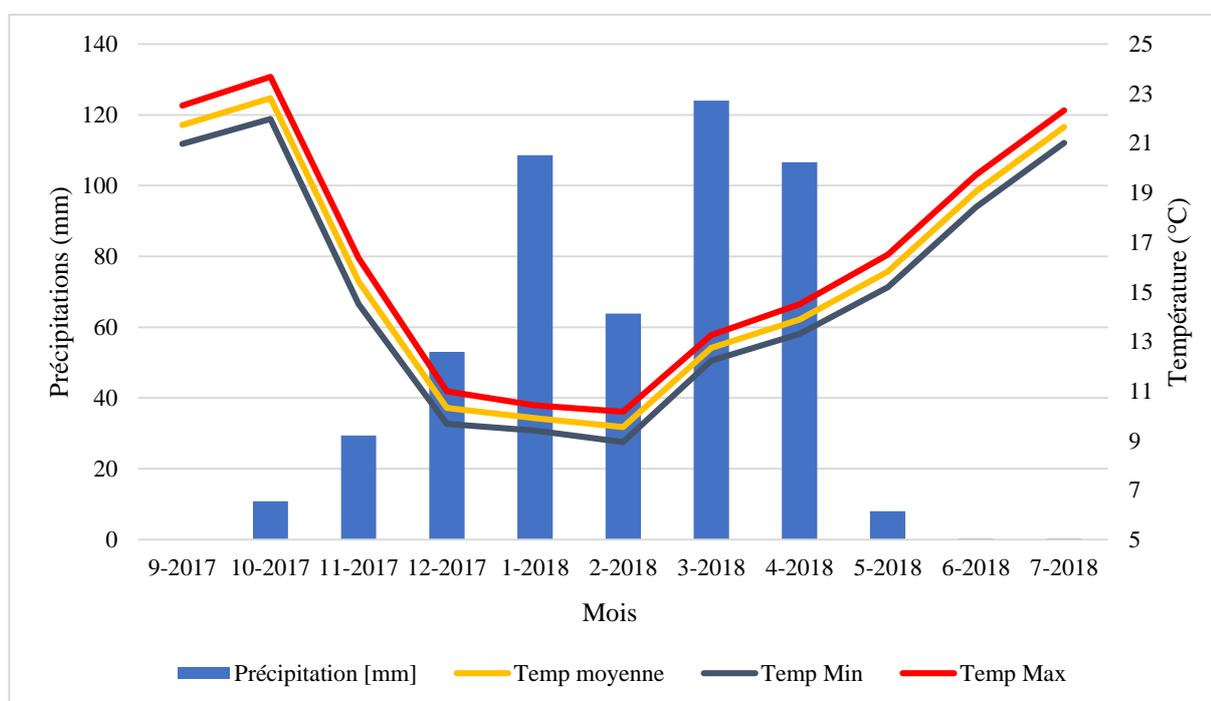
## 1. Station Marchouch

Durant le cycle de culture des génotypes (Décembre 2017 – Juin 2018), le climat de la station Marchouch a connu des fluctuations d'un mois à l'autre au niveau des précipitations et des températures diurnes (Figure 13). Les conditions climatiques sont en général favorables pour le développement des céréales.

La pluviosité durant la campagne 2017 – 2018 a subi une grande variabilité, le maximum des précipitations a été enregistré au mois de Mars avec 124 mm de précipitations. Le minimum de précipitations a été enregistré au mois de Juin 2018 avec 0,2 mm, cette période sèche a coïncidé avec la période de maturation et de remplissage des grains.

Nous remarquons ainsi une augmentation des précipitations pendant les premiers stades de croissance, allant de 53 mm en début de saison (Décembre), - jusqu'à 108 mm en mois de Janvier. Cette période de précipitations élevées engendre la disponibilité de l'eau dans le sol, et sa contribution rapide dans la germination et l'émergence des plantules quelques jours après le semis.

La température moyenne de la période de culture était de 14,11°C. Le maximum a été observé en mois de Juin 2018 avec une valeur de 19,05°C. Et le minimum de température enregistré durant cette campagne était de 8,93°C en mois de Février (Figure 13).



**Figure 13 :** Données climatiques dans la station Marchouch de la saison agricole 2017 – 2018

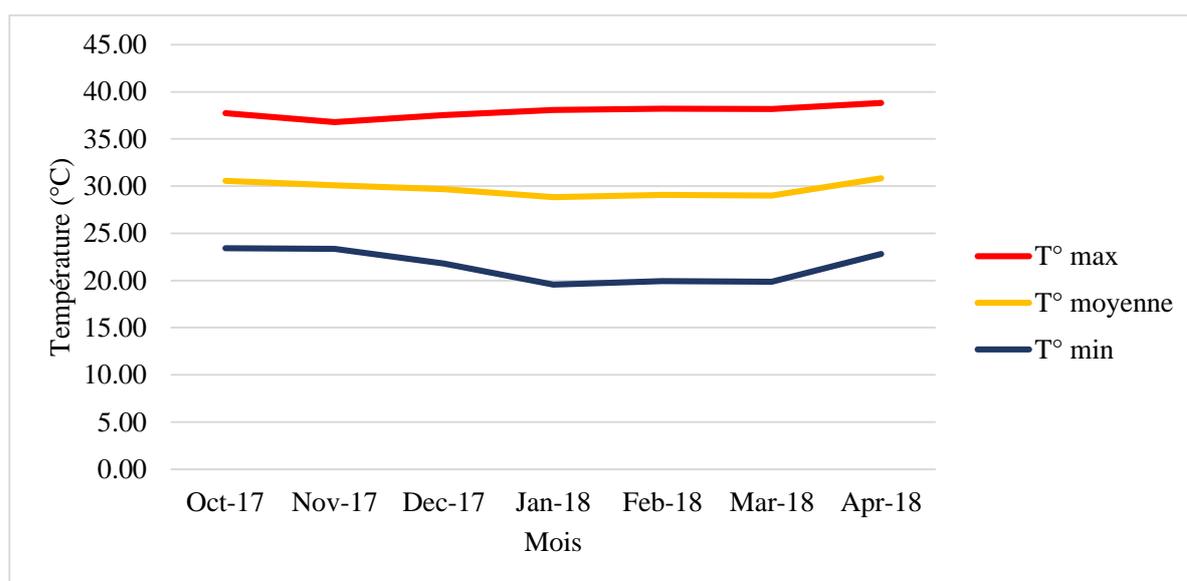
## 2. Station Wad Medani

La figure 14 représente la variation des données climatiques dans la station Wad Medani durant campagne 2017 – 2018.

La pluviosité dans cette station était totalement absente durant la période de plantation des génotypes. Cependant, la température enregistrée dans cette station était élevée par rapport à celle enregistrée à Marchouch. Pour cet essai, il y avait une irrigation complète durant toute la campagne pour éviter l'effet du stress hydrique.

Une faible variation des températures maximale, moyenne et minimale a été marquée dans cet environnement. La température moyenne était de 30°C durant toute la période de culture.

La température maximale enregistrée durant cette campagne était de 38,58°C en mois d'Avril, tandis que la température minimale a été enregistré en mois de Janvier 2018 avec 19,58°C (Figure 14).



**Figure 14 :** Données climatiques dans la station Wad Medani de la campagne agricole 2017 – 2018

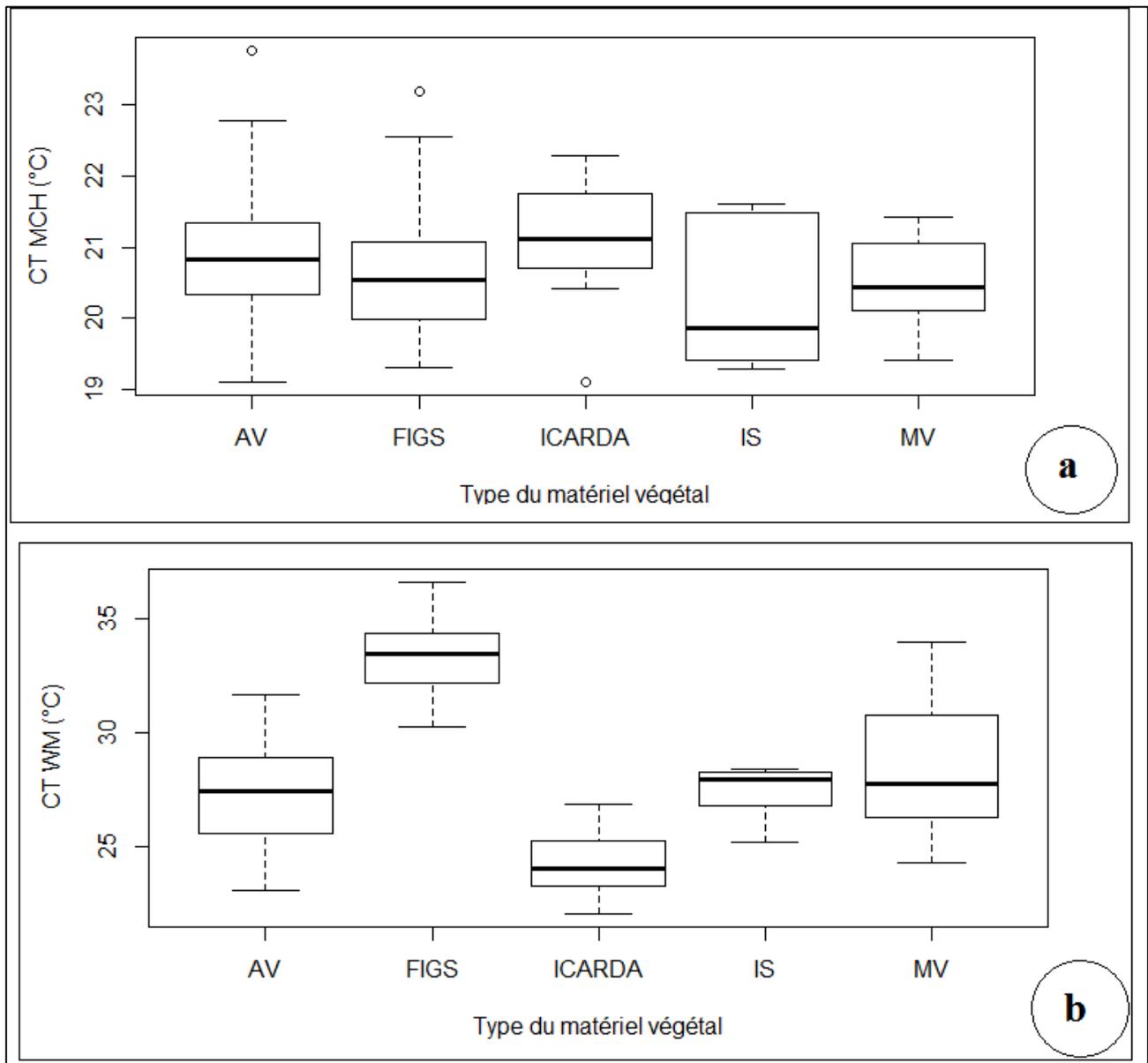
## II. Traits physiologiques et agronomiques des génotypes étudiés

Pour les paramètres physiologiques et agronomiques, les résultats sont présentés dans les figures et tableaux ci-dessous, qui visualisent les différences observées entre les paramètres dans les deux environnements (Marchouch et Wad Medani).

## 1. Traits physiologiques

### a) Température du couvert végétal

Les photos thermiques prises par l'appareil thermique ont été traitées par le logiciel Flir tools. Après l'analyse des données et le calcul des moyennes ajustées, la variation de la température du couvert végétal est représentée dans Annexe 2 et figure 15.



**Figure 15 :** Variation de la température du couvert végétal en fonction du type de matériel végétal des génotypes d'orge dans les stations (a) Marchouch et (b) Wad Medani durant la campagne agricole 2017-2018.

Les valeurs de la température du couvert végétal prises à Wad Medani présentent des valeurs élevées par rapport à celles prises à Marchouch (Figure 15). Ceci peut être due aux températures environnementales élevées enregistrées dans la station Wad Medani, ce qui a entraîné l'augmentation de la température du couvert végétal.

L'analyse de la variance de ce paramètre dans les deux stations a montré que, dans la station Marchouch, aucune différence significative n'a été observée entre les géotypes pour la température du couvert végétal ( $p = 0.175 > 0,05$ ), tout en notant un faible coefficient de variation de 2,5% (Annexe 3).

A la station Wad Medani, on remarque qu'il y a une différence hautement significative entre les géotypes et entre les blocs ( $p < 0,001$ ). Cette différence peut être sous l'effet des hautes températures marquées dans la station d'expérimentation. Le coefficient de variation à Wad Medani est autour de 4%. (Annexe 4).

Parmi les géotypes qui ont présentés une température faible de leur canopée dans les conditions favorables : une variété Australienne (Keel), une variété Marocaine (Laanaceur), et trois variétés LA-FIGS (26371, 27641, 28033). La température moyenne du couvert végétal dans cette station était de 20,77° (Annexe 3).

Dans la station Wad Medani, les géotypes ayant présenté des températures faibles de leur couvert végétal sont : trois variétés marocaines (Laanaceur, Martime, Aglou), deux accessions LA-FIGS (27631, 27646), une lignée sélection intra-cultivars IH17, une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-1) et deux variétés Australiennes (Skipper, Sloop VIC). La température moyenne du couvert végétal dans cette station était de 29,30°C (Annexe 4).

Les résultats trouvés pour ce paramètre sont en accord avec ceux rapportés par Reynolds *et al.*, (1994), qui ont indiqué que, les géotypes tolérants aux stress hydrique et thermique maintiennent une température maximale de leur feuillage comparativement aux géotypes sensibles. Ceci est dû à une faible turgescence foliaire au moment de la fermeture des stomates sous stress.

#### b) Fluorescence chlorophyllienne

Les résultats de l'analyse de la variance des paramètres de la fluorescence chlorophyllienne à la station Marchouch montrent une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les géotypes pour F0 et Fv/Fm. La moyenne du rendement photosynthétique dans ces conditions était de 0,75 (Annexe 3).

D'après les résultats présentés dans Annexe 3, à la station Marchouch, il existe une différence significative entre les géotypes pour les paramètres F0, Fv, et Fm, mais elle est totalement absente pour Fv /Fm et Fv/F0 à la station Wad Medani (Annexe 4).

Les valeurs des paramètres de la fluorescence chlorophyllienne (F0, Fv, Fm, Fv/ Fm, et Fv/F0) à la station Wad Medani sont relativement faibles comparées aux valeurs à la station Marchouch.

#### ❖ Fluorescence minimale : F0

Les valeurs de F0 sont représentées dans Annexe 2 dans les deux stations d'expérimentation :

La valeur moyenne de F0 mesurée à Marchouch était de 188,15. Parmi les variétés qui ont présenté des valeurs élevées de F0, six accessions sélectionnées par l'approche FIGS (16975, 26371, 26375, 27631, 27640, 27641), une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16 -7), deux variétés Marocaines (Oussama, Rabat 071), et une variété Australienne (Gairdner).

Pour la station Wad Medani la moyenne enregistrée est de F0 = 141,91. Les variétés présentant des valeurs élevées de F0 sont : sept variétés sélectionnées par l'approche FIGS (16955, 26371, 26375, 27640, 27646), une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-7), une variété Australienne (Westminster), et une lignée de sélection intra-cultivars (IH4-H4) (Annexe 2).

Le minimum de F0 a été enregistré chez la variété Australienne (Martime) et la variété Marocaine (Laanaceur).

#### ❖ Fluorescence variable : Fv

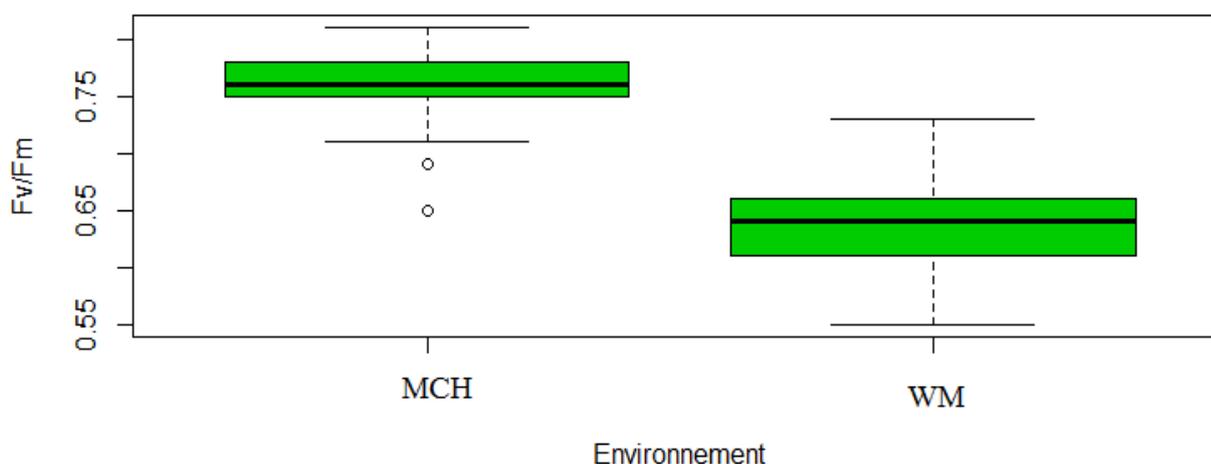
Dans les conditions favorables, la moyenne de Fv était de 600,37. Les variétés LA-FIGS (27631 et 27652) représentaient respectivement le maximum (740,33) et le minimum (429,88). Par contre, sous conditions de stress thermique, la moyenne de Fv à la station Wad Medani était de 253,83, dont le maximum a été enregistré chez le géotype LA-FIGS 27640 avec 417,27, et le minimum a été marqué chez la variété Australienne Keel avec 160,72 (Annexe 2).

#### ❖ Fluorescence maximale : Fm

A la station Marchouch, la moyenne de la fluorescence maximale a été marquée de l'ordre de 789,31. Les variétés LA-FIGS (27631 et 27652) représentaient respectivement le maximum de fluorescence maximale (948,07), et le minimum de la fluorescence maximale 588,88. Dans les conditions de stress thermique, la moyenne de la fluorescence maximale était de 397,27, dont le maximum est enregistré aussi chez la variété LA-FIGS 27640 (590,42), et le minimum enregistré chez la variété Australienne Keel avec 257,16 (Annexe 2).

❖ Rendement photosynthétique :  $F_v / F_m$

L'allure générale du rendement photosynthétique  $F_v/F_m$  dans les deux environnements est représentée dans la figure 16.



**Figure 16 :** Variation du rendement photosynthétique  $F_v/F_m$  des génotypes d'orge dans les deux stations Marchouch (MCH) et Wad Medani (WM) durant la saison agricole 2017 – 2018

Une variation existe entre les génotypes et entre les stations : à la station Marchouch les valeurs du rapport photosynthétique chez tous les génotypes sont élevées par rapport à celles à la station Wad Medani.

A la station Marchouch, on remarque qu'il existe une légère variation de  $F_v/F_m$ , dont le maximum a été marqué par la valeur 0,79 pour la variété heat 16-8 (ICARDA) suivie par trois variétés sélectionnées par l'approche FIGS (22957, 27631, 28033), trois variétés Marocaines (Acsad 60, Adrar, Oussama), et trois variétés Australiennes (Barque, Capstan, Hindmash) avec des rendements photosynthétiques élevés.

A la station Wad Medani, le maximum a été observé chez la variété LA-FIGS (27640) avec une valeur de  $F_v / F_m=0.70$ , ainsi que trois autres variétés LA-FIGS (16955, 26375, 27641), trois variétés Marocaines (Acsad 60, Adrar, BL16), une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-8), et deux variétés Australiennes (Gairdner et Schooner) qui ont des valeurs élevées (Annexe 2).

Le minimum du rendement photosynthétique dans les deux stations était de 0,69 et 0,56 marqués pour les génotypes 27646 et heat 16-9, respectivement, dans les stations Marchouch et Wad Medani (Annexe 2).

#### ❖ Le ratio Fv/F0

La moyenne observée pour ce paramètre sous conditions favorables était 7,35 comparativement aux conditions stressées dont la moyenne était de 1,38. A la station Marchouch le maximum a été enregistré chez la variété (heat 16-8) avec 3,84. Le minimum a été enregistré chez la variété LA-FIGS 27646 avec 2,35. A la station Wad Medani, le maximum a été enregistré chez la variété LA-FIGS 27640 avec 2,40. Le minimum a été enregistré chez la variété (heat 16-9) avec 1,31 (Annexe 2).

