

CHADLI BENDJEDID EL TARF UNIVERSITY

جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف



FACULTY OF NATURE AND LIFE SCIENCES

كلية علوم الطبيعة والحياة

DEPARTMENT OF BIOLOGY

قسم العلوم البيولوجية

**THÈSE**

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT DE 3^{ème} CYCLE LMDFilière : **Sciences biologiques**Spécialité : **Ecologie fonctionnelle, évolutive et des communautés**

Par :

Melle ZAAFOUR Fatma Zohra

Thème

Révélation génétique et caractérisation qualitative de quelques génotypes de Blé dur *Triticum durum* et étude des interactions génotype-environnement

Soutenue publiquement le 09 / 12 /2025 devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr NASRI Hichem	Prof.	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Président
Mme LAZLI Amel	Prof.	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Rapporteur
Mme HACINI Nesrine	Prof.	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Co-rapporteur
Mme FELLAH Imane	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Examineur
Mr BRINIS Amir	MCA	Université Badji Mokhtar-Annaba	Examineur
Mr SLIMANI Abderrachid	MCA	Université Badji Mokhtar-Annaba	Examineur

Année universitaire : 2025/2026

REMERCEMENTS

*Avant tout, louanges à **ALLAH** ; qui m'a guidé et m'a donné la force, la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à ma directrice de thèse, Professeur **LAZZI Amel** ; pour son suivi attentif, sa patience, sa disponibilité et ses conseils précieux, sans lesquels ce travail n'aurait pu aboutir.*

*Je tiens à remercier Professeur **HACINI Nesrine** ; la co-directrice de thèse, pour m'avoir guidé avec rigueur et bienveillance dans les différentes étapes de ce travail.*

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude, mes remerciements et mon profond respect aux membres du jury :

*Mr **NASRI Hichem** ; Professeur à l'université Chadli Bendjedid d'El Tarf, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.*

*Mme **FELLAH Imane** ; Maître de Conférence à l'université Chadli Bendjedid d'El Tarf, qui me fait l'honneur d'examiner ce travail.*

*Mr **BRINIS Amir** ; Maître de Conférence à l'université Badji-Mokhtar d'Annaba, pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*Mr **SLIMANI Abderrachid** ; Maître de Conférence à l'université Badji-Mokhtar, pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*Mes remerciements vont aussi à Mr **BAROUR Choukri** ; Professeur à l'université Mohamed Cherif Messaadia de Souk-Ahras, pour m'avoir aidé à réaliser l'étude statistique de la première partie de mon étude.*

*Je voudrais exprimer mes sincères remerciements au Professeur **MAAZI Mohamed Cherif** ; Doyen de la Faculté des Sciences de la Nature et de la vie de l'université Mohamed Cherif Messaadia de Souk-Ahras, pour m'avoir facilité l'accès et l'installation de ma serre au niveau de l'université.*

*Mes remerciements les plus sincères sont aussi adressés à Professeur **KAOUACHI Nouha** ; directrice du laboratoire des Ecosystèmes Aquatiques et Terrestres de l'université Mohamed Cherif Messaadia de Souk-Ahras de m'avoir accueillie et mis à disposition les moyens nécessaires et indispensables pour mener à bon terme mes essais pendant deux années consécutives.*

*Je remercie également Dr **Desclaux Dominique**, Ingénieur de recherche à l'ENSAM de Montpellier, pour m'avoir accueillie au sein du laboratoire de Diversité et Génome des Plantes Cultivées à l'INRA de Montpellier. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde sympathie.*

*Je remercie Dr **BENBELKACEM Abdelkader**, Directeur de recherche et responsable des programmes nationaux d'amélioration génétique des céréales, INRA, pour avoir mis à ma disposition les variétés qui ont servi de matériel végétal de base.*

Je remercie le directeur du laboratoire de suivi de la production du groupe Amor Benamor, de m'avoir accepté au niveau de l'établissement pour effectuer mes analyses. Merci aussi à Loubna, Cherif et Meriem pour leur aide et leur encouragement.

*J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **EL-ARIBI** et Monsieur **AOUADI** pour m'avoir donné l'accès à leurs champs afin d'installer mon dispositif expérimental.*

Enfin, je tiens à adresser des remerciements particuliers à mes chers parents, piliers de ma vie, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible. Cette réussite est autant la vôtre que la mienne, j'espère que vous en serez fiers de moi.