En comparant les résultats obtenus dans les deux conditions, on remarque que les valeurs des paramètres de la fluorescence chlorophyllienne sont faibles dans les conditions de stress par rapport à celles en conditions non stressées. La variabilité du rendement photosynthétique entre les deux stations est claire. Une moyenne de 0,63 a été obtenue dans les conditions stressées (minimum 0,5 et maximum 0,7), comparée à celle dans les conditions non – stressées 0,75 (minimum 0,69 et maximum 0,79). On peut donc expliquer l'effet négatif du stress thermique sur l'appareil photosynthétique des génotypes à la station Wad Medani.

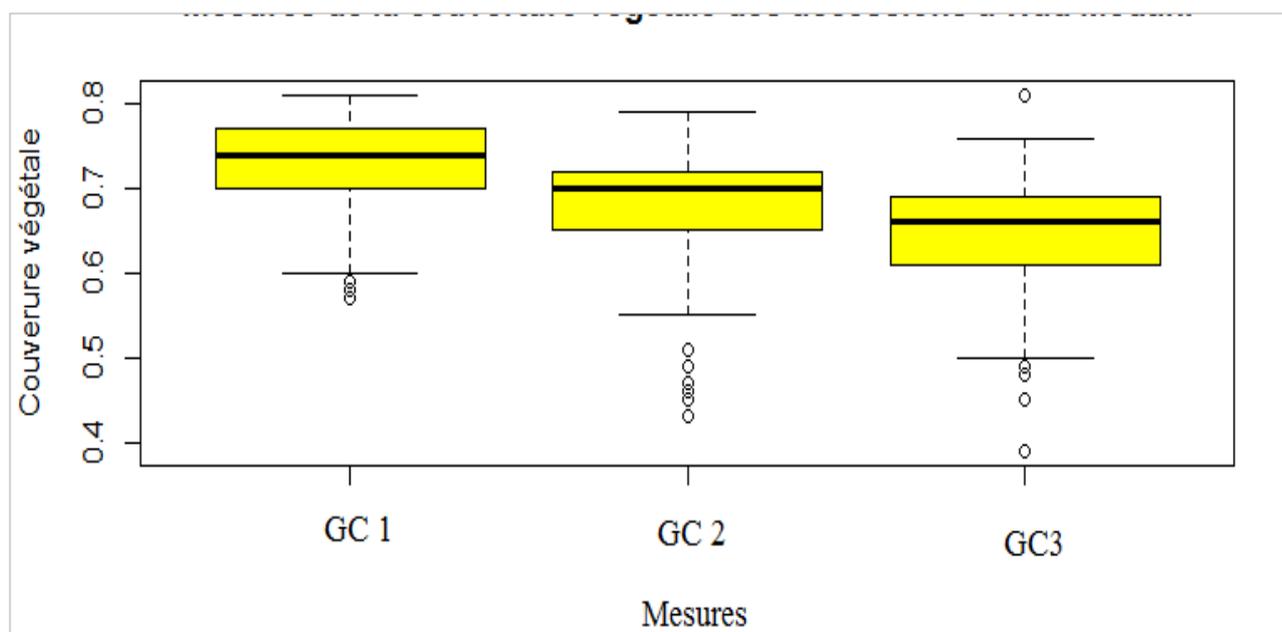
Ces résultats s'accordent avec ceux de Schreiber et Berry (1977) et Al-Khatib and Paulsen, (1999), qui ont indiqué que la présence du stress provoque une diminution de la fluorescence maximale (Fm), et donc une diminution du rendement photosynthétique Fv/Fm, par conséquent, la réduction de la photosynthèse. Et cette dernière affecte le rendement en grains.

Ainsi, les études de Bukhov et Mohanty, (1999), Guissé *et al.*, (1995), Lazár *et al.* (1997), Yamori *et al.*, (2005) ont montré que le stress thermique engendre une diminution du taux de dégagement d'O<sub>2</sub>, du transport d'électrons, et du rapport Fv/Fm ; expliquée par l'augmentation de F0 due à l'augmentation de la température des feuilles, et la diminution de Fm, ce qui explique les résultats obtenus.

Les expressions Fv/Fm et Fv/F0 sont presque identiques. Fv/F0 est une mesure indirecte de l'efficacité photosynthétique (Krause et Weis, 1991).

### c) Couverture végétale

D'après l'analyse de la variance du paramètre couverture végétale à Wad Medani (Annexe 6), sous conditions de stress thermique, les génotypes ne présentent pas d'effet significatif pour la couverture du sol quel que soit le stade phénologique.



**Figure 17 :** Variation de la couverture végétale durant trois stades phénologiques successifs des génotypes d'orge à la station Wad Medani durant la campagne 2017 – 2018

GC 1 : Couverture végétale mesurée au stade trois feuilles

GC 2 : Couverture végétale mesurée au stade début tallage

GC 3 : Couverture végétale mesurée au stade avant épiaison

L'allure générale de la variation de la couverture du sol des génotypes à Wad Medani est représentée dans la figure 17. On remarque qu'elle diminue avec le développement des stades phénologiques et le temps de prises des mesures pour la plupart des génotypes, montrant des valeurs relativement élevées au stade 3 feuilles : Ground Cover 1 (GC 1 : 14/01) par rapport aux deux dernières mesures : Ground Cover 2 (GC2 : 17/02 au stade début tallage) et Ground Cover 3 (GC3 : 18/02 avant épiaison). Les moyennes calculées pour les trois mesures GC1, GC2 et GC3 sont respectivement 0,72, 0,67, et 0,64. Un maximum de vigueur a été marqué en GC 1 avec 0,8 chez la variété LA-FIGS : 27641, tandis que le maximum en GC2 et GC3 était de 0,75 pour les deux variétés Australiennes Buloke et Schooner (Annexe 5).

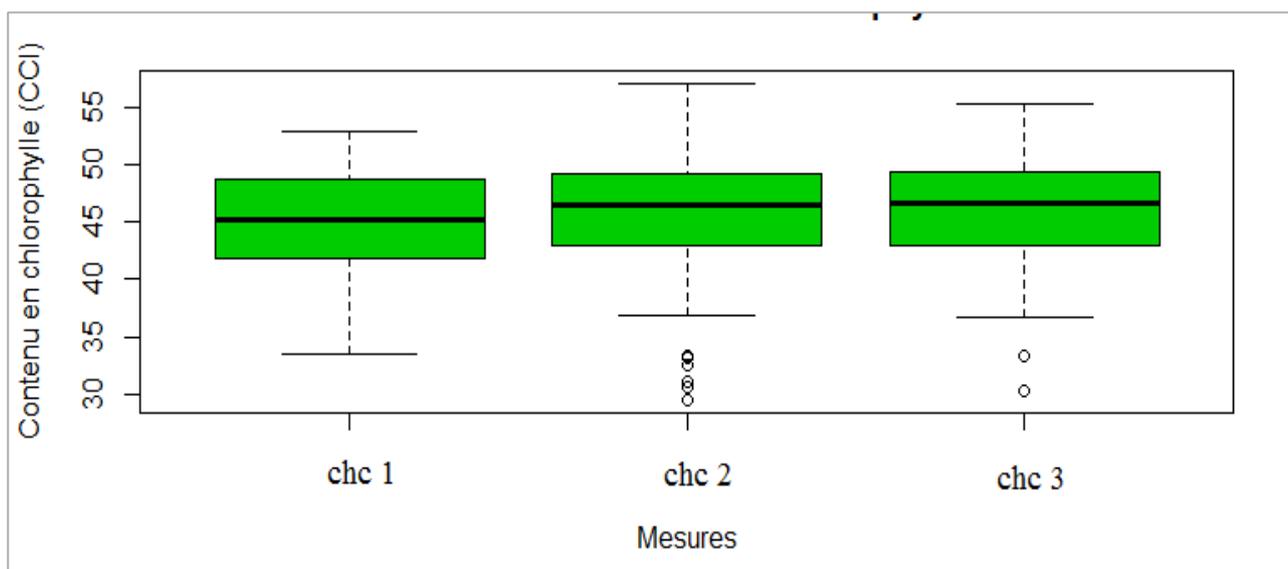
La couverture végétale tend à diminuer rapidement dans un environnement méditerranéen et conditions tempérées, parce que lorsque les températures sont élevées, une augmentation de l'interception de lumière est achevée (Rawson, 1986 et Pask et *al.*, 2012). Il a été conclu que la

couverture du sol par le végétal permet la protection du sol, le contrôle des mauvaises herbes, ainsi que l'estimation de l'évapotranspiration (Mullan et Rynolds, 2010).

#### d) Le contenu en chlorophylle

Les résultats de l'analyse de la variance de la teneur en chlorophylle des génotypes testés à Wad Medani révèlent une différence hautement significative entre les génotypes, répétitions, et blocs au stade 3 feuilles, tandis qu'aucun effet significatif n'a été marqué entre les génotypes pour les deux dernières mesures (06/02/2018 et 27/02/2018 (Annexe 8).

La teneur en chlorophylle mesurée dans l'environnement stressé est représentée dans la figure 18, présentant une légère variation en fonction des stades des croissance.



**Figure 18 :** Variation de la teneur en chlorophylle entre les génotypes d'orge dans l'environnement stressé à Wad Medani durant la campagne agricole 2017 – 2018

chc 1 : Couverture végétale mesurée au stade trois feuilles

chc 2 : Couverture végétale mesurée au stade début tallage

chc 3 : Couverture végétale mesurée au stade avant épisaison

D'après Ashraf et *al.*, (1994), les génotypes tolérants au stress thermique présentent des teneurs en chlorophylle élevées par rapport aux génotypes sensibles dans les mêmes conditions. Les valeurs élevées 55 CCI et 53 CCI, ont été enregistrées, respectivement, pour les variétés Australiennes Sloop et Fleet, 50 CCI et 49 CCI respectivement, pour les deux variétés sélectionnées par l'approche FIGS 22957 et 27641. Donc ces variétés peuvent être qualifiées tolérantes au stress thermique.

Parmi les génotypes sensibles qui ont présenté des teneurs en chlorophylle faibles on trouve 37.48 CCI et 37.22 CCI, respectivement, pour la lignée sélection intra-cultivars (IH17-H2) et pour la lignée de l'ICARDA (heat 16-6) (Annexe 7).

Ces résultats sont en accord avec ceux de Krause et Schöner (1990). Expliquant la diminution du contenu en chlorophylle chez les génotypes sensibles, et son augmentation chez les génotypes tolérants.

#### ❖ Conclusion

Les génotypes considérés comme tolérants au stress thermique dans les conditions de stress sont les suivants :

La variété marocaine Laanaceur présentant une valeur de température du couvert végétale faible 26,92°C

La variété locale LA-FIGS 27640 avec un rendement photosynthétique maximal en conditions de stress thermique (0,70)

La variété australienne Sloop avec un maximum de 55,04 CCI en conditions de stress thermique en fin de cycle

La variété australienne Schooner avec une vigueur maximale de 0,75.

## 2. Traits agronomiques

### a) Cycle de croissance des génotypes étudiés

Le cycle de croissance a duré 177 jours dans la station Marchouch, et presque 113 jours dans la station Wad Medani. Les Annexes 9 et 10 représentent les résultats bruts des traits agronomiques.

D'après les résultats des paramètres phénologiques, les moyennes du nombre de jours à l'épiaison, du nombre de jours jusqu'à maturité et de la durée de remplissage des grains sont faibles pour la station Wad Medani (environnement stressé) comparativement à celles de la station Marchouch (l'environnement non – stressé) (Tableau 2 et 3).

L'analyse de la variance des paramètres phénologiques a montré l'existence d'une différence hautement significative entre les génotypes, dans les deux stations, pour les caractères nombre de jours à l'épiaison, nombre de jours à maturité, et pour la durée de remplissage des grains uniquement dans les conditions favorables. Les valeurs du coefficient de variation étaient entre 1.8% et 12.2% (Tableau 2 et 3).

**Tableau 2 :** Analyse de la variance des paramètres du cycle de croissance des géotypes dans les conditions non-stressées

Trait	Moyenne	CV	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr (>F)
<b>DHE</b>	97.16234	1.8 %					
Répétition			1	7.1	7.071	2.1940	0.1442
Génotype			76	5778.4	76.032	23.5904	<2 <sup>e</sup> -16 ***
Bloc			20	72.9	3.647	1.1316	0.3466
Erreur			56	180.5	3.223	NA	NA
<b>DMA</b>	150.0325	3.8 %					
Répétition			1	322.9	322.92	9.7415	0.0028 **
Génotype			76	7361.3	96.86	2.9220	2.271 <sup>e</sup> -05 ***
Bloc			20	1208.3	60.41	1.8225	0.0405 *
Erreur			56	1856.3	33.15	NA	NA
<b>GFP</b>	52.87013	11.2 %					
Répétition			1	234.4	234.416	6.6363	0.0126 *
Génotype			76	5817.4	76.545	2.1670	0.0014 **
Bloc			20	1039.5	51.974	1.4714	0.1294
Erreur			56	1978.1	35.323	NA	NA

Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. DHE : nombre de jours à l'épiaison, DMA : nombre de jours jusqu'à maturité, GFP : durée de remplissage des grains.

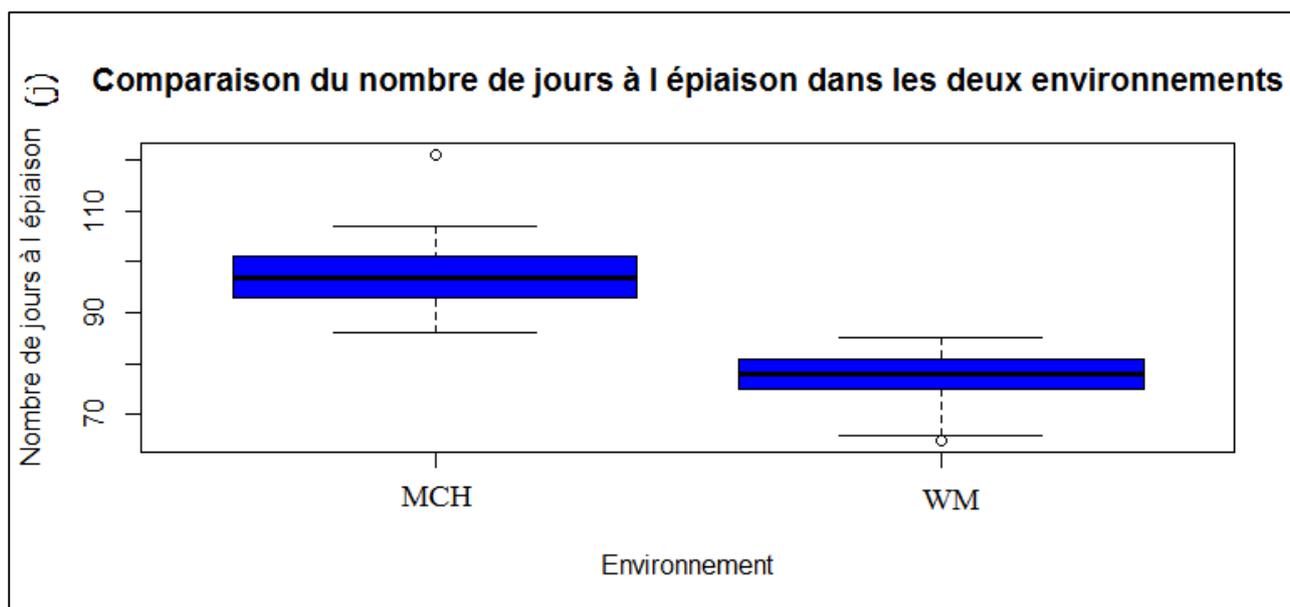
**Tableau 3 :** Analyse de la variance du cycle de croissance des géotypes dans les conditions de stress thermique (Wad Medani)

Traits	Moyenne	CV	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr (>F)
<b>DHE</b>	76.90476	4.2%					
Répétition			1	274.57	274.571	26.543	5.268 <sup>e</sup> -06**
Génotype			62	2038.85	32.884	3.179	3.777 <sup>e</sup> -05**
Bloc			16	281.59	17.599	1.701	8.073 <sup>e</sup> -02**
Erreur			46	475.83	10.344	NA	NA
<b>DMA</b>	102.27	3.4%					
Répétition			1	17.53	17.531	1.534	2.216 <sup>e</sup> -01**
Génotype			62	2326.87	37.530	3.285	2.421 <sup>e</sup> -05**
Bloc			16	259.54	16.221	1.420	1.746 <sup>e</sup> -01**
Erreur			46	525.42	11.422	NA	NA
<b>GFP</b>	25,39	12,2%					
Répétition			1	153.34	153.341	15.977	0.00022***
Génotype			62	894.82	14.432	1.503	0.0745
Bloc			16	334.67	20.917	2.179	0.0201*
Erreur			46	441.48	9.597	NA	NA

Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. DHE : nombre de jours à l'épiaison, DMA : nombre de jours jusqu'à maturité, GFP : durée de remplissage des grains.

### ❖ Nombre de jours à l'épiaison

Le nombre de jours à l'épiaison dans les stations Marchouch et Wad Medani représente respectivement les moyennes 97 et 77 jours après la plantation.



**Figure 19 :** Variation du nombre de jours à l'épiaison dans les deux conditions de culture : MCH Marchouch (environnement non-stressé), et WM Wad Medani (environnement avec stress thermique)

Parmi les dix premiers génotypes qui épièrent précocement, à la station Marchouch, la variété Hindmarsh qui a épié en 86 jours, trois lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16-5, heat 16-6, heat 16-7), deux variétés Marocaines (Aglou, Adrar), et deux variétés Australiennes (Keel, Martime).

Le génotype qui a épié tardivement était LA-FIGS 16975, et qui a enregistré 121 jours (Annexe 9).

A la station Wad Medani, les variétés précoces à l'épiaison enregistrées ont marqué 67 jours après la plantation pour les variétés (Taffa, Gairdner), suivies de la variété Marocaine Laanaceur, une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-7), deux autres variétés Marocaines (Oussama, BL 10), une variété Australienne (Schooner) et trois accessions LA-FIGS (28448, 16975, 22957).

La variété la plus tardive à l'épiaison était (IH17-H2) avec 86 jours après plantation (Annexe 9).

Les génotypes à Wad Medani épiaient plus précocement que les génotypes à Marchouch, ceci peut être expliqué par les effets des hautes températures comme rapporté par les études de Fischer, et Maurer (1976), qui ont déclaré que le stress thermique provoque un raccourcissement du cycle de croissance des génotypes.

### ❖ Nombre de jours à maturité

Le même schéma de variation a été observé pour le nombre de jours jusqu'à maturité, notons une

moyenne de 150 jours après la plantation à la station Marchouh. Parmi les variétés qui ont besoin de peu de temps pour atteindre le maximum de maturité, il y a deux lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16 -6, heat 16 -7), deux variétés Marocaines (Taffa, Adrar), et huit variétés locales sélectionnées par l'approche FIGS (28449, 27632, 27652, 27814, 28399, 23515, 28464, 28461).

La moyenne du nombre de jours jusqu'à maturité était de 102 jours après la plantation à la station Wad Medani, les variétés qui ont besoin de peu de temps pour atteindre le maximum de maturité sont : deux lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16-6, heat 16-7), quatre variétés Marocaines (Aglou, BL 10, Oussama, Taffa), deux variétés Australiennes (Gairdner, Keel), et une lignée sélection intra-cultivars (IH4-H4) (Annexe 9).

#### ❖ Durée de remplissage des grains

Dans les conditions favorables, un nombre de neuf variétés locales sélectionnées par l'approche FIGS (28449, 16975, 27652, 27818, 23515, 27646, 28464, 16955, 27640), une variété Marocaine (Taffa), une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16 -6), et une variété Australienne (Sloop SA) ont présentés de courtes de périodes de remplissage des grains.

Dans l'environnement stressé, on note les géotypes nécessitant de courtes périodes de remplissage sont : la variété prometteuse de l'ICARDA (heat 16 -6) qui a une durée plus courte de 17 jours uniquement, cinq variétés sélectionnées par FIGS (23515, 22957, 27631, 28033, 28987), trois variétés Australiennes (Keel, Westminster, Flagship), une variété Marocaine (Aglou) (Annexe 9).

Lors des périodes de hautes températures, le développement des plantes est perturbé et certains stades ne continuent pas jusqu'à leur maximum, ceci provoque une maturité incomplète des organes et des grains, qui induit une réduction du poids des grains, par conséquent une réduction du rendement en grains (Wahid et *al.*, 2007). Sharma et Smith, (1986) ont indiqué que la précocité à l'épiaison joue un rôle dans la stabilité du rendement de blé dur, dans des conditions de températures excessives.

#### b) Composantes du rendement

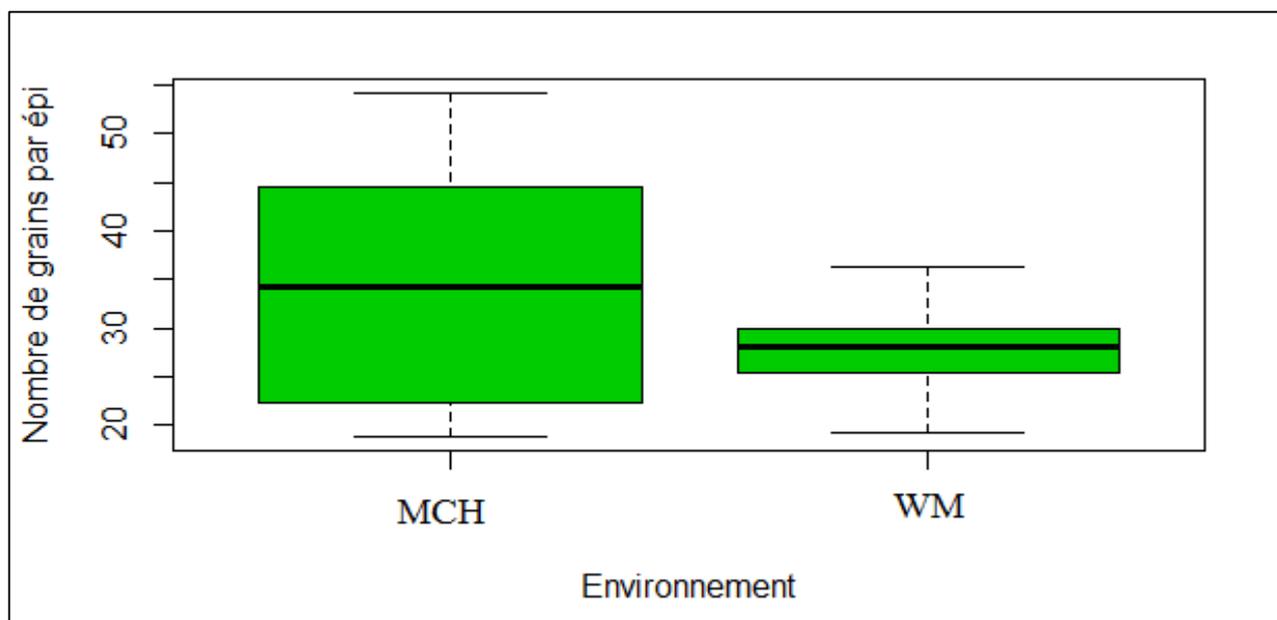
L'analyse de la variance faite pour ces caractères pour l'environnement Marchouch, a montré l'existence d'une différence hautement significative entre les géotypes pour tous les caractères du rendement et ses composantes, à savoir le rendement biologique, le rendement en grains, l'indice de récolte, hauteur des plantes, nombre d'épis/m<sup>2</sup>, nombre de grains par épi et le poids de mille grains (Annexe 11). Les valeurs du coefficient de variation pour tous les paramètres agronomiques étaient

entre 1,8 et 20,6%. Le seul paramètre qui a présenté un coefficient de variation relativement élevé était le nombre d'épis /m<sup>2</sup> avec une valeur de 29,3%.

Par contre, à la station Wad Medani il a été remarqué, après l'analyse de la variance, que les paramètres du rendement ont montrés des différences très significatives entre les génotypes pour le rendement biologique, le rendement en grains, l'indice de récolte, et le poids de mille grains. Des valeurs acceptables du coefficient de variation obtenus pour les paramètres agronomiques ont varié entre 3,4% et 24,9% (Annexe 12).

#### ❖ Nombre de grains par épi

La figure 20 représente la différence du nombre de grains par épi chez les génotypes étudiés dans les deux environnements : Marchouch et Wad Medani. La moyenne enregistrée dans les conditions normales était de 35 grains/épi et de 28 grains/épi dans les conditions stressées. Les génotypes présentant le plus haut nombre de grains /épi sont BL16 (54 graines) et Adrar (36 graines), respectivement, dans les deux stations Marchouch et Wad Medani (Annexe 10).



**Figure 20 :** Variation du nombre de grains par épis chez les génotypes d'orge étudiés dans les deux stations MCH : Marchouch et WM : Wad Medani durant la saison 2017 – 2018

Dans les conditions de culture favorables, les 10 premiers génotypes ayant un nombre élevé de grains par épi il y a la variété Marocaine BL16 qui représente le maximum de 54 grains par épi, trois variétés sélectionnées par l'approche FIGS (16955, 27631, 28448), trois lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16-2, heat 16-7, heat16-9), deux lignées sélection intra-cultivars (IH17-H2, IH4-H4), et une autre variété Marocaine (Taffa).

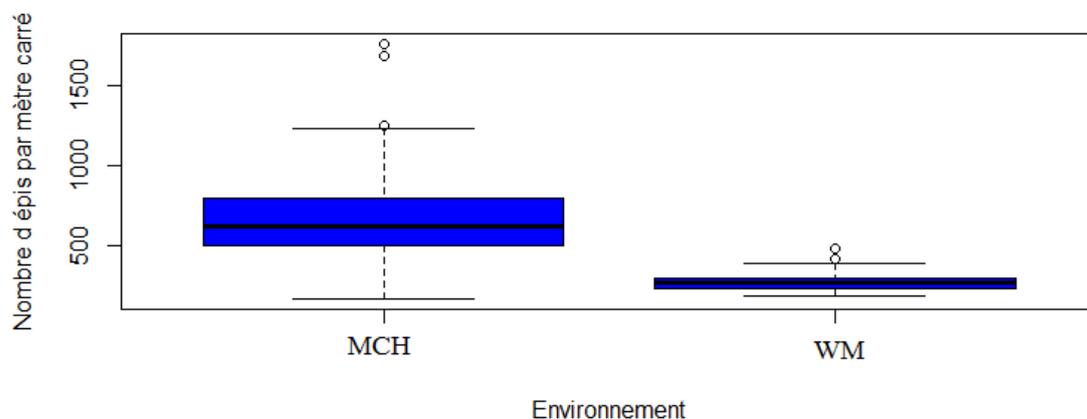
Dans l'environnement stressé, parmi les génotypes présentant un nombre de grains par épi élevé il y a la variété Marocaine (Adrar) et la variété Australienne (Hindmarsh) avec un maximum de 36 grains par épi. Deux lignées de l'ICARDA (heat 16-2, heat 16-7), une variété locale sélectionnée par FIGS (28449), deux autres variétés Marocaines (BL10, Tamellalt), et trois variétés Australiennes (Baudin, Fleet, Schooner) ont enregistré des nombres de grains par épi relativement élevés (entre 32 et 34) (Annexe 10).

❖ Nombre d'épis par mètre carré

La figure 21 présente la variation du nombre d'épis/m<sup>2</sup> dans les deux stations Marchouch et Wad Medani. En conditions stressées, le nombre d'épis/m<sup>2</sup> est inférieur pour tous les génotypes à celui marqué dans les conditions normales, avec des moyennes de 276 épi/m<sup>2</sup> à Wad Medani et de 674 épi/m<sup>2</sup> à Marchouch.

Dans la station Marchouch, les 10 premiers génotypes qui ont présenté un nombre d'épis par mètre carré élevé sont les six variétés Australiennes (Baudin, Buloke, Flagship, Gairdner, Hindmarsh, Vlamingh), une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16- 4), une variété locale LA-FIGS (27652), et deux variétés Marocaines (Adrar, Aglou).

Dans la station Wad Medani, les génotypes avec un nombre élevé d'épis par mètre carré il y a quatre lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16-10, heat 16-2, heat 16-7, heat 16-8), quatre variétés Australiennes (Baudin, Fleet, Hindmarsh, SloopVIC), une variété locales LA-FIGS (28455), et une variété Marocaine (Tamellalt). Seules les variétés Australiennes Baudin et Hindmarsh ont pu produire un nombre élevé d'épis par m<sup>2</sup> dans les deux stations d'expérimentation, quels que soient les conditions de culture (présence ou absence de stress thermique) (Annexe 10).



**Figure 21** : Variation du nombre d'épis/m<sup>2</sup> chez les génotypes d'orge étudiés dans les deux stations MCH : Marchouch et WM : Wad Medani durant la saison 2017 – 2018

Les résultats de cette étude sont en accord avec des résultats rapportés par plusieurs chercheurs. Lors des périodes de températures élevées, des dommages oxydatifs engendrent l'accélération de la senescence des feuilles, induisent une réduction du nombre de talles produits, une réduction du nombre de plantes par mètre carré, et la réduction de la hauteur des plantes (Harding et *al.*, 1990). Au cours des stades de croissance : fin tallage – début du remplissage des grains, l'augmentation de 1°C de température provoque une diminution de 4% du rendement en grains, ce qui affecte le nombre d'épis par m<sup>2</sup> et donc le nombre de grains par m<sup>2</sup>, ainsi que le nombre de grains par épillet chez le blé (Fischer, et Maurer 1976). Après la floraison des cultures, l'insuffisance de l'eau présente dans le sol, combinée à la présence de haute températures réduit le poids moyen du grain, et cause un effet sur la vitesse et la durée du remplissage des grains (Triboi, 1990).

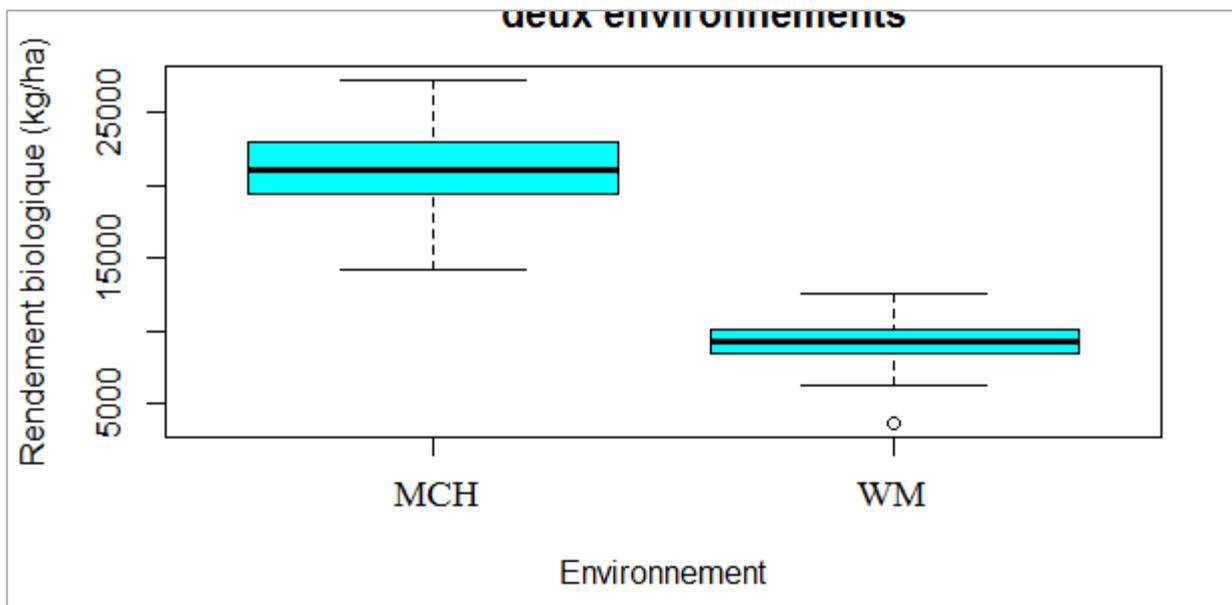
#### ❖ Rendement biologique : la biomasse

Le schéma général de la variation du rendement et ses composantes est représenté dans les figures 22 et 23. Pour tous les génotypes, les rendements en biomasse et en grains sont plus importants dans les conditions favorables que dans les conditions de stress thermique.

La moyenne du rendement biologique à la station Marchouch a été estimée en 20 595 Kg/ha (Annexe 11). Parmi les meilleurs génotypes dans ces conditions favorables (plus de 15% de la totalité des génotypes), il y a deux lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16-8, heat 16-4), trois variétés Marocaines (Oussama, Taffa, Adrar), cinq variétés Australiennes (Commander, Skipper, Westminster, Gairdner, Alestar) et deux sélections intra-cultivars (IH17, IH4-H4). Aucune variété locale LA-FIGS n'a été notée en termes de rendement biologique élevé dans les conditions favorables à Marchouch (Annexe 9).

La moyenne du rendement biologique dans l'environnement stressé à Wad Medani était presque la moitié de celui enregistré à Marchouch, soit 9 280 Kg/ha (Annexe 12).

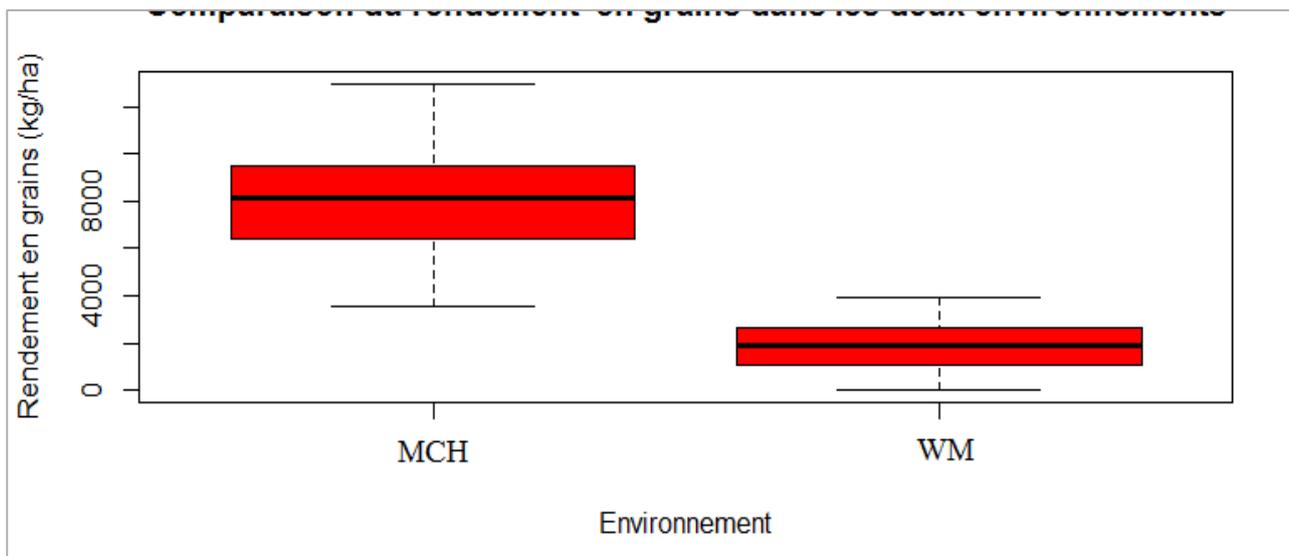
Parmi les 10 premiers génotypes il y a une lignée de l'ICARDA (heat 16-10), une variété Marocaine (Rabat 071), six variétés Australiennes (Flagship, Maritime, Baudin, SloopVIC, Hindmarch, et Barque), et deux variétés sélectionnées par l'approche FIGS (26375, 27640). Aucun génotype issu des sélections intra-cultivars n'a été marquée dans les conditions de stress pour le rendement biologique. Nous remarquons aussi qu'il n'y a aucun génotype performant qui est capable de produire mieux dans les deux environnements : Marchouch et Wad Medani (Annexe 9).



**Figure 22 :** Comparaison du rendement biologique des géotypes d’orge dans les deux conditions de culture MCH : Marchouch sous conditions potentielles ou normales, et WM : Wad Medani sous conditions de stress thermique durant la campagne 2017 – 2018

❖ Le rendement en grains

La figure 23 illustre la variation du rendement en grains des géotypes d’orge testés dans les deux environnements Marchouch et Wad Medani. La moyenne du rendement en grains enregistrée à Marchouch était de 7807 kg/ha, avec une variation de 3 994 Kg / ha jusqu’à 11 256 Kg / ha. La moyenne enregistrée à Wad Medani était de 1866 kg/ha, avec une variation de 96,64 kg/a jusqu’à 3 738 kg/ha (Annexe 9, 11 et 12).



**Figure 23 :** Comparaison du rendement en grains des géotypes dans les deux conditions de culture MCH : Marchouch conditions non stressées, et WM : Wad Medani conditions de stress thermique durant la campagne 2017 – 2018

A la station Marchouch, parmi les 12 géotypes performants qui présentent un meilleur rendement en grains, il y a deux lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16-8, heat 16-4), une variété Marocaine (Taffa), sept variétés Australiennes (Commander, Capstan, Skipper, Alestar, Baudin, Westminster, Vlamingh) et deux sélections intra-cultivars (IH17, IH4-H4). Aucune variété locale LA-FIGS n'a enregistré un rendement élevé dans ces conditions (Annexe 9).

Pour le rendement en grains à Wad Medani, parmi les 10 géotypes présentant un rendement en grains élevé, on trouve une lignée de l'ICARDA (heat 16-7), une variété Marocaine (Aglou), deux variétés Australiennes (Keel, Gairdner), une sélection intra-cultivars (IH4-H4), et cinq variétés locales sélectionnées par FIGS (28396, 28987, 28399, 28386, 28385).

Seule la lignée sélection intra-cultivar (IH4-H4), a été classée parmi les géotypes produisant mieux dans les deux essais : Marchouch et Wad Medani.

La variété locale Rabat 071 présente le maximum du rendement biologique dans l'environnement stressé (12 555 kg/ha), en même temps, elle représente le minimum du rendement en grains 96,64 Kg/ha (Annexe 9).

L'analyse des composantes principales nous a permis de tracer le diagramme bidimensionnel (Figure 24), indiquant l'arrangement des géotypes dans les deux environnements, en termes de rendement en grains.

Les géotypes qui dépassent les deux lignes perpendiculaires sont parmi les 15% des géotypes les plus performants de chaque essai. Au-dessus de l'intersection de ces deux lignes, seule la



Aucune lignée sélection intra-cultivars n'a présenté un indice de récolte élevé, même si les deux génotypes (IH17, IH4-4) avaient été classées parmi les génotypes les plus performants en termes de rendement céréalier (Annexes 9).

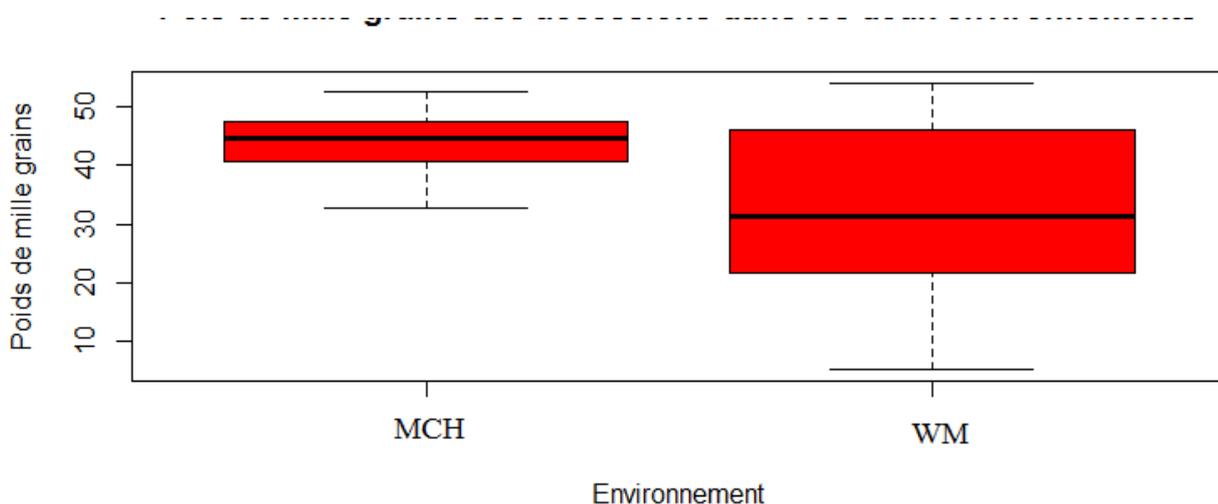
L'essai de Wad Medani a présenté une grande variabilité de l'indice de récolte, il varie de 1,03% à 45,08%, avec une moyenne de 20,57%. Parmi les génotypes à fort indice de récolte il y a deux lignées sélections intra-cultivars (IH17, IH4-4), trois variétés Australiennes (Keel, Gairdner, Schooner), une variété Marocaine (Adrar), une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-7) et trois variétés locales LA-FIGS (28396, 28399, 28987) (Annexe 9).

L'indice de récolte représente un critère important pour la sélection de l'orge, car il donne une bonne indication sur la tolérance à la sécheresse et aux hautes températures de fin du cycle (Siddique et *al.*, 1994). Cependant, les études de Craufurd et Peacock (1993) ont indiqué que, dans un environnement à hautes températures lors de la floraison, les valeurs de l'indice de récolte diminuent, avec une réduction du rendement final.