*J'exprime ma profonde gratitude à mes sœurs **Soumaya** et **Zineb** et à mon frère **Abd El-Hafid**, lumière de ma vie, dont le sourire et le soutien m'ont accompagné dans les moments difficiles comme dans les plus beaux.*

À toutes celles et ceux qui m'ont aidée, de près ou de loin, je tiens à exprimer mes remerciements empreints de sincérité et de reconnaissance.

RESUME

L'interaction entre génotypes et environnements constitue un facteur déterminant dans l'expression des performances morpho-physiologiques et technologiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Les résultats de cette étude mettent en évidence une variabilité génétique importante et des réponses adaptatives différenciées face aux contraintes abiotiques, notamment au déficit hydrique et thermique. Ces réponses se traduisent par des ajustements morphologiques (réduction de la hauteur des tiges, modification de la longueur des épis et des barbes) ainsi que par l'accumulation d'osmolytes tels que la proline et les sucres solubles. Deux modalités de tolérance ont été identifiées : une adaptation active, illustrée par le génotype v24, et une résilience stable, représentée par le génotype v27. Par ailleurs, l'évaluation de la qualité technologique révèle une différenciation nette entre générations : la première (G1) se distingue par de meilleures aptitudes de transformation (gluten, amidon, couleur), tandis que la seconde (G2) manifeste une supériorité en termes de rendement et de poids des grains. Ces résultats confirment que la tolérance à la sécheresse et le maintien de la qualité reposent sur des mécanismes complémentaires et polygéniques, et soulignent la nécessité d'intégrer simultanément la diversité génétique et l'interaction génotype × environnement dans les programmes d'amélioration, afin de développer des variétés tolérantes conciliant productivité et qualité dans un contexte de changements climatiques croissants.

Mots clés : Blé dur, déficit hydrique, interaction génotype x environnement, adaptation, Amélioration.

ABSTRACT

The interaction between genotypes and environments constitutes a determining factor in the expression of morpho-physiological and technological performances of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). The results of this study highlight significant genetic variability and differentiated adaptive responses to abiotic constraints, particularly water and heat stress. These responses include morphological adjustments (reduction in stem height, modification of spike and awn length) as well as the accumulation of osmolytes such as proline and soluble sugars. Two modes of tolerance were identified: an active adaptation, illustrated by genotype v24, and a stable resilience, represented by genotype v27. Moreover, the evaluation of technological quality revealed a clear differentiation between generations: the first (G1) displayed superior processing traits (gluten, starch, color), whereas the second (G2) demonstrated higher yield potential and grain weight. These findings confirm that drought tolerance and quality maintenance rely on complementary and polygenic mechanisms, and emphasize the necessity of simultaneously integrating genetic diversity and genotype $\times$ environment interaction into breeding programs, in order to develop adaptive varieties combining productivity and quality in the context of increasing climate change.

Keywords: Durum wheat, water deficit, genotype $\times$ environment interaction, adaptation, selection.

ملخص

تشكل التفاعلات بين الأنماط الوراثية والبيئات عاملاً مهماً في تحديد الأداء المورفولوجي، الفيزيولوجي والتكنولوجي للقمح الصلب. وقد أبرزت نتائج هذه الدراسة وجود تباين وراثي واسع واستجابات تكيفية متباينة تجاه العوامل المناخية، خاصة الجفاف والإجهاد الحراري. وتجلت هذه الاستجابات في تعديلات مورفولوجية (انخفاض طول الساق، وتغير طول السنبله والسبلات) بالإضافة إلى تراكم الأسموليتات مثل البرولين والسكريات الذائبة. وتم تحديد نمطين من التحمل: تكيف نشط يمثل النمط الوراثي v24 ، وتكيف مستقر يمثل النمط الوراثي v27. كما أظهرت دراسة الجودة التكنولوجية وجود تمايز واضح بين الأجيال: إذ تميز الجيل الأول (G1) بخصائص تحويلية متفوقة (الغلوتين، النشا، اللون)، بينما تميز الجيل الثاني (G2) بتفوق في المردودية ووزن الحبوب. وتؤكد هذه النتائج أن تحمل الجفاف والحفاظ على الجودة يعتمدان على آليات متكاملة و تنوع جيني، كما تبرز ضرورة دمج التنوع الوراثي وتفاعل النمط الوراثي × البيئة في برامج تحسين النوعية، بهدف تطوير أصناف متأقلمة، تجمع بين الإنتاجية والجودة في ظل التغيرات المناخية المتزايدة.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب، الجفاف، تفاعل النمط الوراثي × البيئة، التكيف، التحسين الوراثي.