Lukjanenko (1966) a indiqué que l'indice de récolte représente une indication raisonnable sur le rendement biologique et le rendement en grains lorsqu'il est compris entre 48-50%.

#### ❖ Poids de mille grains

Les résultats de la variation du poids de mille grains sont présentés dans la figure 25.



**Figure 25 :** Variation du poids de mille grains chez les génotypes d'orge évalués dans les deux stations : MCH : Marchouch et WM : Wad Medani durant la campagne 2017 – 2018

Il existe des génotypes qui ont présenté des valeurs élevées du poids de mille grains dans l'environnement stressé que dans l'environnement non stressé, sachant que ces mêmes génotypes ont un rendement en grains faible. On peut donc dire que certains génotypes, dans les conditions de stress, ont pu produire peu de grains mais à poids élevé.

Dans les conditions normales, parmi les 10 premiers génotypes qui ont présenté des valeurs élevées du PMG (entre 48g et 51,48g), il y a neuf variétés Australiennes (Bass, Baudin, Fleet, Martime, Skipper, Sloop, SloopSA, SloopVIC, Westminster), et une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-6). Les variétés à faible PMG sont des variétés sélectionnées par l'approche FIGS (16955, 23515, 26371, 26375, 27632, 27646).

Dans l'environnement stressé huit variétés sélectionnées par l'approche FIGS (26375, 27632, 27646, 27652, 28385, 28386, 28396, 28399), une lignée sélection intra-cultivars (IH17), et une variété Marocaine (Massine) ont enregistré un PMG élevé dans ces conditions. Les génotypes qui ont présenté les valeurs faibles du PMG sont : cinq variétés Australiennes (Buloke, Flagship, Hindmarsh, Schooner, Skipper), trois variétés sélectionnées par l'approche FIGS (16975, 27641, 28455), une lignée de l'ICARDA (heat 16-6), et une variété Marocaine (Tamellalt) (Annexe 10).

Généralement, les valeurs du poids de mille grains des génotypes ne dépassent pas l'intervalle [20-50g]. Lorsqu'on obtient des valeurs faibles du PMG, ceci peut être causé par les conditions climatiques, ou par les effets des agents pathogènes lors du remplissage des grains (Pask *et al.*, 2012).

D'après Siddique *et al.*, (1994), et Grouss *et al.*, (2003), la variation du poids de mille grains est fonction du génotypes (variation selon la variété) et des conditions environnementales. Ceci pourrait expliquer la diminution du poids de mille grains, dans l'environnement stressé, des génotypes sensibles, et son augmentation chez les génotypes tolérants.

### III. Évaluation de la tolérance au stress thermique

Le calcul des indices de tolérance à la chaleur nous a permis de tracer des graphes bidimensionnels qui marquent les génotypes performants dans les deux stations d'expérimentation, en se basant uniquement sur le rendement en grains.

L'analyse des indices de tolérance au stress thermique a révélé un même classement des génotypes pour les deux indices, l'efficacité de tolérance à la température (HTE) et l'indice de susceptibilité à la température (HSI), et un même classement pour les deux indices : la moyenne géométrique (GM) et l'indice de tolérance à la température (HTI) (Annexes 13).

Le calcul de ces indices vise principalement la performance des génotypes dans un environnement favorable ou soumis au stress thermique.

En évaluant simultanément tous les indices, parmi tous les génotypes testés, la variété Australienne Gairdner est la variété la plus tolérante à la température, classée 4<sup>ème</sup> pour HTE et HSI, et 3<sup>ème</sup> pour GM et HTI (Annexes 3 – Tableau 16), suivie par la variété Australienne : Keel classée 7<sup>ème</sup> pour HTE et HSI et 1<sup>ère</sup> pour GM et HTI. Outre ces deux génotypes et en se basant sur les indices de tolérance, 12 autres génotypes peuvent être considérés tolérants à la température : deux autres variétés Australiennes (Hindmarsh et Flagship), une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-8), une variété Marocaine (Aglou), deux lignées sélection intra-cultivars (IH4-H4 et IH17-H2) et quatre variétés locales sélectionnées par l'approche FIGS (28399, 28987, 28396, 28386).

D'autre part, selon les indices de tolérance, les génotypes classés en dernier sont considérés comme sensibles à la température et présentent les dernières classes pour ces indices. Ces variétés sont : trois variétés Marocaines (Rabat 071, Oussama, Laanaceur), deux variétés Australiennes (Buloke, Skipper), deux lignées prometteuses de l'ICARDA (heat 16-4 et heat 16-7) et cinq variétés locales sélectionnées par l'approche FIGS (16955, 23515, 27631, 28455, 27641) (Annexe 13).

En analysant chaque indice individuellement, les valeurs de HTE calculées sur la base du rendement en grains étaient comprises entre 1,73 et 60,71, tandis que les valeurs de HSI étaient entre 0,51 et 1,29. Pour HTE, plus les valeurs sont élevées plus les génotypes sont tolérants aux hautes températures. A l'opposé de HSI, la tolérance des génotypes est considérée élevée quand les valeurs sont faibles. Parmi les 12 génotypes les plus tolérants à la température, il y a sept variétés sélectionnées par l'approche FIGS (28396, 28385, 28987, 27632, 28399, 28386, 28448), quatre variétés Australiennes (Gairdner, Keel, Schooner, Barque) et une lignée prometteuse de l'ICARDA (heat 16-7) (Annexe 13).





G : Géotypes

GM : la moyenne géométrique

HTI : l'indice de tolérance à la température

Des études ont indiqué que les indices (GMP = rendement moyen géométrique (Ramirez-Vallejo et Kelly, 1998), SSI = indice de susceptibilité au stress (Fischer et Maurer, 1978), et STI = Indice de tolérance au stress (Fernandez, 1992) sont calculés sur la base du rendement en grains. Ils permettent de déterminer les géotypes présentant une tolérance au stress plus élevée et un bon potentiel de rendement. Des valeurs de SSI élevées montrent une sensibilité des géotypes au stress, tandis que des valeurs élevées de STI et de GMP indiquent une tolérance des géotypes au stress (Bavei et *al.*, 2011). Porch (2006) a déclaré que seuls les indices HTI et GM sont utiles pour révéler les géotypes tolérants la chaleur.

#### IV. Analyse des corrélations entre les traits

Les figures 28 et 29 ci-dessous présentent les corrélations enregistrées entre les traits étudiés dans les deux stations Marchouch et Wad Medani, et elles montrent des modèles similaires. Les carrés en bleue représentent une corrélation positive ( $r$  est autour de 1), tandis que les carrés en rouge représentent une corrélation négative ( $r$  est autour de -1), entre les paramètres enregistrés. L'intensité de la couleur indique le degré de signification de la corrélation.

Pour les traits enregistrés à la station Marchouch, 68 coefficients significatifs France ont été révélés sur un total de 136 combinaisons de traits différents. Les coefficients de corrélation allaient de -0.544 à 0.991, pour la corrélation positive  $r$  est compris entre 0.208 et 0.991.

Une forte corrélation positive a été marquée entre les paramètres de la fluorescence chlorophyllienne entre eux ( $r= 0.99$ ,  $r= 0.97$ ), respectivement, pour Fm et Fv, et Fv/Fm et Fv/F0. Un coefficient de corrélation de l'ordre de 0.78 a été révélé entre le rendement biologique et le rendement en grains, ce qui explique que l'un de ces deux variables est dépendant de l'autre. Une corrélation relativement positive a été révélée entre le rendement en grains et l'indice de récolte ( $r= 0.6$ ), entre Fv et F0, et entre la période de remplissage des grains et le nombre de jours à maturité

Une corrélation positive modérée a été révélée entre le rendement biologique et le nombre de jours jusqu'à maturité ( $r = 0.367$ ), entre le rendement en grains et le nombre d'épis par m<sup>2</sup> ( $r = 0.357$ ), entre le rendement en grains et celui biologique et la période de remplissage des grains ( $r = 0.312$  et  $r = 0.303$ ). Ainsi, une corrélation positive a été révélée entre la valeur de la fluorescence minimale F0 et



L'analyse de la corrélation entre les paramètres étudiés à la station Wad Medani a révélé 87 coefficients de corrélation significatifs détectés sur plusieurs combinaisons de traits différents. Les coefficients de corrélation pour cette station allaient de -0.373 à 0.991.

La corrélation positive a révélé une variation du coefficient de corrélation entre 0.232 et 0.991.

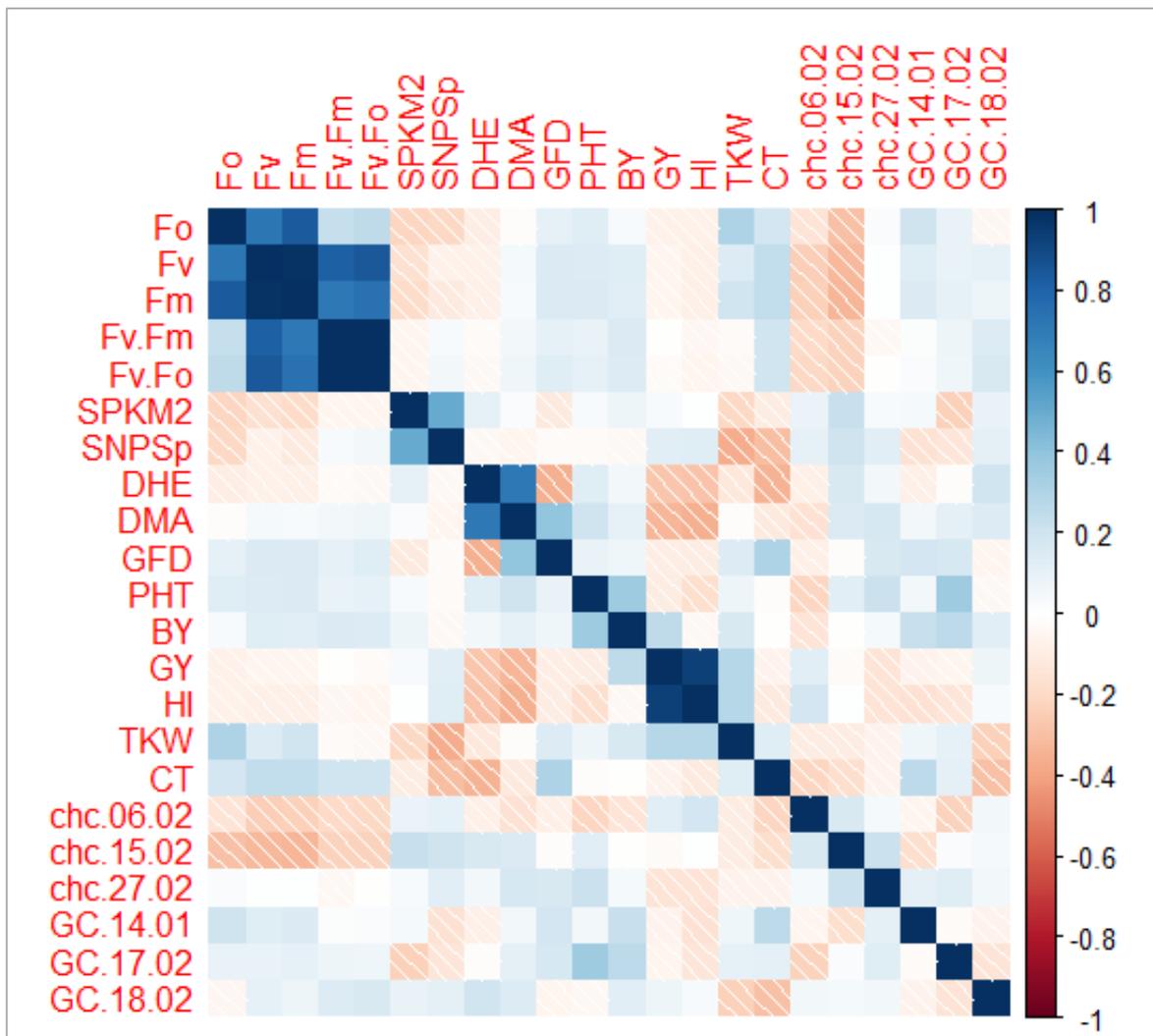
Une forte corrélation positive (allant jusqu'à  $r=0.99$ ) a été enregistrée chez les paramètres de la fluorescence chlorophyllienne entre eux ( $F_0$ ,  $F_m$ ,  $F_v$ ,  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_0$ ).

On remarque aussi une forte corrélation positive entre le rendement en grains et l'indice de récolte avec  $r=0.932$ . Entre le nombre de jours à l'épiaison et le nombre de jours jusqu'à maturité ( $r=0.715$ ) et un coefficient de corrélation de 0.505 a été enregistré entre les deux paramètres nombre d'épis par mètre carré et le nombre de grains par épi ; ce qui indique que, plus le nombre d'épis par unité de surface est grand, plus le nombre de grains par épi sera donc grand.

Une corrélation positive modérée a été enregistrée entre la température de la canopée et la période de remplissage des grains ( $r=0.301$ ) ; ce qui implique que plus la température de la canopée est élevée plus la durée de remplissage des grains devient plus longue. Une corrélation positive a été révélée aussi entre  $F_0$  et le poids de mille grains ( $r=0.301$ ).

Des coefficients de corrélation négatifs significatifs ( $r = (-0.228) - (-0.373)$ ) ont été enregistrés entre le contenu en chlorophylle (première et deuxième mesure) et les valeurs de la fluorescence chlorophyllienne  $F_m$  et  $F_v$ , ce qui implique que plus la teneur en chlorophylle des feuilles est élevée, plus les valeurs de  $F_v$  et  $F_m$  deviennent faibles.

Une corrélation négative modérée est observée entre le nombre de jours à l'épiaison et le rendement en grains ( $r=-0.273$ ) et l'indice de récolte ( $r= -0.283$ ) ; ce qui signifie que plus les génotypes épient tardivement plus le rendement en grains et l'indice de récolte sont faibles. Ainsi, qu'entre le nombre de jours à l'épiaison et la température du couvert végétal ( $r= -0.348$ ) ; impliquant que plus la température de la canopée est élevée durant les premiers stades de croissance plus les génotypes sont précoces à l'épiaison (la durée d'épiaison des génotypes est courte) (Figure 29).



**Figure 29 :** Matrice des corrélations (méthode de Pearson) basée sur les coefficients de corrélation France des 25 caractères enregistrés à Wad Medani Sudan, en utilisant 63 génotypes d’orge

Des études antérieures faites par différents chercheurs, concernant les corrélations pouvant exister entre les caractères physiologiques et morphologiques, sont en partie en accord avec les résultats de cette étude.

Il a été signalé que la mesure des caractères photosynthétiques ; tels que la teneur en chlorophylle et les paramètres de fluorescence de la chlorophylle pourrait estimer l’influence du stress environnemental sur la croissance et le rendement. Les études antérieures ont montré que les caractères photosynthétiques sont étroitement corrélés au taux d’échange de carbone (Liu et *al.*, 2005), et que les corrélations positives avec la température du couvert végétal indiquent une liaison avec la conductance stomatique, le taux de transpiration, le taux d’utilisation de l’eau par les plantes, l’indice de surface foliaire, et le rendement (Reynolds et *al.*, 2012). Des corrélations positives entre les paramètres de la photosynthèse des feuilles et la productivité (biomasse et rendement en grains)

ont été trouvées dans le cas de blé cultivé dans un environnement chaud et irrigué (Reynolds et *al.*, 2000). Les corrélations négatives trouvées entre le rendement et le nombre de jours à l'épiaison et le nombre de jours jusqu'à maturité sont aussi rapportées pour l'orge cultivée sous stress thermique par Bavei et *al.*, (2011). Les études de Pask et *al.*, (2012) sur le blé ont montré une forte corrélation entre le nombre d'épis par m<sup>2</sup> et le rendement, montrant l'importance de ce caractère en conditions favorables. Sous conditions de stress, la hauteur de la plante avait une corrélation non significative avec le rendement (Abdipur et *al.*, 2013).

#### ❖ Conclusion

Les géotypes performants et tolérants au stress thermique sont les géotypes précoces à l'épiaison, et présentant un rendement en grains élevé dans les conditions de stress, ainsi qu'ils présentent des valeurs élevées dans les composantes du rendement, ces géotypes sont :

Les variétés Taffa et Gairdner avec précocité à l'épiaison (67 jours)

La variété marocaine BL16 avec un nombre maximal de grains par épi (54 grains)

La variété heat 16-7 avec un nombre maximal 389 épis par mètre carré sous conditions de stress thermique

La variété australienne Keel avec un maximum de rendement en grains sous stress thermique (3732 kg/ha)

Sous stress thermique, le poids de mille grains maximal a été enregistré chez la variété locale LA-FIGS 28386 avec 53,07%.

## Conclusion générale

Les résultats de cette étude ont mis en évidence l'influence du stress thermique sur les paramètres morphologiques et physiologiques et sur les performances agronomiques des géotypes d'orge de différentes origines.

L'ensemble des paramètres mesurés ont connu une réduction dans l'essai de Wad Medani en présence du stress thermique, comparativement à l'essai conduit à Marchouch sous conditions favorables. Ceci montre la possibilité d'utilisation de la différence entre ces deux essais pour estimer l'effet du stress thermique et pour déterminer les paramètres physiologiques pouvant servir comme critère de sélection pour la tolérance à la chaleur.

Les résultats ont montré des diminutions de l'activité photosynthétique, du contenu en chlorophylle et de la couverture végétale, et une augmentation de la température du couvert végétal associées au stress thermique. Ce stress a aussi affecté négativement les caractéristiques agronomiques inclues la biomasse totale, le rendement en grains et ses composantes.

Les analyses de la variance ont montré des différences significatives entre les géotypes étudiés aussi bien sous stress thermique à Wad Medani qu'en conditions favorables à Marchouch. D'après nos résultats, on peut donc conclure que, la variation due aux géotypes est très significative pour tous les paramètres agronomiques (à l'exception du nombre d'épis par mètre carré dans les conditions stressées) et pour les paramètres physiologiques (à l'exception du paramètre de la couverture végétale dont aucun effet géotype n'a été observé), ainsi que pour le contenu en chlorophylle, sauf pour la deuxième mesure (au début tallage).

L'analyse de corrélation a montré des niveaux de signification modérés des corrélations entre les paramètres physiologiques et agronomiques. Certains paramètres physiologiques ont présenté des niveaux de corrélations positives avec le rendement et ses composantes et avec les paramètres phénologiques. Tandis que des corrélations négatives ont été observées entre les nombres de jours à l'épiaison et à la maturité avec les rendements en grains et en biomasse dans les deux sites montrant l'importance de la précocité dans l'échappement et l'adaptation aux stress thermique et hydrique de fin de cycle.

Le calcul des indices de tolérance au stress thermique, à partir des rendements en grains des deux environnements a permis de définir le niveau de tolérance des géotypes étudiés.

Les indices GM (Moyenne géométrique) et HTI (L'indice de tolérance à la chaleur), ont permis de repérer les géotypes combinant un haut potentiel de rendement et une tolérance à la chaleur.

Les corrélations entre les caractéristiques physiologiques et agronomiques avec le rendement en grains sous stress thermique, et avec les indices de tolérance à la chaleur ont permis de déterminer les combinaisons de caractéristiques pouvant expliquer le mécanisme de tolérance à la chaleur. Les résultats montrent que les génotypes tolérants ont acquis cette tolérance par différentes combinaisons de caractères concluant sur la complexité de la sélection pour la tolérance au stress hydrique en utilisant seulement les paramètres physiologiques et agronomiques. Il faut donc toujours combiner l'approche physiologique avec l'approche empirique se basant sur le rendement et les indices de tolérance à la chaleur, pour mieux caractériser la tolérance à la chaleur des génotypes ayant les caractéristiques importantes, et qui peuvent être utilisés dans un programme de croisements visant à combiner plusieurs traits, et ainsi augmenter les niveaux de tolérance à la chaleur. Sur la base des résultats acquis, ces génotypes sont intéressants :

- Les génotypes LA-FIGS 27640, 16955 et 27641 présentant un rendement photosynthétique élevé dans les conditions stressées
- Les génotypes Sloop, Fleet, et heat 16-6 ont exprimé des taux de chlorophylle élevés en fin de cycle même en conditions stressées.
- Les variétés Australiennes Baudin, Capstan, et Alestar ainsi que les deux génotypes issus des sélections intra-cultivars (IH17 et IH4-H4) sont les plus tolérants à la chaleur en se basant sur les indices GM (Moyenne géométrique) et HTI (l'indice de tolérance à la chaleur).
- La variété Australienne Keel ainsi que les accessions sélectionnées par l'approche FIGS (28396 et 28987) ont donné des rendements en grains élevés sous stress thermique.
- Du point de vue rendement en grains, et d'après les résultats trouvés, on peut calculer le pourcentage des 5 génotypes sélectionnés par l'approche FIGS et qui ont indiqué un rendement élevé dans les conditions de stress, ils représentent 23% de la totalité des génotypes sélectionnés. Ce qui peut indiquer l'efficacité de l'utilisation de cette approche pour la sélection des variétés locales à haute probabilité à contenir le trait désiré dans des environnements de stress.
- La variété Gairdner, combinant une précocité et des rendements en grains élevés dans les deux sites, possède une large adaptation pouvant donc être adaptée aux environnements fluctuants caractérisant les climats méditerranéens.

## Perspectives

Suite aux résultats obtenus, d'autres recherches, qui doivent être complémentaires à ce sujet, sont nécessaires pour :

- Confirmer l'importance des caractéristiques physiologiques, agronomiques, et des indices de tolérance à la chaleur dans la sélection des génotypes tolérants. Ces essais doivent donc continuer pour avoir plusieurs données, permettant aussi d'analyser les interactions génotype x environnement et la relation entre les paramètres physiologiques avec les indices de stabilité de rendement.
- Ces résultats permettent ainsi de chercher les marqueurs associés aux différentes caractéristiques physiologiques et agronomiques en conditions de stress en utilisant la technique GWAS.
- Initier des croisements entre les différents génotypes tolérants à la chaleur pour combiner les différents mécanismes de tolérance et ainsi d'avoir des génotypes plus performants en conditions de stress thermique.

## Références bibliographiques

- Abbad A.F. et Chahbar. A. .2005. La création variétale à l'INRA. Méthodologie, acquis et perspectives. ISBN : 9954-0-6651-9. Vol 172 : 98- 103.
- Abdipur.M, Ramezani.H.R, Bavei.V and Talaae.S. 2013. Effectiveness of Canopy Temperature and Chlorophyll Content Measurements at Different Plant Growth Stages for Screening of Drought Tolerant Wheat Genotypes. Vol: 14.
- Al Khatib K, and Paulsen GM. 1999. High-temperature effects on photosynthetic processes in temperate and tropical cereals. *Crop Sci.* 39 :119-125.
- Alaoui S.B. 2003. Elaboration d'un référentiel d'aide à la décision pour les céréales d'automne : Référentiel pour la Conduite Technique de la Culture d'orge (*Hordeum vulgare*). Dalil Al Fallah. Version 1.0.
- Al-Khatib K., and Paulsen. GM. 1984. Mode of high temperature injury to wheat during grain development. *Physiologia Plantarum.*, 61: 363-368.
- Alqudah. A.M, et Schnurbusch.T. 2017. Heading date is not flowering time in spring barley. 8: 896.
- Amani, I, Fisher, R.A. et Reynolds, M.P. 1996. Canopy temperature depression association with yield of irrigated spring wheat cultivars in hot climates. *J. Agron. Crop Sci.* 176: 119–129.
- Amri. A. Nawar. M Shehadeh. A. Piggin. J. Maxted. N et Gill. B. 2015. Ex situ and in situ conservation efforts for *Aegilops* and wild *Triticum* species. Chapter 40, World Wheat Book
- Araus J.L, Slafer, G.A., Reynolds, M.P., Royo, C. 2002. Plant breeding and drought
- Ashraf, M.Y., Azmi, A.R., Khan, A.H. and Ala, S.A 1994. Effect of Water Stress on Total Phenol, Peroxidase Activity and Chlorophyll Contents in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 16 : 185-191.
- Auriau P. Doussinault G. Jahier J. Lecomte C. Pierre J. Pluchard P. Rousset M. Saur L. et Trottet M. 1992. Le blé tendre. In amélioration des espèces végétales cultivées. E. INRA, Paris. 22 – 38.
- Badaruddin, M., Reynolds, M.P. et Ageeb, O.A.A. 1999. Wheat management in warm environments: effect of organic and inorganic fertilizers, irrigation frequency, and mulching. *Agronomy J.* 91.
- Baker, N.R. 2008. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo, *Annual Review Plant Biology*, 59: 659–668.
- Bartali H. 1995. Systèmes post récolte des céréales au Maroc. FAO.
- Bavei, V. Vaezi, B. Abdipur, M. Kamali. M.R.J. and Roustaii, M. 2011. Screening of tolerant spring barleys for terminal heat stress: Different importance of yield components in barleys with different row type. *International Journal of Plant Breeding and Genetics*, 5(3): 175-193.
- Belaid Dj., 1986. Aspect sur la céréaliculture algérienne. O.P.U. 207p.

- Ben Naceur M., Rahmoune C., Sdiri H., Meddahi ML., et Selmi M. 2001. Effet du stress salin sur la croissance et la production en grains de quelques variétés maghrébines de blé. *Sécheresse*, vol 12 : 167-174.
- Benderradji, L. 2013. Sélection *In vitro* pour la tolérance aux stress salin et thermique chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.).
- Benderradji.L. 2013. Sélection *in vitro* pour la tolérance aux stress salin et thermique chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.). Vol 143 : 53 – 54.
- Benmhammed. A. 2005. Hétérosis, transgressions et efficacité de la sélection précoce et retardée de la biomasse, du nombre d'épis et utilisation des indices chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). v 125 : 19.
- Berthaud, J. 1980. L'incompatibilité chez *Coffea canephora* : méthode de test et déterminisme génétique. *Café Cacao Thé*, 24(4): 267-274.
- Beweley D., 1997. Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, 9: 1055-1066.
- Björkman O., et Demmig B., 1987. Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 k among vascular plants of diverse origins,
- Blum A. and Pnuel Y. 1990. Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in Mediterranean environment. *Aust. J.A. Res.* 41: 799-810.
- Blum, A. 1996. Yield potential and drought resistance: are they mutually exclusive? In: *Increasing Yield Potential in Wheat: Breaking the Barriers*. M.P. Reynolds, S. Rajaram, and A. McNab (eds.). Mexico, D.F: CIMMYT. 76-89.
- Bothmer von R, Seberg O and Jacobsen N, 1992. Genetic resources in the Triticeae. *Hereditas* 116 : 141–150.
- Bouharmont, J. 1994. Création variétale et amélioration des plantes. *Agronomie moderne, bases physiologiques et agronomiques de la production végétale*, 312-338.
- Bourdu R. 1984. Transition between seed reserve use and photosynthetic supply during development of maize seedlings. *Plant Sci. Lett.* 37 : 34-39.
- Bourrié. B. 2007, La fluorescence chlorophyllienne comme outil de diagnostic. Vol 11 : 1 - 3.
- Boyeldieu J. 1997- *Techniques Agricoles Fascicule*. N° 2020
- Bukhov, N.G., P., Mohanty. 1999. Elevated temperature stress effects on photosystems: characterization and evaluation of nature of heat induced impairments. In: *Concepts in photobiology: photosynthesis and photomorphogenesis*, Eds. G.S. Singhal, G. Renger, S.K. Sopory, K-D. Irrang, Govindjee, New Delhi, 617–648.

- Calatayud, P. A., Garrec, J. P., and Nicole, M. 2013. Adaptation des plantes aux stress environnementaux. *N. Sauvion, P.-A. Calatayud, D. Thiéry, & F. Marion-Poll (Vol. Eds.), Interactions insects et plantes*, 229-245.
- Carena. M.J. 2009. Cereals. Library of Congress. Volume 3. DOI: 10.1007/978-0-387-72297-9. V: 430: 227-229.
- Ceccarelli S, Grando S, et Impiglia A. 1998. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica* 103: 307- 318.
- Chowdhry, M.A. Ali, Subhani M. G.M. et Khaliq I. 2000. Path coefficient analysis for water use efficiency, evapo-transpiration efficiency and some yield related traits in wheat. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 3(2): 313-317.
- Cossani, C. M., & Reynolds, M. P. 2012. Physiological traits for improving heat tolerance in wheat. *Plant physiology*, 160(4): 1710-1718.
- Craufurd, P. Q., and Peacock, J. M. 1993. Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). II. Grain yield. *Experimental Agriculture*, 29(1): 77-86.
- Djerah. A. and Oudjehih. B. 2015. Effect of salt stress on the germination of sixteen varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Courrier du Savoir – N°20, Décembre*, 47-5.
- Dutta, S., Mohanty, S., Tripathy, B.C., 2009. Role of temperature stress on chloroplast biogenesis and protein import in pea. *Plant Physiol.* 150: 1050–1061.
- Erkkila M.J., R. Leah, H. Ahokas, and Cameron-Mills. V. 1998. Allele-dependent barley grain  $\beta$ -amylase activity. *Plant Physiol.* 117: 679–685.
- FAO, Food and Agriculture Organization. 2010. Chapitre 6 : Les effets de la hausse des températures diurnes et Nocturnes sur la croissance et les rendements de certaines plantes cultivées. *Changements du climat et production agricole, Agriculture mondiale : Horizon*, 472.
- Faralli.M, Lektemur C., Rosellini D., and Gürel F. 2015. Effects of heat shock and salinity on barley growth and stress-related gene transcription. *Biologia plantarum* 59(3): 537-546.
- Fernandez C.G.J. 1993. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Kuo C.G. (ed.) *Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress*, AVRDC, Shanhua, Taiwan, 257-270.
- Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. *Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress*, August 13-16, 1992, Shanhua, Taiwan, 257-270.
- Fischer K.S., Wood G. 1981. Breeding and selection for drought tolerance in tropical maize. In: Fischer K.S., Jonson E.S., Edmeades G.O. (eds.) *Principles and Methods in Crop Improvement for Drought Resistance with Emphasis on Rice*. Proceeding of the Symposium. IRRI, Philippines, 31-46.

- Fisher, M. 2015. (40). maps that explain the Middle East. *Vox. Accessed online*. Middle East History
- Fischer, R.A., 1985. Physiological limitations to producing wheat in semitropical and tropical environments and possible selection criteria. Proceedings of the International Symposium on Wheat for More Tropical Environments, Sept. 24-28, CIMMYT, Mexico City, Mexico, DF, 209-230.
- Fischer, R. A. et Maurer, R. 1976. Crop temperature modification and yield potential in a dwarf spring wheat. *Crop Science* 16: 855–859.
- Fisher R.A., Maurer R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.*, 29: 897-912.
- Forster, B.P, Heberle – Bors, E. Kasha, K.J. et Touraev, A. 2007. The resurgence of haploids in higher plants. *Trends Plant Sci.* 12: 368 – 375.
- Garrity, D.P., and O’Toole, J.C. 1995. Selection for reproductive stage drought avoidance in rice, using infrared thermometry. *Agron. J.* 87 :773- 779.
- Gate, P.H. 1995. Ecophysiologie du blé ; Technique et documentation : Lavoisier, Paris 429.
- Gernand, D, Rutten, T. Pickering, R. and Houben. A. 2006. Elimination of chromosomes in *Hordeum vulgare* × *H. bulbosum* crosses at mitosis and interphase involves micronucleus formation and progressive heterochromatinization. *Cytogen. Genome Res.* 114: 169 – 174.
- Gollin, D., Smale, M., et Skovmand, B. 2000. Searching an ex situ collection of wheat genetic resources. *American Journal of Agricultural Economics*, 82(4): 812-827.
- Groos, C., Robert, N., Bervas, E., and Charmet, G. 2003. Genetic analysis of grain protein-content, grain yield and thousand-kernel weight in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 106(6): 1032-1040.
- Guérif M., Seguin B. 1991. Estimation de la biomasse et du rendement des cultures à partir du satellite SPOT : résultats d’une expérimentation sur blé dur en Camargue. In : Deshayes M. (ed.) La télédétection en agriculture. Montpellier : CIHEAM, 1991 : 115-127 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 4).
- Guissé, B., Srivastava, A., and Strasser, R.J. 1995. The polyphasic rise of the chlorophyll *a* fluorescence (OKJIP) in heat-stressed leaves. *Archs. Sci. Genève* 48: 147-160.
- Hadjichristodoulou A. 1993. Barley genotypes satisfying different needs in Drylands, marginal lands and uncultivated Areas. In the 71grometeorology of rainfed Barley – based Farming systems. Proceedings of international symposium (6 – 10 March 1989, Tunis). Ed. Jones M., Marrhys G., Rijks D. 233 – 243.

- Hakala, K Jauhiainen, L. Himanen, S. J. Rötter, R. Salo T. and Kahiluoto H. M. 2011. Sensitivity of barley varieties to weather in Finland. Agrifood Research Finland, Plant Production Research.(1).
- Hamblin, J., 1971. Ph.D. Thesis, University of Adelaide
- Harding, S.A., Guikema, J.A. and Paulsen, G.M. 1990. Photosynthetic decline from high temperature stress during maturation of wheat. I. Interaction with senescence process. *Plant Physiol.* 92 :648-653.
- Heckathorn SA, Downs CA, Sharkey TD, Coleman JS. 1998. The small methionine rich chloroplast heat shock protein protects photosystem II electron transport during heat stress. *Plant Physiology* 116: 439-444.
- Hossain A, Teixeira da Silva JA, Lozovskaya MV, Zvolinsky VP. 2012. High temperature combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in South-Eastern Russia: I. Phenology and growth. *Saudi J. Biol. Sci.* 19(4) :473-487.
- Howarth, C. J. 2005. Genetic improvements of tolerance to high temperature. In ‘Abiotic stresses—plant resistance through breeding and molecular approaches (Eds M Ashraf, PJC Harris). 277–300. ICARDA, 2013. Research to Action 3 – FIGS – ‘Focused Identification of Germplasm Strategy A new approach to mining agricultural gene banks – to speed the pace of research innovation for food security. Vol: 22.
- Jadhav, S.J., Lutz, S.E. Ghorpade, V.M. et Salunkhe, D.K. 1998. Barley: chemistry and value-added processing. *Critical Rev. Food Sci.*, 38: 23–171.
- Jedrowski, C. Ashoub, A. Momtaz, O. et Brüggemann, W. 2015. Impact of Drought, Heat, and Their Combination on Chlorophyll Fluorescence and Yield of Wild Barley (*Hordeum spontaneum*). 10: 1-6.
- Johnson G.N, Young A.J, Scholes J.D, Horton P. 1993. The dissipation of excess excitation energy in British plant species. *Plant, cell and environment* 16: 673-679.
- Kertész, Z., 1984. Improvement of harvest index. In: W. Lange, A.C. Zeven et N.G. Hogenboom (Eds.): Efficiency in plant breeding. Proceedings 10<sup>th</sup> Congress of Eurcarpia. Pudoc, Wageningen, 93-104.
- Kertesz.Z. 1983 Improvement of harvest index. Proceedings of the 10th Congress of the Eucarpia, Wageningen (The Netherlands), p 19–24.
- Khaldoun, A. Chery, J. and Monneveux, P. 1990. Étude des caractères d’enracinement et de leur rôle dans l’adaptation au déficit hydrique chez l’orge (*Hordeum vulgare* L). *Agronomie, EDP Sciences*, 10 (5): 369-379.

- Khosh KA, and Ando, B 1995. Effect of food environments, particularly sodium ion on the synthesis of chlorophyll and plant growth C4. Abstracts Third Crop Science Congress of Iran. Tabriz University, 14.
- Krause G.H, Weis E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42: 313–249.
- Krause, G. H. et Schöner, S. 1990. Protective systems against active oxygen species in spinach: response to cold acclimation in excess light. *Planta*, 180(3): 383-389.
- Krishnan, M., Nguyen, H. T., et Burke, J. J. 1989. Heat shock protein synthesis and thermal tolerance in wheat. *Plant Physiology*, 90(1): 140-145.
- Kuroda, M., Oaiawa, T., et Imagawa, H. 1990. Changes in chloroplast peroxidase activities in relation to chlorophyll loss in barley leaf segments. *Physiologia plantarum*, 80(4): 555-560.
- Lazár, D., Ilík, P., et Nauš, J. 1997. An appearance of K-peak in fluorescence induction depends on the acclimation of barley leaves to higher temperatures. *J. Lumen.* 72- 74, 595-596.
- Ledesma, N. A., Kawabata, S., and Sugiyama, N. 2004. Effect of high temperature on protein expression in strawberry plants. *Biologia plantarum*, 48(1): 73-79.
- Li, R. H., Guo, P. G., Michael, B., Stefania, G., and Salvatore, C. 2006. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural Sciences in China*, 5(10): 751-757.
- Liu, F., Sun, G.-L., Salomon, B. and Bothmer, R. von 2002. Characterization of genetic diversity in core collection accessions of wild barley, *Hordeum vulgare* ssp. *Spontaneum*. *Hereditas* 136 : 67–73.
- Liu, H., Zou, G., Liu, G., Hu, S., Li, M., Yu, X., and Luo, L. 2005. Correlation analysis and QTL identification for canopy temperature, leaf water potential and spikelet fertility in rice under contrasting moisture regimes. *Chinese science bulletin*, 50(4) : 317-326.
- Lukjanenko, P.P., 1966. Méthodes et résultats de sélection du blé d’hiver. In: Trudi Kraszanodarskogo NHSzH. Vol 2: 16-49.
- Manuel 1. 2012. OS-30p+ Chlorophyll Fluorometer Field portable hand-held instrument designed for FV/FM, FV/F0 and advanced OJIP measurements. Vol: 45: 10-13.
- Matus, I., Corey, A. Filchkin, T. Hayes, P.M. Vales, M.I. Kling, J. Riera-Lizarazu, O. Sato, K. Powell, W. et Waugh. R. 2003. Development and characterization of recombinant chromosome substitution lines (RCSLs) using *Hordeum vulgare* subsp. *Spontaneum* as a source of donor alleles in *Hordeum vulgare* subsp. *Vulgare* background. *Genome* 46 :1010–1023.
- Midmore, D. M., Cartwright, P. M. & Fischer, R. A. 1984. Wheat in tropical environments. II. Crop growth and grain yield. *Field Crops Research* 8: 207–227.

- Mittler, R., Finka, A., and Goloubinoff, P. 2012. How do plants feel the heat? *Trends in biochemical sciences*, 37(3): 118-125.
- Mohammadi R. 2016. Efficiency of yield-based drought tolerance indices to identify tolerant genotypes in durum wheat. *Euphytica*. 211: 71-89
- Mohammadi, M. Karimizadeh, R. A., and Naghavi, M. R. 2009. Selection of bread wheat genotypes against heat and drought tolerance based on chlorophyll content and stem reserves. *J. Agric. Soc. Sci*, 5(5) : 119-122.
- Moule. C. 1971. *Phytotechnie spéciale : Céréales*. La maison rustique. Paris. V: 95: 6-14.
- Mullan D.J., and Reynolds M.P. 2010. Quantifying genetic effects of ground cover on soil water evaporation using digital imaging. *Functional Plant Biology*, 37: 703–712.
- Munns, R., and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59: 651-681.
- Najafpour. M.M. 2012. *Advances in photosynthesis – fundamental aspects*. ISBN 978-953-307-928-8. Vol 598.
- Nash, D. Miyao, M. and Murata, N. 1985. Heat inactivation of oxygen evolution in Photosystem II particles and its acceleration by chloride depletion and exogenous manganese, *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 807, no. 2, 127–133.
- Nevo, E. 2006. Genome evolution of wild cereal diversity and prospects for crop improvement. *Plant Genet. Res.* 4: 36 – 46.
- Nibau C., Gibbs D.J. et Coates J.C. 2008. Branching out in new directions: the control of root architecture by lateral root formation. *New Phytologist*, 179(3): 595-614.
- Oosterom, E.J., Ceccarelli, V.S., Peacock, J.M. 1993. Yield response of barley to rainfall and temperature in Mediterranean environments. *J. Agric. Sci.*, 121: 307-313.
- Pask A., Pietragalla J., Mullan D, Reynolds M. 2012. *Physiological Breeding II: A field guide to Wheat Phenotyping*. D.F: CIMMYT. Vol :140: 16-132.
- Pillen, K., and Leon. J. 2003. Advanced backcross QTL analysis in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Theor. Appl. Genet.* 107: 340–352.
- Pinto R. S., Reynolds M. P., Mathews K. L., McIntyre C. L., and Olivares-Villegas J. J., 2010. Heat and drought adaptive QTL in a wheat population designed to minimize confounding agronomic effects. *Theor. Appl. Genet.* 121: 1001–1021.
- Pinto, R.S., and Reynolds, M.P., 2015. Common genetic basis for canopy temperature depression under heat and drought stress associated with optimized root distribution in bread wheat. *Theor. Appl. Genet.* 128: 575–585.