LISTE DES FIGURES

Intituler	Pages
Représentation schématique de l'histoire évolutionnaire des espèces de <i>Triticum</i> et <i>Aegilops</i>	4
Bulletin de la FAO sur la production, utilisation et stocks de blé	6
Les principales zones céréalières en Algérie.	7
Les principales zones céréalières en Algérie et la répartition des variétés des blés (blé tendre et blé dur) homologuées et en production par zone agro écologique.	9
Morphologie des graminées (exemple du blé)	13
Structure histologique du grain de blé dur	14
La phase semis-levée de la période végétative du blé	16
La phase levée – tallage du blé dur	16
Stade montaison – épiaison	17
Courbes caractéristiques du développement du grain de blé	18
Différence entre un grain vitreux et un grain mitadiné	25
Composants morphologiques caractéristiques de la qualité du blé	29
Sensibilité au stress hydrique suivant le stade phénologique du blé	35
Rouille brune sur blé	43
Oïdium blanc sur blé	43
La fusariose du blé	43
Adaptation de la plante de blé sous stress environnemental	49
Représentation schématique des idiotypes de blé dur correspondant aux conditions du Moyen Orient (Haurani 27) et des hauts plateaux algériens (Ouad zenati 368)	54
Nouvelles idéotypes de blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) obtenues en Russie par combinaison de QTLs de plus de 6000 génotypes cultivés dans diverses conditions environnementales et géographiques pendant 15 ans	60
Irrigation d'appoint du blé	63
Localisation géographique de la zone d'étude Tiffech.	65
Bilan météorologique de la zone de Tiffech	65
Localisation géographique de la zone d'étude Sidi Fredj	66
Bilan météorologique de la zone de Sidi Fredj	66
Localisation géographique de DiAScope	67
Bilan météorologique de la zone de Mauguio	67
Dispositif expérimental	69
Résultats de l'analyse en composantes principales	70
Représentation graphique individuelle des génotypes sur le plan D1xD2 de l'ACP et leur répartition selon le milieu de culture	70

Représentation graphique individuelle des génotypes sur le plan D2xD3 de l'ACP	71
Graphe de corrélation des paramètres morphologiques sur le site expérimental : Mauguio, Tiffech, Sidi Fredj.	72
Comparaison inter-variétale du comportement morphologique sous l'effet des conditions climatiques de chaque site expérimental	73
Dispositif expérimental du semis	78
Mesure de la teneur relative en eau	79
Dosage des sucres solubles	80
Teneur relative en eau sous l'effet du stress hydrique	82
Surface foliaire sous l'effet du stress hydrique	83
Poids spécifique foliaire sous l'effet du stress hydrique	85
Teneur en sucres solubles sous l'effet du stress hydrique	86
Accumulation de proline sous l'effet du stress hydrique	87
Teneur en protéine sous l'effet du stress hydrique	88
Boxplot de la concentration en sucres solubles évalué chez 30 génotypes de blé soumis à trois régimes hydriques.	89
Boxplot de la teneur de protéine évalué chez 30 génotypes de blé soumis à trois régimes hydriques	90
Boxplot de l'accumulation en proline évalué chez 30 génotypes de blé soumis à trois régimes hydriques	91
Moulins du groupe Amor Benamor, El-Fedjoudj, Guelma	97
Spectrophotomètre <i>Infraneo</i>	97
Matériel requis pour l'analyse de la teneur en gluten	99
Chromamètre Konica Minolta, CR- 400	100
Analyse en composantes principales	101
Comparaison de la teneur en protéine des deux générations	102
Comparaison de la teneur en Gluten des deux générations	103
Comparaison de la teneur en Amidon des deux générations	103
Comparaison du taux d'humidité des deux générations	104
Comparaison de l'indice de jaune des deux générations	104
Comparaison du taux de germination des deux générations	105
Comparaison du poids de mille grains des deux générations	105

LISTE DES TABLEAUX

Intituler	Pages
La classification de <i>Triticum durum</i> Desf.	3
Classification des espèces du genre <i>Triticum</i>	4
Liste des blés durs mentionnés par l'ITGC	10
Principales caractéristiques agronomiques et technologiques des variétés de blé dur locales et introduites, sélectionnées par l'ITGC pour la production céréalière	11
Distribution biochimique des différentes parties d'un grain de blé	15
Effet de la température sur les phases de développement de blé dur	19
Effet du stress hydrique sur le développement des céréales	19
Les besoins en éléments fertilisants (NPK) de blé dans les zones potentielles de production	22
Matériel végétal étudié	68
Liste des variétés étudiées	77
Liste du matériel végétal	96