- Porch, T. G. 2006. Application of stress indices for heat tolerance screening of common bean. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(5): 390-394.
- Preczewski, P. J., Heckathorn, S. A., Downs, C. A., and Coleman, J. S. 2000. Photosynthetic thermotolerance is quantitatively and positively correlated with production of specific heat-shock proteins among nine genotypes of *Lycopersicon* (tomato). *Photosynthetica*, 38(1): 127-134.
- Qzawa. M, et Imagawa. T H (1990). Changes in chloroplast peroxidase activities in relation to chlorophyll loss in barley leaf segments. *Physiologia plantarum*, 80 : 555-560.
- Radhouane, L. 2008. Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en grains chez quelques écotypes de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) autochtones de Tunisie. *Comptes Rendus Biologies*, 331(4) : 278-286.
- Ramirez-Vallejo, P. and J.D. Kelly, 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica*, 99: 127-136.
- Rashid, A., Stark, J.C., Tanveer, A. and Mustafa, T. 1999. Use of canopy temperature measurements as a screening tool for drought tolerance in spring wheat. *J Agron Crop Sci.*, 182: 231-237.
- Rawson, H.M. 1988. Effect of high temperatures on the development and yield of wheat and practices to reduce deleterious effects In: A.R. Klatt (ed.). *Wheat Production Constraints in Tropical Environments*. Mexico, D.F.: CIMMYT. 44- 62.
- Rawson, HA. 1986. High temperature-tolerant wheat: a description of variation and a search for some limitations to productivity. *Field Crops Research* 14: 197–212.
- Reynolds MP, Balota M, Delgado MIB, Amani I and Fischer RA 1994. Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. *Aust J Plant Physiology* 21: 717- 730
- Reynolds M.P., Delgado M.I., Gutiérrez-Rodríguez M., Larqué-Saavedra A. 2000. Photosynthesis of wheat in a warm, irrigated environment. I: Genetic diversity and crop productivity. *Field Crops Res.*; 66: 37–50.
- Reynolds MP., A. Mujeeb-Kazi, M. Sawkins. 2005. Prospects for utilizing plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought- and salinity prone environments. *Ann. Appl. Biol.*, 146: 239–259.
- Reynolds, M. P., Pask, A. J. D., and Mullan, D. M. 2012. Physiological breeding I: interdisciplinary approaches to improve crop adaptation. CIMMYT.
- Reynolds, M.P., Singh, R.P. Ibrahim, A. Ageeb, O.A. and Quick, J.S. 1998 Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica* 100: 85–94.
- Rezaei. E.E. Webber.H. Gaiser.T. Naab.J. Ewert.F.. 2015. Heat stress in cereals: Mechanisms and modelling. 98-113.

- Riggs T J, Hanson P R, Start N D, Miles D M, Morgan C L, Ford M A 1981 Comparison of spring barley varieties grown in England and Wales between 1880 and 1980. *Journal of Agricultural Science* 97: 599–610.
- Ristic, Z., Bukovnik, U., and Prasad, P. V. 2007. Correlation between heat stability of thylakoid membranes and loss of chlorophyll in winter wheat under heat stress. *Crop Science*, 47(5): 2067-2073.
- Saidi, S., Lemtouni, A., Amri, A., and Moudden, M. 2005. Use of barley grain for food in Morocco. *Food Barley: Importance, Uses and Local Knowledge*, 17.
- Saidi, S., Sebbata, O., Bencherqi, A., Mrabet, R., Oukabli, A., and Essafi, N. E. 2007. Rapport National sur l'état des ressources phylogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture. *Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, Royaume du Maroc*.
- Saidi.S. 2007. Deuxième rapport National sur l'état des ressources phylogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture (RPGAA). Volume 58: 27.
- Samarah N. H. 2005. Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agron. Sustain. Dev.* Volume 25, Number 1: 145-149.
- Savin, R., and Nicolas, M. E. 1999. Effects of timing of heat stress and drought on growth and quality of barley grains. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50(3): 357-364.
- Schreiber U. et Berry, J. A. 1977. "Heat-induced changes of chlorophyll fluorescence in intact leaves correlated with damage of the photosynthetic apparatus," *Planta*, vol. 136, no. 3, 233–238.
- Shanker C., Mandapaka M., editors. *Crop Stress and its Management: Perspectives and Strategies*. Springer; The Netherlands. 261–315.
- Sharma, R.C and Smith, E.L. 1986. Sélection de l'indice de récolte haut et bas dans trois populations hivernales. *Crop Science* 26: 1147-1150.
- Shroyer J. P., Ryan J., Abdel Monem M., and El Mourid M. 1990. Production of fall-planted cereals in Morocco and technology for its improvement. *J. Agron. Educ.*, Vol. 19, no. 1. 6.
- Siddique. K.H.M. and Loss, S.P. 1994. Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environments. *Advances in Agronomy* 52: 229-276.
- Singh, I.O. and Stoskopf, N.C. 1971. Harvest index in cereals. *Agronomy Journal* 63: 224-226.
- Soltani A., Hajji M. et Grignon C. 1990. Recherche de facteurs limitant la nutrition minérale de l'orge en milieu sale. *Agronomie*, EDP Sciences, 10 (10) : 857- 866.
- Triboï, E. 1990. Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre. *Agronomie*, 10 : 191-200.
- Ugarte, C., Calderini, D. F., and Slafer, G. A. 2007. Grain weight and grain number responsiveness to pre-anthesis temperature in wheat, barley and triticale. *Field Crops Research*, 100(2-3): 240-248.

- Ullrich, S. E. (2011). Barley: Production, improvement, and uses (Vol. 12). John Wiley & Sons. Vol 673: 144 – 307.
- Unkovich M, Baldock J, and Forbes M. 2010. Variability in Harvest Index of Grain Crops and Potential Significance for Carbon Accounting: Examples from Australian Agriculture. Volume 105: 173-219.
- Vierling, E. 1991. The roles of heat shock proteins in plants. – *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant mol. Biol.* 42 : 579-620.
- Vilmorin M. H. 1880 Essais De Croisement Entre Blés Différents, *Bulletin de la Société Botanique de France*, 27 :9, 356-361.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., and Foolad, M. R. 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and experimental botany*, 61(3): 199-223.
- Walia, H., Wilson, C., Wahid, A., Condamine, P., Cui, X., and Close, T. J. 2006. Expression analysis of barley (*Hordeum vulgare* L.) during salinity stress. *Functional & integrative genomics*, 6(2): 143.
- Yamori, W., Knoguchi, K., and Terashima, I. 2005. Temperature acclimation of photosynthesis in spinach leaves: analyses of photosynthetic components and temperature dependencies of photosynthetic partial reactions. *Photosynth. Res.* 28: 536-547.
- Zadoks J. C., Chang T., and Konzak F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, Volume14: 415 – 421.
- Zeven.A C, Hogenboom. N.G. 1983 Efficiency in Plant Breeding. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Congress of the Eucarpia*, Wageningen (The Netherlands), 93–104.
- Zobayed S, Afreen F, and Kozai T 2005. Temperature stress can alter the photosynthetic efficiency and secondary metabolite concentrations in St. John’s Wort. *Plant Physiol. Biochem.*, 43: 977–984.
- Zohary, D., Hopf, M., and Weiss, E. 2012. *Domestication of Plants in the Old World: The origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin*. Oxford University Press on Demand.

## **Annexes**

## Annexe 1

Les génotypes étudiés des deux stations Marchouch et Wad Medani et leurs origines de collecte

Génotype	Groupe	Site d'expérimentation	Origine
16955	LA_FIGS	MCH-WM	TKM
16975	LA_FIGS	MCH-WM	TKM
16988	LA_FIGS	MCH-	UZB
22416	LA_FIGS	MCH-	ETH
22957	LA_FIGS	MCH-WM	ETH
23515	LA_FIGS	MCH-WM	ETH
25765	LA_FIGS	MCH-	EGY
25899	LA_FIGS	MCH-	AFG
26371	LA_FIGS	MCH-WM	UZB
26375	LA_FIGS	MCH-WM	UZB
27631	LA_FIGS	MCH-WM	IRN
27632	LA_FIGS	MCH-WM	IRN
27640	LA_FIGS	MCH-WM	IRN
27641	LA_FIGS	MCH-WM	IRN
27646	LA_FIGS	MCH-WM	IRN
27652	LA_FIGS	MCH-WM	IRN
27789	LA_FIGS	MCH-	IRN
27814	LA_FIGS	MCH-	IRN
28033	LA_FIGS	MCH-WM	EGY
28364	LA_FIGS	MCH-	IND
28385	LA_FIGS	MCH-WM	IND
28386	LA_FIGS	MCH-WM	IND
28396	LA_FIGS	MCH-WM	IND
28399	LA_FIGS	MCH-WM	IND
28436	LA_FIGS	MCH-	IND
28444	LA_FIGS	MCH-	IND
28448	LA_FIGS	MCH-WM	IND
28449	LA_FIGS	MCH-WM	IND
28455	LA_FIGS	MCH-WM	IND
28458	LA_FIGS	MCH-	IND
28461	LA_FIGS	MCH-	IND
28464	LA_FIGS	MCH-	IND
28987	LA_FIGS	MCH-WM	DZA
Acsad 60	MV	MCH-WM	---
Adrar	MV	MCH-WM	---
Aglou	MV	MCH-WM	---
Alestar	AV	MCH-WM	---
Barque	AV	MCH-WM	---
Bass	AV	MCH-WM	---
Baudin	AV	MCH-WM	---

BL10	MV	MCH-WM	---
BL16	MV	MCH-WM	---
Buloke	AV	MCH-WM	---
Capstan	AV	MCH-WM	---
Commander	AV	MCH-	---
Flagship	AV	MCH-WM	---
Fleet	AV	MCH-WM	---
Gairdner	AV	MCH-WM	---
heat 16-1	EL	MCH-WM	---
heat 16-10	EL	MCH-WM	---
heat 16-2	EL	MCH-WM	---
heat 16-3	EL	MCH-	---
heat 16-4	EL	MCH-WM	---
heat 16-5	EL	MCH-WM	---
heat 16-6	EL	MCH-WM	---
heat 16-7	EL	MCH-WM	---
heat 16-8	EL	MCH-WM	---
heat 16-9	EL	MCH-WM	---
Hindmarsh	AV	MCH-WM	---
Keel	AV	MCH-WM	---
Laanaceur	MV	MCH-WM	---
Martime	AV	MCH-WM	---
Massine	MV	MCH-WM	---
Oussama	MV	MCH-WM	---
Rabat 071	MV	MCH-WM	---
Schooner	AV	MCH-WM	---
Skipper	AV	MCH-WM	---
Sloop	AV	MCH-WM	---
SloopSA	AV	MCH-WM	---
SloopVIC	AV	MCH-WM	---
Taffa	MV	MCH-WM	---
Tamellalt	MV	MCH-WM	---
IH4-H4	IS	MCH-WM	---
IH17	IS	MCH-WM	---
IH17-H2	IS	MCH-WM	---
Vlamingh	AV	MCH-WM	---
Westminster	AV	MCH-WM	---

**\*AV : Variétés Australienne \*LA\_FIGS : Variétés locales sélectionnées par l'approche FIGS**

**\*IS : Sélections Intra-cultivars \*MV : Variétés Marocaines**

**\*EL : Lignées prometteuses de l'ICARDA \*MCH : Marchouch – Maroc**

**\*WM : Wad Medani – Soudan.**

## Annexe 2

Résultats de la fluorescence chlorophyllienne et de la température du couvert végétal des génotypes des deux stations d'expérimentation

<b>Traits</b>	<b>F0</b>	<b>F0</b>	<b>Fv</b>	<b>Fv</b>	<b>Fm</b>	<b>Fm</b>	<b>Fv/Fm</b>	<b>Fv/Fm</b>	<b>Fv/F0</b>	<b>Fv/F0</b>	<b>CT</b>	<b>CT</b>
<b>Génotype</b>	<b>MCH</b>	<b>WM</b>	<b>MCH</b>	<b>WM</b>	<b>MCH</b>	<b>WM</b>	<b>MCH</b>	<b>WM</b>	<b>MCH</b>	<b>WM</b>	<b>MCH</b>	<b>WM</b>
16955	198,448	169,475	610,077	391,611	807,662	560,696	0,757	0,698	3,096	2,308	20,170	28,216
16975	206,527	118,952	599,992	179,381	806,947	298,548	0,735	0,608	2,869	1,556	20,077	29,463
22957	184,157	153,970	656,027	225,956	840,345	380,004	0,780	0,598	3,520	1,489	21,321	30,618
23515	194,217	149,826	531,098	285,324	725,441	434,562	0,724	0,660	2,718	1,932	20,304	28,458
26371	206,120	165,708	546,084	285,440	751,268	452,219	0,727	0,633	2,679	1,718	19,381	28,861
26375	200,274	164,180	645,413	319,498	845,504	483,782	0,765	0,661	3,220	1,951	20,966	30,278
27631	208,414	140,664	740,331	234,979	948,078	376,955	0,780	0,626	3,567	1,669	20,142	27,664
27632	197,361	148,755	590,594	266,868	787,585	415,845	0,751	0,636	2,992	1,761	20,146	32,018
27640	206,627	174,381	637,378	417,279	845,664	590,427	0,752	0,705	3,047	2,407	21,139	30,160
27641	207,556	129,729	609,025	267,789	818,439	397,483	0,742	0,671	2,886	2,044	19,811	29,696
27646	188,445	157,024	452,925	243,700	642,214	401,093	0,693	0,606	2,357	1,546	20,837	27,588
27652	160,386	149,823	429,880	280,934	588,884	431,466	0,735	0,654	2,734	1,886	20,354	30,224
28033	188,161	156,232	683,588	280,471	874,083	437,530	0,787	0,628	3,623	1,756	19,668	31,564
28385	197,593	147,546	602,866	244,563	800,193	392,024	0,753	0,622	3,056	1,651	20,817	29,847
28386	188,393	163,440	592,023	305,762	780,408	468,995	0,761	0,654	3,136	1,881	21,442	30,120
28396	196,700	145,048	544,094	229,775	740,404	373,851	0,735	0,612	2,784	1,587	21,862	28,674

28399	192,363	153,968	626,183	281,790	817,676	434,881	0,768	0,644	3,285	1,839	21,240	28,998
28448	187,511	137,860	563,651	217,403	749,337	356,935	0,751	0,608	3,045	1,587	21,886	28,302
28449	185,252	122,141	537,327	167,777	721,073	289,372	0,744	0,576	2,953	1,370	21,313	29,936
28455	194,793	143,532	664,420	265,998	858,980	409,867	0,774	0,646	3,414	1,840	21,158	32,164
28987	199,086	152,258	629,113	277,978	828,007	430,431	0,763	0,645	3,172	1,824	20,867	28,863
Acsad 60	175,745	151,141	626,523	298,327	802,200	449,229	0,782	0,663	3,563	1,973	20,059	27,970
Adrar	175,384	128,378	628,739	289,363	806,079	417,970	0,781	0,692	3,581	2,248	19,903	29,555
Aglou	182,603	127,974	555,581	227,030	738,508	355,051	0,746	0,637	3,000	1,767	20,482	27,549
Alestar	177,932	153,800	564,733	293,598	743,220	446,287	0,759	0,657	3,131	1,918	20,449	29,324
Barque	173,536	149,976	621,999	269,600	794,750	418,891	0,782	0,638	3,618	1,786	20,885	29,837
Bass	181,564	124,703	580,700	252,095	764,692	376,137	0,759	0,659	3,167	1,964	21,239	31,331
Baudin	183,166	122,168	583,525	215,000	766,900	336,429	0,756	0,649	3,162	1,862	21,783	28,922
BL10	188,697	136,812	640,159	247,838	829,229	384,766	0,772	0,636	3,371	1,816	21,539	28,258
BL16	182,551	146,467	574,368	304,937	758,264	451,625	0,755	0,673	3,104	2,067	19,842	29,323
Buloke	193,706	144,742	636,954	246,189	830,456	390,777	0,767	0,627	3,282	1,692	20,795	30,743
Capstan	192,712	141,433	711,069	220,735	903,872	361,752	0,786	0,608	3,682	1,573	20,084	29,957
Flagship	189,169	141,879	514,271	275,743	703,421	417,818	0,733	0,655	2,735	1,907	20,731	30,358
Fleet	180,068	110,199	591,937	173,461	771,578	283,964	0,767	0,602	3,297	1,553	19,871	28,217
Gairdner	199,527	148,087	662,120	290,619	861,869	438,399	0,766	0,661	3,309	1,961	20,106	29,465
heat 16-1	188,593	127,409	562,243	233,875	750,960	360,800	0,753	0,648	2,993	1,842	19,946	27,397

heat 16-10	192,471	138,263	585,181	241,381	777,827	379,898	0,751	0,633	3,029	1,746	21,551	28,181
heat 16-2	180,259	149,453	613,942	278,228	792,988	427,170	0,772	0,650	3,443	1,860	20,897	28,035
heat 16-4	177,721	146,579	596,614	247,113	773,270	393,995	0,775	0,625	3,416	1,683	20,564	29,122
heat 16-5	186,009	151,099	590,308	292,002	776,204	443,045	0,758	0,658	3,173	1,928	21,049	28,207
heat 16-6	143,507	133,903	486,781	228,124	631,318	361,327	0,766	0,629	3,294	1,710	21,343	31,581
heat 16-7	199,519	159,109	607,840	288,847	809,504	446,451	0,752	0,647	2,980	1,838	21,389	29,575
heat 16-8	187,053	123,087	716,728	257,322	904,106	380,664	0,792	0,673	3,850	2,070	21,906	28,865
heat 16-9	187,826	134,806	613,420	180,696	800,018	317,105	0,767	0,569	3,301	1,314	20,939	28,168
Hindmarsh	184,360	115,564	663,655	212,190	847,212	327,525	0,786	0,647	3,626	1,834	20,139	28,866
Keel	168,235	95,873	545,707	160,725	716,308	257,169	0,760	0,622	3,169	1,648	20,488	27,807
Laanaceur	195,732	132,717	624,975	251,653	821,900	384,741	0,759	0,652	3,168	1,883	21,208	29,309
Martime	193,234	147,616	648,244	252,080	842,069	399,453	0,765	0,628	3,316	1,702	20,582	30,311
Massine	186,761	145,853	622,863	216,163	809,002	361,956	0,769	0,591	3,387	1,471	19,634	29,001
Oussama	202,519	150,066	724,630	222,374	927,241	372,334	0,785	0,595	3,582	1,496	19,646	26,926
Rabat 071	204,972	144,202	682,950	270,015	891,652	413,139	0,768	0,657	3,270	1,905	20,467	26,989
Schooner	194,421	155,077	673,907	341,703	868,141	496,159	0,777	0,674	3,461	2,159	20,976	29,645
Skipper	170,718	139,482	563,532	241,187	733,415	380,090	0,763	0,620	3,283	1,739	20,974	30,112
Sloop	172,271	112,456	485,915	169,367	656,234	283,033	0,742	0,605	2,868	1,579	20,865	28,038
SloopSA	191,156	132,090	609,861	207,637	800,732	338,856	0,764	0,608	3,215	1,583	20,619	30,112
SloopVIC	179,343	135,672	535,200	200,457	714,769	338,254	0,748	0,596	2,963	1,465	20,306	27,481

Taffa	179,049	134,100	638,492	217,055	816,897	350,710	0,777	0,619	3,587	1,641	20,919	28,461
Tamellalt	185,814	139,600	567,787	235,242	754,095	374,648	0,754	0,625	3,040	1,683	20,524	29,416
IH4-H4	187,648	166,435	631,816	312,538	818,502	478,745	0,769	0,651	3,369	1,869	21,542	27,915
IH17	194,823	140,021	600,060	221,479	794,775	361,511	0,751	0,604	3,100	1,563	21,589	28,478
IH17-H2	192,295	132,652	653,964	183,561	846,351	317,708	0,769	0,579	3,405	1,369	21,881	29,307
Vlamingh	175,776	126,944	530,947	238,874	706,020	366,643	0,751	0,652	3,021	1,873	20,395	28,819
Westminster	187,080	159,932	587,456	314,799	774,060	474,643	0,754	0,661	3,136	1,954	21,380	29,510

CT MCH : Température du couvert végétal mesures prises à la station Marchouch, F0 : Fluorescence initiale, Fv : Fluorescence variable, Fm : Fluorescence maximale, Fv / Fm : Efficacité et rendement photosynthétique, Fv / F0 : Efficacité photosynthétique

## Annexe 3

Analyse de la variance des paramètres physiologiques : température du couvert végétal et fluorescence chlorophyllienne à la station Marchouch