LISTE DES ABREVIATIONS

GWAS : Genome-Wide Association Studies

AR6 : The Sixth Assessment Report

UNGA : United Nations General Assembly

FAO : Food And Agriculture Organization

ITGC : Institut Technique Des Grandes Cultures

MADR : Ministère De L'agriculture Et Du Développement Rural

SAU : Superficie Agricole Utile

CCG : Commission Canadienne Des Grains

CWAD : Canada Western Amber Durum

CE : Conductivité Electrique

N : L'azote

P : Le Phosphore

K : Le Potassium

SDS : Sodium Dodecyl Sulfate

PMG : Poids De Mille Grains

TRE : Teneur Relative En Eau

SF : Surface Foliaire

PSF : Poids Spécifique Foliaire

PS : Poids Spécifique

PF : Poids Frais

PT : Poids Turgide

HRGP : Glycoprotéines Riches En Hydroxyproline

LEA : Late Embryogenesis Abundant

GWAS : Genome-Wide Association Studies

QTL : Cartographie De Locus De Caractères Quantitatifs

BS : Biostimulants

IDR : L'irrigation Déficitaire Régulée

ACP : Analyse En Composantes Principales

T : Régime Témoin

S1 : Stress Contrôlé

S2 : Stress Intense

Gi : Gluten Index

TGH : Teneur en Gluten Humide

TGS : Teneur en Gluten Sec

G1 : Première Génération

G2 : Deuxième Génération

SOMMAIRE

Résumé

Abstract

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 1

PARTIE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I. LE BLE DUR

1. Définition et importance agroéconomique	3
1.1. Classification et Origine	3
1.2. Importance et intérêt de blé dur	5
1.3. Zones clés de culture	7
1.3.1. Dans le monde	7
1.3.2. En Algérie	7
1.4. Diversité du blé dur	8
1.4.1. Dans le monde	8
1.4.2. En Algérie	9
2. Caractéristiques morphologiques, physiologiques et agronomiques	12
2.1. Morphologie du blé	12
2.1.1. Appareil radiculaire	12
2.1.2. Appareil Végétatif (système aérien)	12
2.1.3. Appareil Reproducteur	12
2.2. Structure du grain de blé dur	13
2.2.1. Les enveloppes	14
2.2.2. Le germe (embryon)	14
2.2.3. L'albumen ou amande (L'endosperme)	14
2.2.4. Composition biochimique	15
2.3. Cycle phénologie du blé dur	15
3. Exigences de blé dur	18
3.1. Exigence climatique	18
3.1.1. Température	18

3.1.2. L'eau	19
3.1.3. Eclaircissement	20
3.2. Exigence édaphique	20
3.3. Fertilisation	21
4. Critères de qualité du blé dur	23
4.1. Qualité technologique	23
4.1.1. Teneur en protéines	23
4.1.2. Force de gluten	24
4.1.3. Taux de vitrosité	25
4.1.4. Indice de jaune	26
4.1.5. Viabilité et vigueur	26
4.1.6. Poids de mille grains	27
4.1.7. Poids spécifique	27
4.1.8. Valeur semoulier	27
4.1.9. Qualité culinaire	28
4.2. Caractères agro morphologique de qualité	29
4.2.1. Hauteur de la tige	29
4.2.2. L'épi	31
4.2.3. Les barbe	31
5. Enjeux actuels et défis	32

CHAPITRE II. LE STRESS ENVIRONNEMENTAL

1. Stress hydrique	34
1.1. Effet sur le blé	35
1.1.1. Sur la phénologie	35
1.1.2. Sur la morphologie	36
1.1.3. Sur la physiologie	37
1.1.4. Sur le rendement et ses composants	38
2. Stress thermique	39
2.1. Effet sur le blé	40
2.1.1. Sur la phénologie	40
2.1.2. Sur la morphologie	41
2.1.3. Sur la physiologie	41
2.1.4. Sur le rendement et ses composants	42

3. Stress biotique	42
3.1. Effet sur le blé	44
4. Mécanismes d'adaptation	45
4.1. Adaptation phénologique	46
4.2. Adaptation morphologique	46
4.3. Adaptation physiologique	48
4.4. Adaptation biochimique	50
4.5. Adaptation génétique	51