Traits	Moyenne	CV			Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr (>F)
			ddl					
<b>CT MCH</b>								
	20,77	2,50%						
Génotype			76		25,222	0,3318	1,2713	0,175
Erreur			55		14,357	0,2610	NA	NA
<b>F0</b>								
	188.632	6.2 %						
Répétition			1		414.4	414.36	3.0244	0.0875161
Génotype			76		26414.3	347.56	2.5368	0.0001798 ***
Block			20		6370.9	318.54	2.3250	0.0069274 **
Erreur			56		7672.4	137.01	NA	NA
<b>Fv</b>								
	600.6863	10.5 %						
Répétition			1		74904	74904	18.7907	6.128 <sup>e</sup> -05 ***
Génotype			76		653135	8594	2.1559	0.0014961 **
Block			20		229090	11454	2.8735	0.0009889 ***
Erreur			56		223228	3986	NA	NA
<b>Fm</b>								
	789.3184	8.9 %						
Répétition			1		86462	86462	17.3946	0.0001066 ***
Génotype			76		824282	10846	2.1820	0.0012921 **
Block			20		297329	14866	2.9909	0.0006551 ***
Erreur			56		278354	4971	NA	NA
<b>Fv/Fm</b>								
	0.7590909	2.3 %						
Répétition			1		0.003366	0.0033662	11.0788	0.001548 **
Génotype			76		0.047173	0.0006207	2.0428	0.002828 **
Block			20		0.010519	0.0005259	1.7309	0.055342
Erreur			56		0.017015	0.0003038	NA	NA
<b>Fv/F0</b>								
	7.354935	9.9 %						
Répétition			1		1.2313	1.23125	16.4298	0.0001574 ***
Génotype			76		12.9781	0.17077	2.2787	0.0007514 ***
Block			20		2.7731	0.13866	1.8502	0.0368232 *
Erreur			56		4.1967	0.07494	NA	NA

Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. CT MCH : Température du couvert végétal mesures prises à la station Marchouch, F0 : Fluorescence initiale, Fv : Fluorescence variable, Fm : Fluorescence maximale, Fv / Fm : Efficacité et rendement photosynthétique, Fv / F0 : Efficacité photosynthétique

## Annexe 4

Analyse de la variance des paramètres physiologiques : température du couvert végétal et fluorescence chlorophyllienne à la station Wad Medani

Traits	Moyenne	CV	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr(>F)
<b>CT WM</b>	29.303	4.014					
Répétition			1	1306.933	1306.9336	918.484	4.819432 <sup>e</sup> -32 ***
Génotype			62	240.15	3.873	2.722	2.728420 <sup>e</sup> -04 ***
Block			16	163.69	10.230	7.189	6.648643 <sup>e</sup> -08 ***
Erreur			46	65.454	1.422923	NA	NA
<b>F0</b>	142,2989	10,124					
Génotype			62	29022,44	468,103	2,255	0,003313598**
Erreur			41	8508,59	207,526	NA	NA
<b>Fv</b>	254,9724	18,064					
Génotype			62	262385,47	4232,023	1,994	0,010197148**
Erreur			41	86974,79	2121,336	NA	NA
<b>Fm</b>	397,2713	13,784					
Génotype			62	420410,4	6780,81	2,2613	0,003234079**
Erreur			41	122943,45	2998,62	NA	NA
<b>Fv/Fm</b>	0,636322	5,8679					
Génotype			62	0,0960	0,00159	1,1110	0,36415
Erreur			41	0,05716	0,00139	NA	NA
<b>Fv/F0</b>	1,781934	15,38					
Génotype			62	5,3413	0,0861	1,1470	0,3235
Erreur			41	3,0793	0,0751	NA	NA

Signif. Codes : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. CT WM : Température du couvert végétal mesures prises à la station Wad Medani, F0 : Fluorescence initiale, Fv : Fluorescence variable, Fm : Fluorescence maximale, Fv / Fm : Efficacité et rendement photosynthétique, Fv / F0 : Efficacité photosynthétique

## Annexe 5

Résultats de la couverture végétale des géotypes à Wad Medani en fonction des stades phénologiques

<b>Géotypes</b>	<b>GC 14.01</b>	<b>GC 17.02</b>	<b>GC 18.02</b>
16955	0,765	0,696	0,691
16975	0,776	0,689	0,633
22957	0,768	0,598	0,551
23515	0,714	0,713	0,665
26371	0,775	0,719	0,606
26375	0,747	0,650	0,676
27631	0,790	0,715	0,472
27632	0,766	0,576	0,629
27640	0,743	0,665	0,677
27641	0,811	0,610	0,701
27646	0,663	0,705	0,705
27652	0,708	0,718	0,613
28033	0,737	0,729	0,626
28385	0,756	0,715	0,620
28386	0,729	0,738	0,680
28396	0,724	0,732	0,666
28399	0,710	0,648	0,617
28448	0,673	0,637	0,599
28449	0,692	0,589	0,590
28455	0,660	0,670	0,616
28987	0,622	0,723	0,666
Acsad 60	0,761	0,670	0,685
Adrar	0,661	0,603	0,653
Aglou	0,775	0,638	0,694
Alestar	0,724	0,609	0,641
Barque	0,772	0,697	0,595
Bass	0,727	0,689	0,657
Baudin	0,746	0,654	0,698
BL10	0,702	0,703	0,595
BL16	0,752	0,695	0,601
Buloke	0,749	0,752	0,664
Capstan	0,750	0,630	0,651
Flagship	0,721	0,744	0,674
Fleet	0,670	0,566	0,642
Gairdner	0,705	0,571	0,614
heat 16-1	0,749	0,744	0,665
heat 16-10	0,718	0,644	0,680
heat 16-2	0,748	0,663	0,617
heat 16-4	0,721	0,650	0,709
heat 16-5	0,732	0,697	0,582
heat 16-6	0,724	0,494	0,688

heat 16-7	0,735	0,638	0,669
heat 16-8	0,660	0,680	0,673
heat 16-9	0,727	0,689	0,595
Hindmarsh	0,739	0,665	0,709
IH17	0,706	0,667	0,651
IH17-H2	0,723	0,593	0,582
IH4-H4	0,738	0,686	0,593
Keel	0,667	0,612	0,613
Laanaceur	0,748	0,708	0,670
Martime	0,791	0,717	0,641
Massine	0,702	0,712	0,486
Oussama	0,737	0,653	0,722
Rabat 071	0,658	0,725	0,633
Schooner	0,644	0,734	0,756
Skipper	0,681	0,729	0,715
Sloop	0,759	0,687	0,645
SloopSA	0,687	0,642	0,678
SloopVIC	0,744	0,732	0,659
Taffa	0,710	0,675	0,677
Tamellalt	0,763	0,685	0,617
Vlamingh	0,758	0,737	0,608
Westminster	0,738	0,698	0,628

## Annexe 6

Analyse de la variance du paramètre mesurant la couverture du sol à la station Wad Medani

Trait	Moyenne	CV	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr (>F)
<b>GC 1</b>	0.726	6.06					
Répétition			1	0.0277	0.0277	13.850	0.000537***
Génotype			62	0.1924	0.0031	1.5490	0.061004
Bloc			16	0.0869	0.0054	2.711	0.004210**
Erreur			46	0.0921	0.0020	NA	NA
<b>GC 2</b>	0.675	8.365					
Répétition			1	0.0198	0.01981	5.3915	0.02471*
Génotype			62	0.3352	0.00540	1.4713	0.0859
Bloc			16	0.0908	0.00567	1.5451	0.1247
Erreur			46	0.1690	0.00367	NA	NA
<b>GC 3</b>	0.642	9.636					
Répétition			1	0.0640	0.0640	16.437	0.0001 ***
Génotype			62	0.2612	0.0042	1.0822	0.3930
Bloc			16	0.0885	0.0055	1.4212	0.1741
Erreur			46	0.1791	0.0038	NA	NA

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. GC 1 : mesures de couverture du sol prises le 14/01, GC 2 : mesures couverture du sol prises le 17/02, GC 3 : mesures couverture du sol prises le 18/02

## Annexe 7

Résultats du contenu en chlorophylle des géotypes à Wad Medani en fonction des stades phénologiques

<b>Géotypes</b>	<b>chc 06.02</b>	<b>chc 15/02</b>	<b>chc 27.02</b>
16955	38,90	41,95	45,66
16975	48,55	45,25	43,66
22957	49,60	41,10	49,16
23515	42,35	36,15	43,42
26371	42,30	41,45	48,37
26375	37,40	43,95	47,84
27631	46,74	43,59	42,02
27632	48,60	39,80	43,61
27640	39,25	45,10	44,67
27641	50,04	38,39	50,20
27646	50,04	49,29	48,32
27652	43,55	43,70	47,49
28033	45,55	44,75	47,11
28385	43,30	48,70	44,71
28386	46,90	41,30	45,73
28396	47,65	51,95	43,21
28399	43,00	42,35	46,04
28448	45,14	46,59	44,00
28449	46,80	47,70	39,60
28455	41,80	43,55	44,01
28987	44,65	45,85	43,49
Acsad 60	48,10	43,65	44,55
Adrar	46,25	51,90	44,43
Aglou	47,40	44,95	40,86
Alestar	42,20	45,55	45,49
Barque	46,65	44,20	43,28
Bass	42,20	48,20	41,32
Baudin	51,65	47,35	43,20
BL10	37,70	43,90	50,63
BL16	46,15	46,55	48,42
Buloke	38,80	51,20	48,67
Capstan	44,90	41,15	42,18
Flagship	42,55	37,25	44,62
Fleet	41,40	50,30	53,86
Gairdner	46,65	45,70	40,01
heat 16-1	44,25	42,20	47,50
heat 16-10	43,80	46,00	42,74
heat 16-2	49,70	48,70	50,47
heat 16-4	49,90	46,65	46,77
heat 16-5	41,15	49,50	52,65
heat 16-6	45,94	43,99	37,49

heat 16-7	42,55	48,55	41,98
heat 16-8	40,75	47,25	46,41
heat 16-9	47,45	51,00	47,96
Hindmarsh	45,05	50,15	45,59
IH17	47,80	44,80	44,23
IH17-H2	43,30	41,75	37,22
IH4-H4	48,20	39,70	47,57
Keel	47,15	46,95	39,49
Laanaceur	45,30	48,20	45,07
Martime	39,85	42,25	49,24
Massine	46,95	49,35	45,85
Oussama	46,10	45,15	47,35
Rabat 071	44,00	43,45	44,12
Schooner	46,95	44,55	52,52
Skipper	45,50	51,70	51,17
Sloop	45,20	49,70	55,05
SloopSA	46,70	51,20	45,53
SloopVIC	43,45	49,15	47,76
Taffa	45,75	50,20	49,62
Tamellalt	45,40	45,10	46,47
Vlamingh	41,10	47,80	42,48
Westminster	43,60	47,65	44,85

## Annexe 8

Analyse de la variance du paramètre la teneur en chlorophylle des géotypes de la station Wad Medani

Trait	Moyenne	CV	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr (>F)
<b>chc1</b>	44.71	9.29					
Répétition			1	192.153	192.153	9.898	0.0028**
Géotype			62	1197.234	19.310	0.994	0.5131
Bloc			16	240.904	15.056	0.775	0.7033
Erreur			46	893.002	19.413	NA	NA
<b>chc2</b>	45.70	10.98					
Répétition			1	289.531	289.531	254.159	2.328e-20***
Géotype			62	165.037	2.661	2.336	1.5724e-03***
Bloc			16	160.266	10.016	8.792	3.1567e-09***
Erreur			46	52.40188	1.139171	NA	NA
<b>chc3</b>	45.76	9.36					
Répétition			1	18.977	18.977	0.961	0.331
Géotype			62	1667.928	26.902	1.363	0.136.
Bloc			16	331.879	20.742	1.051	0.425
Erreur			46	907.737	19.733	NA	NA

Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. chc 1 : mesures de la teneur en chlorophylle prises le 06/02, chc 2 : mesures de la teneur en chlorophylle prises le 15/02, chc3 : mesures de la teneur en chlorophylle prises le 27/02

## Annexe 9

Valeurs BLUE des paramètres du rendement et ses composantes et du cycle de croissance des deux stations  
Marchouch et Wad Medani.

Géotypes	BY (Kg/ha)		GY (Kg/ha)		HI		DHE		DMA		GFP	
	MCH	WM	MCH	WM	MCH	WM	MCH	WM	MCH	WM	MCH	WM
16955	23280,944	10167,057	8276,41	682,59	0.36	0.06	105.0	79.1	137.0	109.7	31.4	30.4
16975	23030,149	8877,244	7628,28	2278,64	0.33	0.24	121.0	70.3	145.5	98.4	24.3	27.7
22957	18445,501	8017,479	7197,86	2180,97	0.39	0.26	90.5	71.9	127.5	92.7	36.0	20.6
23515	18399,181	9531,800	6505,76	613,81	0.35	0.06	97.0	79.1	126.3	98.3	28.9	19.1
26371	19571,869	9002,923	7431,34	1606,51	0.39	0.19	105.0	77.7	140.1	106.5	34.3	28.9
26375	19366,346	11931,845	6818,08	1964,52	0.35	0.16	97.0	82.3	138.3	108.1	41.4	25.5
27631	19331,433	6280,041	5631,90	451,56	0.31	0.07	103.0	81.2	142.1	103.0	39.7	21.8
27632	14753,233	8241,335	4784,83	2037,15	0.34	0.27	88.0	76.8	123.5	101.8	35.9	24.7
27640	19934,260	11085,210	4989,53	1603,79	0.26	0.15	107.0	78.9	138.7	104.7	32.2	25.9
27641	21055,351	8748,880	6584,74	176,16	0.32	0.02	98.5	78.2	141.9	105.0	43.6	27.2
27646	21339,440	9044,256	6181,32	1761,26	0.29	0.18	107.0	78.9	136.9	105.5	29.3	26.6
27652	19059,637	9048,533	7012,61	1949,57	0.37	0.21	96.5	78.5	123.9	106.8	27.7	27.8
28033	20006,464	9857,523	8666,48	2245,70	0.43	0.24	87.5	78.0	128.2	100.5	40.3	22.0
28385	19255,293	10508,064	5295,52	2696,70	0.28	0.27	105.0	78.0	142.2	104.0	37.0	26.2
28386	21258,461	10467,304	7045,74	2686,60	0.33	0.25	107.0	79.8	146.7	105.3	39.8	25.5
28396	16497,005	8056,743	5859,80	3541,12	0.34	0.43	92.0	79.4	141.7	103.3	50.0	23.8
28399	17159,783	9010,072	7775,36	3062,32	0.45	0.36	88.0	74.4	125.8	99.0	38.1	25.2
28448	14602,987	8490,099	5133,98	2518,67	0.34	0.23	97.0	69.7	130.3	98.6	34.0	28.9
28449	14280,223	6672,913	5453,15	994,02	0.38	0.12	100.5	74.2	123.2	100.0	23.9	26.3
28455	17590,864	3707,258	6772,26	183,75	0.39	0.01	95.0	80.3	131.6	104.3	37.3	23.5
28987	21297,295	9525,936	6765,30	3212,59	0.32	0.34	101.0	79.3	138.2	102.1	37.1	23.0
Acsad 60	19613,015	10131,166	8283,02	1673,35	0.43	0.19	97.0	77.0	138.9	101.9	41.2	24.9
Adrar	23930,007	6855,281	9493,05	2456,05	0.40	0.31	88.5	74.9	126.2	98.9	37.5	23.7
Aglou	21330,831	10004,227	9479,40	2768,81	0.45	0.24	90.0	73.1	135.7	95.8	45.5	22.5
Alestar	23593,691	9516,269	10753,55	2019,68	0.44	0.20	103.0	78.2	145.8	103.1	43.1	24.8
Barque	21923,986	10632,439	7108,36	2519,09	0.34	0.23	98.5	77.0	132.1	100.4	34.4	23.7
Bass	20908,524	9677,784	8424,02	1524,04	0.40	0.14	105.0	81.9	147.4	108.5	41.4	26.3
Baudin	21732,895	11006,498	10676,23	2559,22	0.49	0.24	97.0	78.1	139.1	104.6	41.3	26.5
BL10	19113,225	7837,528	6681,83	1739,87	0.35	0.25	96.5	73.0	138.3	96.6	41.8	24.2
BL16	19797,024	7065,302	8089,76	1258,14	0.41	0.18	93.0	75.3	131.8	102.0	38.8	27.0

Buloke	23501,883	10138,065	9199,54	696,58	0.40	0.05	99.0	80.7	135.3	105.3	37.5	24.6
Capstan	21987,630	8752,691	11176,15	2489,04	0.52	0.28	103.0	78.7	141.3	103.8	38.8	25.0
Flagship	23070,408	11420,469	9510,55	2590,09	0.41	0.24	97.0	77.9	139.0	100.9	41.5	22.7
Fleet	20264,214	9834,946	7896,67	1306,79	0.38	0.15	98.5	83.8	138.2	110.4	40.2	26.1
Gairdner	23813,096	9604,668	8536,18	3673,23	0.37	0.38	105.0	67.6	142.2	94.3	36.8	26.3
heat 16-1	20420,744	8211,904	7616,73	2253,26	0.38	0.29	95.0	77.0	139.9	103.5	44.0	27.2
heat 16-10	21686,574	10864,954	9559,18	2447,28	0.38	0.08	94.0	76.7	141.2	100.7	47.8	23.8
heat 16-2	20160,970	9922,893	7963,81	789,30	0.43	0.23	92.0	75.2	136.9	100.5	44.9	25.3
heat 16-4	24303,617	9159,413	10436,67	2104,79	0.40	0.13	86.5	79.8	132.3	106.0	46.0	26.2
heat 16-5	19508,702	9149,106	7715,96	1443,18	0.37	0.02	89.5	79.1	122.2	96.4	33.0	17.4
heat 16-6	16889,498	8131,797	6142,03	186,31	0.34	0.34	87.0	69.2	126.3	94.6	39.2	25.3
heat 16-7	20853,645	9126,937	7060,73	3031,24	0.38	0.21	93.0	75.8	147.3	99.8	54.6	23.7
heat 16-8	27243,133	10113,647	10389,07	2415,11	0.43	0.13	95.0	76.9	137.7	103.5	43.3	26.3
heat 16-9	22604,555	10195,049	9559,11	1311,51	0.43	0.23	96.0	84.2	136.9	108.8	40.7	24.5
Hindmarsh	19940,412	10622,787	9037,10	2578,29	0.45	0.25	86.0	75.6	133.4	101.5	47.0	26.4
IH17	27099,355	8831,382	10275,84	2472,34	0.48	0.42	88.0	78.3	127.9	98.2	38.8	20.1
IH17-H2	23320,521	9155,572	9153,77	2557,81	0.43	0.12	96.0	85.6	136.9	113.7	40.6	28.4
IH4-H4	25620,342	8017,320	9819,96	3300,79	0.42	0.14	91.0	73.9	134.5	99.5	43.2	26.1
Keel	19374,449	9271,107	9267,34	3732,67	0.38	0.18	93.5	75.7	133.3	105.1	40.0	29.8
Laanaceur	19358,560	10466,911	8214,40	971,40	0.34	0.02	97.0	69.6	133.2	97.1	36.0	27.4
Martime	20439,806	11201,499	8442,46	1440,82	0.28	0.01	101.0	79.0	146.8	104.3	45.4	25.7
Massine	21698,048	9865,053	8367,13	1635,56	0.33	0.30	99.0	70.1	141.0	100.3	42.6	30.1
Oussama	25922,759	7103,926	9118,48	282,22	0.44	0.06	93.0	84.4	136.4	112.1	43.2	27.2
Rabat 071	20332,729	12555,608	5637,08	96,64	0.44	0.23	98.0	78.4	141.5	102.2	43.8	23.9
Schooner	20278,655	9065,488	6519,94	2458,35	0.37	0.13	95.5	78.2	127.7	102.1	32.3	23.7
Skipper	24856,104	9802,395	10785,76	881,68	0.43	0.18	96.5	74.1	138.4	99.2	41.2	24.7
Sloop	21294,445	9011,896	8992,36	2159,95	0.42	0.23	93.0	71.5	123.8	97.3	31.2	26.1
SloopSA	21866,303	8255,864	8211,64	1190,24	0.42	0.15	101.0	77.2	143.1	103.8	41.5	26.6
SloopVIC	21783,479	10905,626	9509,30	1949,42	0.38	0.43	93.0	73.2	147.4	97.9	54.3	24.7
Taffa	24982,578	9466,035	10252,83	2171,64	0.38	0.30	97.0	67.5	142.4	100.0	44.7	32.9
Tamellalt	22897,071	8358,632	9270,00	1495,75	0.38	0.28	95.0	75.0	139.3	100.1	43.9	25.0
Vlamingh	21423,146	10494,490	9570,32	1590,69	0.44	0.16	97.0	80.5	140.9	106.7	43.7	26.3
Westminster	24702,908	8057,794	9874,43	1628,73	0.41	0.21	106.0	79.8	144.0	102.5	39.2	22.7
16988	16958.3		5988.4		0.35		100.5		136.8		36.1	
22416	21427.4		7017.5		0.33		105.0		145.2		40.2	
25765	18012.2		6030.6		0.34		106.0		139.1		33.0	