CHAPITRE III. AMELIORATION DU BLE ET SOLUTIONS

1. Génétique et amélioration variétale	53
1.1. La sélection	53
1.1.1. Critères qualitatifs de sélection	53
1.1.1.1. Pour adapter au stress environnemental	54
1.1.1.2. Pour améliorer la qualité	57
1.2. Stratégies de caractérisation fonctionnelle de gènes	57
1.2.1. Études de GWAS (Genome-Wide Association Studies)	58
1.2.2. La cartographie de locus de caractères quantitatifs (QTL)	58
1.3. Réintroduction du génome locale	59
2. Amélioration biochimique et technique	60
2.1. Biostimulants	60
2.2. Pulvérisation foliaire (foliar spraying)	61
2.3. Enrobage des semences	61
3. Stratégies agronomiques	62
3.1. Techniques d'irrigation	62
3.2. Gestion du sol	63

PARTIE 2 : VOLET EXPERIMENTALE

CHAPITRE I. INTERACTION GÉNOTYPES DE BLÉ DUR/ ENVIRONNEMENT

Introduction	64
1. Matériel et méthodes	64
1.1. Présentation des zones d'étude	64
1.1.1. Tiffech	65

1.1.2. Sidi Fredj	66
1.1.3. Mauguio	67
1.2. Matériel végétal	68
1.3. Dispositif expérimental	68
1.4. Paramètres mesurés	68
1.5. Analyse de données	69
2. Résultats et discussion	69
2.1. Analyse en composantes principales	69
2.2. Analyses de la corrélation	71
2.3. Comparaison du comportement morphologique des génotypes	73
2.3.1. La hauteur moyenne de la tige	73
2.3.2. La distance feuille étendard -épi	74
2.3.3. La longueur d'épi	74
2.3.4. La longueur des barbes	74
2.4. Discussion	74

CHAPITRE II. EFFET DU STRESS HYDRIQUE SUR LA PHYSIOLOGIE DE QUELQUES GÉNOTYPES DE BLÉ DUR

Introduction	76
1. Matériel et méthodes	77
1.1. Matériel végétal	77
1.2. Dispositif expérimental	77
1.3. Paramètres mesurés	78
1.3.1. Teneur relative en eau (TRE)	78
1.3.2. Surface foliaire (SF)	79
1.3.3. Poids spécifique foliaire (PSF)	79
1.3.4. Les sucres solubles	79
1.3.5. L'accumulation de proline	80
1.3.6. La teneur en protéines	81
1.4. Analyse de données	81
2. Résultats et discussion	81
2.1. Comparaison du comportement physiologique des génotypes	81
2.1.1. Teneur relative en eau (TRE)	81
2.1.2. Surface foliaire (SF)	83

2.1.3. Poids spécifique foliaire (PSF)	84
2.1.4. Les sucres solubles	85
2.1.5. L'accumulation de proline	87
2.1.6. La teneur en protéines	88
2.2. Comparaison entre les régimes hydriques	89
2.2.1. Les sucres solubles	89
2.2.2. La teneur en protéines	90
2.2.3. L'accumulation en proline	90
2.3. Discussion	91

CHAPITRE III. EFFET DES PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX SUR DEUX GÉNÉRATIONS DE BLÉ DUR

Introduction	95
1. Matériel et méthodes	96
1.1. Matériel végétal	96
1.2. Site expérimental	96
1.3. Paramètres mesurés	97
1.3.1. Teneur en protéines	97
1.3.2. Teneur en gluten	98
1.3.3. Teneur en amidon	99
1.3.4. Humidité	99
1.3.5. Indice de jaune	99
1.3.6. Taux de germination	100
1.3.7. Poids de mille grains	100
1.4. Analyse de données	101
2. Résultats et discussion	101
2.1. Analyse en composantes principales	101
2.2. Comparaison de la qualité technologique des deux générations	102
2.2.1. Teneur en protéines	102
2.2.2. Teneur en gluten	102
2.2.3. Teneur en amidon	103
2.2.4. Humidité	103
2.2.5. Indice de jaune	104
2.2.6. Taux de germination	105

2.2.7. Poids de mille grains	105
2.3. Discussion	106
 CONCLUSION GENERALE	 109
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	112
ANNEXE	

Introduction

Le rythme croissant des événements climatiques défavorables liés au changement climatique est alarmant, et il s'accompagne d'une incertitude majeure quant à leurs effets sur la production alimentaire mondiale (**Bowerman et al., 2023**). La région méditerranéenne est identifiée comme un « hotspot » climatique. Les projections indiquent une hausse de température de +2 à +4 °C d'ici 2100, accompagnée d'une diminution des précipitations annuelles de 10 à 30 %, particulièrement en été (**AR6, 2021**). Cette réduction s'accompagne d'une intensification des sécheresses et des vagues de chaleur, accentuant le stress hydrique agricole et la désertification (**Cramer et al., 2018**).

La sécurité alimentaire est de plus en plus menacée par le changement climatique et la stagnation des rendements (**Teng et al., 2023**). L'importance des défis interconnectés entre la sécurité alimentaire et les changements climatiques, dans un contexte de croissance démographique continue, est aujourd'hui largement reconnue comme l'une des priorités majeures à l'échelle mondiale (**UNGA, 2015**).

Le blé qui fournit environ 20 % de la consommation mondiale de protéines, connaît depuis 2010 une stagnation de ses rendements, avec une augmentation annuelle de seulement 0,7 % (**Gerber et al., 2024**). Le blé dur (*Triticum turgidum* ssp. *Durum*) est l'une des principales céréales cultivées et consommées à travers le monde. Il occupe une place stratégique, notamment dans les pays de la région méditerranéenne, où il constitue une base alimentaire essentielle. Sa transformation en semoule, couscous, pâtes alimentaires et autres produits dérivés en fait une ressource incontournable pour l'alimentation humaine (**Pena & Pfeiffer, 2005**).

La production du blé est fortement affectée par les fluctuations climatiques en raison de la longue durée de son cycle végétatif, ce qui augmente son exposition aux stress environnementaux. Environ 40 % de la variabilité annuelle de rendement est expliquée par les stress combinés de sécheresse et de chaleur, qui constituent les principaux facteurs limitants de la productivité. Plus de 92 % des régions productrices de blé subissent au moins un épisode de stress combiné par saison, avec une fréquence et une intensité en hausse de plus de 28 % depuis les années 1980 (**He et al., 2022**). Et c'est ce qui place le blé au cœur d'une course mondiale visant à garantir la production des volumes suffisants et une qualité technologique élevée pour une population en forte croissance.

Un mécanisme qui pourrait jouer un rôle dans la sécurisation future de nos systèmes alimentaires est la sélection végétale visant à accroître une production agricole durable. Les recherches en amélioration des plantes, utilisant diverses techniques de sélection, sont déjà en cours et visent à produire des cultures présentant des rendements plus élevés (**Takai et al., 2013**) et capables de faire face aux événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses (**Oladosu et al., 2019**).

L'amélioration des cultures repose sur la richesse de la diversité génétique, indispensable à la sélection et à l'obtention de cultivars innovants. La sélection de cultivars de blé présentant des performances élevées et stables dans des conditions environnementales diverses est cruciale.

Cependant, les mécanismes qui sous-tendent la stabilité du rendement restent encore moins compris (**Stetkiewicz *et al.*, 2023**).

Le principal défi réside en grande partie dans la complexité des interactions entre les génotypes et l'environnement. Ainsi, l'un des défis majeurs pour l'amélioration de la stabilité du rendement réside dans la sélection d'indices de stabilité appropriés ainsi que d'environnements et de génotypes représentatifs. L'amélioration génétique de variétés de blé stables nécessite une connaissance intégrée des caractères cibles qui renforcent le potentiel de rendement (**Fischer *et al.*, 2024**).

La caractérisation des interactions génotype $\times$ environnement permet de mieux orienter les programmes de sélection vers un double objectif : maximiser le rendement potentiel tout en garantissant la stabilité en conditions de stress. Donc l'étude des réponses morphologiques et physiologiques du blé dur face aux contraintes environnementales, ainsi que l'effet de ces contraintes sur la qualité et la stabilité du blé constitue une stratégie clé dans les programmes de sélection visant au développement de variétés résistantes.

L'objectif de ce travail a été tout d'abord l'étude de l'interaction génotype $\times$ environnement et l'évaluation des paramètres agro-morphologiques d'adaptation des plantes du blé dans différentes zones climatiques, puis l'identification des caractères morpho-physiologiques d'adaptation des génotypes exposés au déficit hydrique, ainsi que l'analyse de la qualité technologique de deux générations exposées au stress environnemental.

Le manuscrit a été structuré en deux grandes parties distinctes :

- Une première partie, constitue une synthèse bibliographique et comporte trois chapitres : l'un concernant le Blé dur, l'autre le stress environnemental et un dernier relatif à l'amélioration du blé et solutions
- une deuxième partie, expérimentale, comporte trois chapitres : le premier sur l'interaction génotypes de blé dur/ environnement, le second sur l'effet du stress hydrique sur la physiologie de quelques génotypes de blé dur et le dernier sur l'effet des paramètres environnementaux sur deux générations de blé dur

Enfin, une conclusion générale qui reprend l'essentiel des résultats obtenus, ponctuée par des perspectives de recherche.