25899	19655.2	6235.0	0.32	99.0	137.7	39.6
27789	21713.8	6313.2	0.29	107.0	144.7	38.4
27814	20129.1	7825.7	0.39	96.0	124.8	28.9
28364	14515.9	5390.5	0.36	92.0	126.9	34.5
28436	18401.7	5405.6	0.32	99.0	136.3	38.2
28444	15683.5	5885.7	0.38	99.0	135.8	37.0
28458	18032.9	6005.4	0.33	96.5	132.8	36.6
28461	14192.8	4993.9	0.36	92.0	126.5	33.3
28464	13824.5	3993.7	0.27	96.5	126.3	29.6
Commander	25948.9	11255.9	0.44	96.0	131.3	35.3
heat 16-3	22354.7	8922.9	0.41	93.0	142.4	50.0

BY : Rendement biologique, GY : Rendement en grains, HI : Indice de récolte, DHE : Nombre de jours à l'épiaison, DMA : Nombre de jours à maturité, GFP : Période de remplissage des grains, MCH : Marchouch, WM : Wad Medani

## Annexe 10

Résultats des composantes de rendement des génotypes d'orge dans les deux stations d'expérimentation

Génotype	PHT		SPKM2		SLE		SNPSp		TKW	
	MCH	WM	MCH	WM	MCH	WM	MCH	WM	MCH	WM
16955	108.6	78.5	536.9	238.7	7.23	NM	51.0	28.4	34.94	31.36
16975	122.6	72.0	513.7	271.5	8.86	NM	44.9	29.8	45.47	17.43
22957	91.9	64.5	471.8	248.5	8.28	NM	21.8	26.0	43.68	27.95
23515	102.4	74.9	463.7	295.8	6.72	NM	45.2	25.4	36.94	35.86
26371	101.3	63.4	604.1	252.6	6.36	NM	45.8	28.4	35.09	47.80
26375	91.8	72.5	467.0	286.4	7.43	NM	25.9	29.5	32.87	52.41
27631	98.9	71.7	873.6	203.0	6.45	NM	46.9	21.4	38.60	46.58
27632	108.3	70.4	583.7	283.8	7.45	NM	38.4	21.2	33.87	49.02
27640	98.5	73.3	547.6	302.0	7.04	NM	39.2	23.9	40.97	43.20
27641	109.8	73.3	651.4	239.1	6.22	NM	39.9	23.2	41.84	16.34
27646	108.6	81.4	408.8	256.0	7.47	NM	43.9	18.2	35.13	52.68
27652	91.8	76.5	1134.9	314.2	8.47	NM	24.4	26.9	40.41	53.30
28033	97.9	73.4	621.3	281.6	6.00	NM	40.7	28.1	39.57	47.66
28385	102.4	69.8	556.8	269.9	7.77	NM	32.2	28.8	47.45	52.82
28386	112.8	70.6	627.4	241.5	7.21	NM	31.5	21.4	47.53	53.37
28396	96.1	77.4	494.5	251.5	6.88	NM	33.9	27.0	38.68	51.93
28399	83.4	66.1	561.5	262.4	6.67	NM	34.8	28.7	45.30	50.89
28448	108.1	76.3	552.4	259.8	6.85	NM	19.8	28.4	38.49	40.32
28449	112.2	69.0	535.0	308.3	8.59	NM	35.0	34.2	40.64	23.56
28455	102.7	67.0	566.6	330.2	7.55	NM	39.8	30.1	39.10	5.41
28987	112.9	77.6	624.6	216.9	6.34	NM	39.7	25.3	46.07	21.62
Acsad 60	94.9	71.9	690.9	315.4	8.60	NM	22.8	28.0	42.80	31.52
Adrar	102.9	68.6	908.4	309.5	8.33	NM	19.2	36.4	48.01	21.59
Aglou	85.6	69.9	1081.9	297.2	8.50	NM	20.0	27.0	43.84	25.95
Alestar	97.3	75.9	794.6	285.8	9.85	NM	26.5	26.7	47.26	29.24
Barque	95.3	73.5	706.8	282.7	7.18	NM	20.8	24.9	47.31	39.28
Bass	93.4	70.4	788.4	261.4	9.65	NM	23.5	28.1	50.90	34.97
Baudin	74.8	67.8	954.7	354.8	7.91	NM	18.1	32.5	48.80	27.93
BL10	109.5	80.7	500.8	285.7	6.21	NM	44.9	32.3	42.32	40.61
BL16	99.3	71.6	551.0	264.8	7.12	NM	54.4	23.4	38.16	36.91
Buloke	90.7	77.8	1049.7	226.0	7.47	NM	19.8	23.5	44.86	11.76
Capstan	76.6	66.0	690.6	270.8	8.43	NM	23.3	29.9	46.61	27.95
Flagship	88.2	71.4	941.8	260.9	7.48	NM	19.4	25.7	46.06	20.57
Fleet	85.7	67.8	556.5	366.6	7.35	NM	23.6	34.3	50.23	23.84
Gairdner	104.6	59.9	1189.8	221.5	11.36	NM	26.2	23.1	47.02	48.13
heat 16-1	100.2	76.3	489.6	253.5	5.59	NM	39.1	30.8	46.21	21.72
heat 16-2	98.8	73.8	541.8	328.0	5.39	NM	41.4	33.1	45.22	30.88
heat 16-4	92.0	69.4	1122.6	257.6	6.05	NM	21.8	29.5	45.67	25.94
heat 16-5	102.8	79.6	249.8	247.5	7.27	NM	43.8	27.3	46.57	38.25
heat 16-6	98.2	60.1	623.6	258.8	8.66	NM	20.4	20.8	48.66	16.33
heat 16-7	109.3	81.2	595.7	389.7	6.94	NM	46.5	34.6	42.07	30.48
heat 16-8	101.3	80.1	464.8	317.4	7.29	NM	34.1	29.9	38.87	26.90
heat 16-9	99.1	79.3	663.8	250.9	6.49	NM	51.5	31.0	43.58	33.20
heat 16-10	100.5	76.9	736.7	343.1	5.10	NM	44.3	28.6	45.34	46.35
Hindmarsh	83.7	67.6	1469.0	344.2	6.92	NM	18.8	36.0	43.38	16.58
Keel	78.5	61.8	777.6	301.9	6.45	NM	19.3	32.1	48.34	29.45

Laanaceur	95.5	75.4	812.5	286.5	5.21	NM	43.2	25.9	45.31	34.28
Martime	85.5	74.1	835.8	278.9	7.69	NM	21.0	27.4	51.27	32.98
Massine	98.3	74.8	519.6	226.2	5.73	NM	46.2	26.7	41.73	52.68
Oussama	106.2	61.3	551.3	226.3	6.23	NM	44.6	26.1	43.16	20.77
Rabat 071	108.5	82.7	461.2	271.6	8.79	NM	41.8	26.3	47.64	27.37
Schooner	99.4	71.1	900.6	247.1	7.40	NM	21.3	33.6	46.90	17.87
Skipper	90.9	74.3	883.5	214.1	6.73	NM	19.7	23.8	49.41	17.99
Sloop	91.9	70.0	797.5	293.3	6.36	NM	20.5	28.2	48.88	22.35
SloopSA	96.1	72.7	894.4	266.2	6.14	NM	19.0	23.2	50.09	32.86
SloopVIC	104.9	69.9	889.6	316.0	8.99	NM	23.1	28.7	51.89	27.38
Taffa	84.0	70.8	735.7	248.1	6.97	NM	47.6	29.4	36.91	40.97
Tmellalt	104.7	76.1	585.7	321.8	9.21	NM	24.9	34.5	44.58	19.66
IH4-H4	96.5	61.4	441.1	248.2	6.31	NM	48.1	25.8	43.18	44.33
IH17	94.7	62.4	631.6	259.6	6.33	NM	39.6	26.5	42.72	50.15
IH17-H2	92.4	80.9	588.5	280.2	5.95	NM	48.0	23.8	41.30	44.17
Vlamingh	98.0	72.6	983.0	282.6	8.65	NM	24.1	31.8	45.71	27.68
Westminster	100.5	71.4	733.8	263.9	10.94	NM	23.3	28.1	48.78	20.63
16988	98.0		476.5		6.02		52.9		36.14	
22416	112.8		419.7		8.56		55.3		40.80	
25765	99.8		740.7		8.57		46.4		36.30	
25899	121.5		424.0		8.60		22.4		43.18	
27789	82.7		489.4		6.49		51.6		43.61	
27814	100.7		749.3		5.69		55.7		33.70	
28364	94.1		746.6		6.78		37.9		33.91	
28436	102.2		596.1		6.94		46.4		42.61	
28444	111.5		422.3		8.20		62.3		40.06	
28458	113.7		747.4		8.69		28.9		37.37	
28461	107.4		465.7		7.14		36.4		35.50	
28464	110.5		535.8		8.54		42.8		42.85	
Commander	84.4		763.8		6.82		20.4		46.28	
heat 16-3	104.7		559.1		6.22		67.1		44.98	

PHT: Hauteur de la plante, SPKM2: nombre d'épis par mètre carré, SLE: longueur de l'épi, SNPsp: nombre de grains par épi, TKW: poids de mille grains.

## Annexe 11

Analyse de la variance du rendement et ses composantes à la station Marchouch

Traits	Moyenne	CV	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr (>F)
<b>SPKM2</b>	674,28	29,30%					
Répétition			1	1303	1303	0,0334	0,8556
Génotype			76	7060683	92904	2,3796	0,0004***
Bloc			20	869802	43490	1,1139	0,3625
Erreur			56	2186319	39041	NA	NA
<b>SNPSp</b>	35,517	20,60%					
Répétition			1	133,4	133,401	2,481	0,1209
Génotype			76	23852,7	313,852	5,8371	7,012e-11 ***
Bloc			20	862,9	43,146	0,8024	0,6999
Erreur			56	3011	53,768	NA	NA
<b>BY</b>	20594,94	15,50%					
Répétition			1	34506149	34506149	33,6806	3,167e-07 ***
Génotype			76	1,38E+09	18169140	1,7734	0,0128 *
Bloc			20	265620327	13281016	1,2963	0,2202
Erreur			56	57372577	10245103	NA	NA
<b>GY</b>	7807,093	17,60%					
Répétition			1	18166891	18166891	9,593	0,003 **
Génotype			76	48063924	6324201	3,339	2,68e-06 ***
Bloc			20	38638710	1931936	1,020	0,455
Erreur			56	10604424	1893647		
<b>HI</b>	37,85784	11,30%					
Répétition			1	219,5	219,506	12,0915	0,0009 ***
Génotype			76	4285,5	56,389	3,1062	8,725e-06 ***
Bloc			20	314	15,698	0,8647	0,6287
Erreur			56	1016,6	18,154	NA	NA
<b>TKW</b>	43,0845	3,50%					
Répétition			1	13,5	13,49	6,037	0,01713 *
Génotype			76	3513,1	46,226	20,6859	< 2e-16 ***
Bloc			20	35,3	1,767	0,7908	0,71289
Erreur			56	125,1	2,235	NA	NA

Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. SPKM2 : nombre d'épis par mètre carré, BY : Rendement biologique, GY : Rendement en grains, HI : Indice de récolte, TKW : Poids de mille grains

## Annexe 12

Analyse de la variance du rendement et ses composantes à la station Wad Medani

Traits	Moyenne	CV	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F value	Pr (>F)
<b>SPKM2</b>	276.82	16.9%					
Répétition			1	10314	10314.3	4.7188	0.03503 *
Génotype			62	186130	3002.1	1.3735	0.13074
Bloc			16	47939	2996.2	1.3707	0.19868
Erreur			46	100547	2185.8	NA	NA
<b>SNPSP</b>	28.04959	15.64%					
Génotype			62	1606.5616	25.91228	1.345093	0.1574896
Erreur			41	789.8364	19.26430	NA	NA
<b>BY</b>	9320.48	13.3%					
Répétition			1	9276344	9276344	6.217169	1.64e-02***
Génotype			62	292483406	4717474	3.161734	4.06e-05***
Bloc			16	67761471	4235092	2.838433	2.90e-03***
Erreur			46	68634424	1492053	NA	NA
<b>GY</b>	1910.71	24.9%					
Répétition			1	215098.7	215098.7	0.958397	3.32e-01***
Génotype			62	105452897	1700853	7.578349	3.08e-11***
Bloc			16	5296556.0	331034.7	1.474963	1.509e-01**
Erreur			46	10324048.3	224435.8	NA	NA
<b>HI</b>	20.5788	22.5%					
Répétition			1	19.23847	19.23847	0.795572	3.77e-01**
Génotype			62	12823.4563	206.8299	8.553086	3.22e-12***
Bloc			16	228.83587	14.30224	0.591443	8.73e-01**
Erreur			46	1112.36775	24.18191	NA	NA
<b>TKW</b>	33.1442	23.8%					
Génotype			62	18191.278	293.40771	4.703342	4.06e-07***
Erreur			41	2557.695	62.38281	NA	NA

Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. SPKM2 : nombre d'épis par mètre carré, BY : Rendement biologique, GY : Rendement en grains, HI : Indice de récolte, TKW : Poids de mille grains

## Annexe 13

Analyse des indices de tolérance à la chaleur sur le rendement en grain pour les géotypes d'orge testés dans des conditions de stress thermique à Wad Medani - Soudan

<b>Géotypes</b>	<b>HTE</b>	<b>Rang (HTE)</b>	<b>HSI</b>	<b>Rang (HSI)</b>	<b>GM</b>	<b>Rang (GM)</b>	<b>HTI</b>	<b>Rang (HTI)</b>
16955	8.12	55	1.19	55	2357.69	55	0.08	55
16975	29.85	16	0.91	16	4168.01	26	0.27	26
22957	30.29	15	0.91	15	3961.35	30	0.24	30
23515	9.51	53	1.18	53	2006.04	57	0.06	57
26371	22.27	34	1.01	34	3507.25	40	0.19	40
26375	28.62	21	0.93	21	3647.45	37	0.20	37
27631	6.37	58	1.22	58	1420.93	59	0.03	59
27632	42.43	6	0.75	6	3116.78	48	0.15	48
27640	32.17	14	0.88	14	2829.92	51	0.12	51
27641	1.73	62	1.28	62	866.37	62	0.01	62
27646	28.69	19	0.93	19	3310.68	44	0.17	44
27652	27.75	23	0.94	23	3694.11	36	0.21	36
28033	25.94	25	0.96	25	4414.32	22	0.30	22
28385	50.44	2	0.64	2	3760.98	32	0.22	32
28386	38.12	9	0.80	9	4349.89	24	0.29	24
28396	60.31	1	0.52	1	4550.76	20	0.32	20
28399	39.48	8	0.79	8	4885.66	10	0.36	10
28448	37.62	11	0.81	11	3148.95	47	0.15	47
28449	18.24	42	1.06	42	2329.02	56	0.08	56
28455	2.64	61	1.27	61	1099.67	61	0.02	61
28987	47.56	3	0.68	3	4665.83	17	0.33	17

Acsad 60	19.90	38	1.04	38	3694.99	35	0.21	35
Adrar	25.92	26	0.96	26	4833.47	13	0.36	13
Aglou	29.10	18	0.92	18	5113.97	6	0.40	6
Alestar	18.76	41	1.06	41	4657.12	18	0.33	18
Barque	35.51	12	0.84	12	4235.71	25	0.27	25
Bass	17.86	43	1.07	43	3560.50	39	0.19	39
Baudin	23.96	31	0.99	31	5226.06	5	0.42	5
BL10	25.76	27	0.96	27	3391.24	42	0.18	42
BL16	15.46	49	1.10	49	3181.26	46	0.15	46
Buloke	7.47	57	1.20	57	2514.66	53	0.10	53
Capstan	22.28	33	1.01	33	5275.81	4	0.42	4
Flagship	27.29	24	0.94	24	4968.46	9	0.38	9
Fleet	16.49	47	1.09	47	3206.66	45	0.16	45
Gairdner	42.93	4	0.74	4	5592.97	3	0.48	3
heat 16-1	29.74	17	0.91	17	4153.54	27	0.26	27
heat 16-2	25.32	28	0.97	28	4809.64	14	0.35	14
heat 16-4	9.49	54	1.18	54	2453.79	54	0.09	54
heat 16-5	20.12	37	1.04	37	4681.49	16	0.33	16
heat 16-6	18.77	40	1.06	40	3342.45	43	0.17	43
heat 16-7	3.84	59	1.25	59	1203.70	60	0.02	60
heat 16-8	42.83	5	0.74	5	4621.02	19	0.33	19
heat 16-9	23.17	32	1.00	32	5001.31	8	0.38	8
heat 16-10	14.08	51	1.12	51	3587.23	38	0.20	38
Hindmarsh	28.63	20	0.93	20	4835.67	12	0.36	12
Keel	40.33	7	0.78	7	5885.47	1	0.53	1

Laanaceur	11.57	52	1.15	52	2793.78	52	0.12	52
Martime	16.98	44	1.08	44	3479.13	41	0.18	41
Massine	19.64	39	1.04	39	3708.13	34	0.21	34
Oussama	2.92	60	1.26	60	1558.91	58	0.04	58
Rabat 071	1.73	63	1.28	63	740.87	63	0.01	63
Schooner	37.79	10	0.81	10	4007.85	29	0.25	29
Skipper	8.02	56	1.20	56	3054.12	50	0.14	50
Sloop	24.52	29	0.98	29	4452.39	21	0.30	21
SloopSA	14.23	50	1.11	50	3097.81	49	0.15	49
SloopVIC	20.94	36	1.03	36	4351.73	23	0.29	23
Taffa	21.04	35	1.03	35	4703.47	15	0.34	15
Tamellalt	16.23	48	1.09	48	3734.72	33	0.21	33
IH4-H4	33.71	13	0.86	13	5701.45	2	0.50	2
IH17	23.97	30	0.99	30	5030.61	7	0.39	7
IH17-H2	28.43	22	0.93	22	4880.96	11	0.36	11
Vlamingh	16.65	45	1.08	45	3904.85	31	0.23	31
Westminster	16.55	46	1.08	46	4016.81	28	0.25	28

HTE : Efficacité de tolérance à la chaleur, HSI : Indice de susceptibilité à la chaleur, GM : Moyenne géométrique, HTI : Indice de tolérance à la chaleur

## ***Résumé***

Notre étude a été faite sur des génotypes d'orge (*Hordeum vulgare* L.) de différentes origines pour étudier leur comportement face aux hautes températures comparativement à ceux installés sous conditions favorables. Une expérience de caractérisation de génotypes a été réalisée dans deux environnements différents : à Marchouch (conditions optimales) et à Wad Medani (conditions de stress thermique) durant la campagne 2017-2018. Les génotypes comprenaient des variétés marocaines, des variétés australiennes, des génotypes de la banque de gènes sélectionnées par l'approche FIGS, des lignées prometteuses de l'ICARDA et des lignées sélection intra-cultivars isolées pour leur potentiel de rendement élevé.

Les essais sont installés selon le protocole expérimental alpha-lattice avec deux répétitions. Dans les deux environnements, des caractéristiques physiologiques (la fluorescence chlorophyllienne et la température du couvert végétal), phénologiques (nombre de jours jusqu'à l'épiaison, nombre de jours jusqu'à maturité, période de remplissage des grains) et agronomiques en relation avec le rendement et ses composantes (nombre d'épi/m<sup>2</sup>, nombre de grains par épi, rendement biologique et le rendement en grains) ont été mesurés. L'indice de récolte et quatre indices de tolérance au stress thermique ont été calculés en fonction du rendement en grain dans les deux environnements. En outre, une analyse de corrélation entre tous les traits a été réalisée.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'effet négatif du stress thermique sur la croissance et le développement des génotypes étudiés. Ces effets se manifestent par une réduction de l'activité photosynthétique, une augmentation de la température de la canopée, un raccourcissement du cycle de croissance des plantes, et une diminution au niveau du rendement et ses composantes.

En termes de rendement en grain, cinq accessions sélectionnées par l'approche FIGS ont enregistré un rendement élevé en grain dans les conditions de stress thermique, dont le maximum a été noté pour les variétés australiennes Keel et Gairdner.

En se basant sur les indices de tolérance au stress thermique, les valeurs de GM (Moyenne géométrique) et de HTI (Indice de tolérance à la chaleur) ont montré les variétés combinant les deux caractères: potentiel élevé de rendement en grain et tolérance au stress thermique. Ces variétés sont: Baudin, Capstan, IH4-H4 et IH17. En supplément, l'analyse de corrélation a montré différents degrés de signification entre les traits physiologiques, phénologiques et agronomiques.

**Mots clés :** Orge, *Hordeum vulgare*, FIGS, stress thermique, tolérance au stress thermique, indices de tolérance à la chaleur.