PARTIE I.
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I. LE BLE DUR

1. Définition et importance agroéconomique

Le Blé dur (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) est une monocotylédone de la famille des Graminées, de la tribu des Triticées et du genre *Triticum*. Il s'agit d'une graminée annuelle de hauteur moyenne et dont le limbe des feuilles est aplati. L'inflorescence en épi terminal se compose de fleurs parfaites (Bozzini, 1988).

Le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) a été toujours cultivé dans les régions à climat de type méditerranéen telles que l'Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Egypte), le sud de l'Europe (Espagne, France, Italie, Grèce), et le Moyen Orient (Turquie, Syrie, Palestine). Cette espèce réputée tolérante des stress hydrique et thermique, est cultivée en Amérique dans les régions Ouest des Dakota et du Montana, aux USA, et dans le Saskatchewan et l'Alberta, au Canada (Hannachi et al., 2013).

1.1. Classification et origine

Selon Feillet, (2000), Le blé est une céréale autogame appartenant au groupe des angiospermes monocotylédones, de la famille des Poaceae, tribu des Triticées et genre *Triticum*. Leur famille comprend 600 genres et plus de 5000 espèces. La classification du blé dur est représentée dans le tableau 1.

Tableau 1 : la classification de *Triticum durum* Desf. (Feillet, 2000)

Embranchement	Spermaphytes	Sous-Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones	Ordre	Poales
Famille	Poaceae	Sous-famille	Festucoideae
Tribu	Triticeae	Sou-Tribu	Triticineae
Genre	<i>Triticum</i> L	Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf.

Selon Mckey (1968), l'origine génétique du blé dur remonte au croisement entre deux espèces ancestrales *Triticum monococcum* et une graminée sauvage du nom *Aegilops speltoides*. Le nombre chromosomique de base est de $2n = 4x = 28$, hérité du genre *Triticum monococcum* est désigné par A et celui dérivé de l'*Aegilops* est dénommé B, de sorte que *Triticum durum* a une garniture chromosomique désignée par AABB (Fig.1).

Le genre *Triticum* comporte, selon MacKey (1968), cinq espèces (Tab. 2). Au sein de ce genre, les espèces tétraploïdes sont les plus nombreuses (11 espèces) (Monneveux, 1989 ; Abdelguerfi & Laouar, 2000).

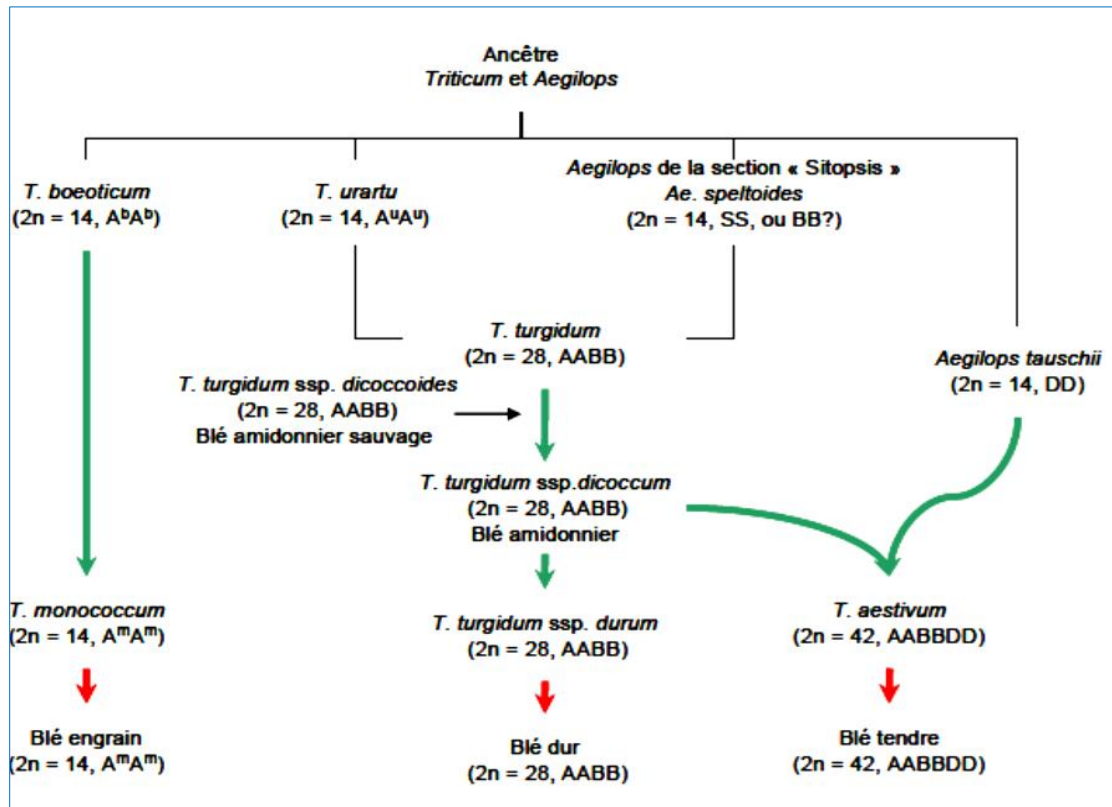


Figure 1 : Représentation schématique de l'histoire évolutive des espèces de *Triticum* et *Aegilops* (Feuillet *et al.*, 2008).

Les blés sauvages tétraploïdes sont largement répandus au Proche Orient, où les humains ont commencé à les récolter dans la nature (Bozzini, 1988). Comparativement aux blés diploïdes, leurs grands épis et leurs gros grains les rendaient beaucoup plus intéressants pour la domestication. On croit que le blé dur provient des territoires actuels de la Türkiye, de la Syrie, de l'Iraq et de l'Iran (Feldman, 2001).

Tableau 2 : Classification des espèces du genre *Triticum* (MacKey, 1968)

ESPECES DIPLOIDES	
Génome AA 2n=14 <i>T. monococcum</i> (L) MK	subsp. <i>boeoticum</i> BOISS. subsp. <i>monococcum</i> L.
ESPECES TETRAPLOIDES	

Génome AABB 2n=28 <i>T. turgidum</i> (L) Thell	subsp. <i>dicoccoides</i> (Korn.) subsp. <i>dicoccum</i> (Schrank) subsp. <i>paleocolchicum</i> (Men.) subsp. <i>carthlicum</i> (Nevski) conv. <i>turgidum</i> L. conv. <i>durum</i> (Desf.) conv. <i>turanicum</i> (Jakubs) conv. <i>polonicum</i> L. conv. <i>aethiopicum</i> (Jakubz.)
Génome AABB 2n=28 <i>T. timopheevi</i> (Zhuk)	subsp. <i>araraticum</i> (Jakubz.) subsp. <i>timopheevi</i> Zhuk.
ESPECES HEXAPLOIDES	
Génome AAAABB 2n=42 <i>T. zhukowskyi</i> (Men. et Er)	
Génome AABBDD 2n=42 <i>T. aestivum</i> (L) Thell	subsp. <i>compactum</i> (Host.) subsp. <i>macha</i> (Dek. et Men) subsp. <i>spelta</i> (L.) Thell. subsp. <i>sphaerococcum</i> (Perc) subsp. <i>vavilovi</i> (Tum.) sears supsp. <i>vulgare</i> (Vill.) Mk.

1.2. Importance et intérêt de blé dur

La culture des céréales a permis l'essor des grandes civilisations, car elle a constitué l'une des premières activités agricoles. En effet, Il y'a plus de trois millions d'années, l'homme préhistorique était nomade, pratiquait la chasse et la cueillette des fruits pour assurer sa nourriture. Le nomadisme a progressivement laissé la place à la sédentarité qui permet la culture des céréales. Le blé est l'une de ces céréales connues depuis l'antiquité. Sa culture remontée au mésolithique vers 7000 avant Jésus-Christ (**Ruel, 2006**).

Le Blé Dur occupe une importante place parmi les céréales dans le monde. Le grain du blé dur sert à la production de pâtes alimentaires, du couscous, et à bien d'autres mets comme le pain. Il est utilisé pour préparer les chappattis dans le sous-continent Indien et tortillas en Amérique Central et du Sud (**Pena & Pfeiffer, 2005**). La paille est utilisée comme litière et comme aliment pour les animaux (**Bahlouli et al., 2005**). Il a une grande valeur nutritionnelle, suite à sa richesse en protéines et la présence du gluten, qui donne aux pâtes alimentaires un meilleur terme à la cuisson, il renferme en plus d'acides aminées, des lipides, des glucides, quelques sels minéraux et des vitamines (**Pena & Pfeiffer, 2005**). Donc c'est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité.

Les dernières prévisions de la FAO concernant la production mondiale de céréales en 2025 ont été relevées de presque 14 millions de tonnes (0,5 pour cent) en juillet par rapport au mois

dernier et s'établissent à présent à 2 925 millions de tonnes. L'estimation de la production mondiale de blé en 2025 a été relevée de 0,7 pour cent en juillet par rapport au mois dernier et s'établit désormais à 805,3 millions de tonnes, soit une hausse de 0,9 pour cent en glissement annuel (Fig. 2).

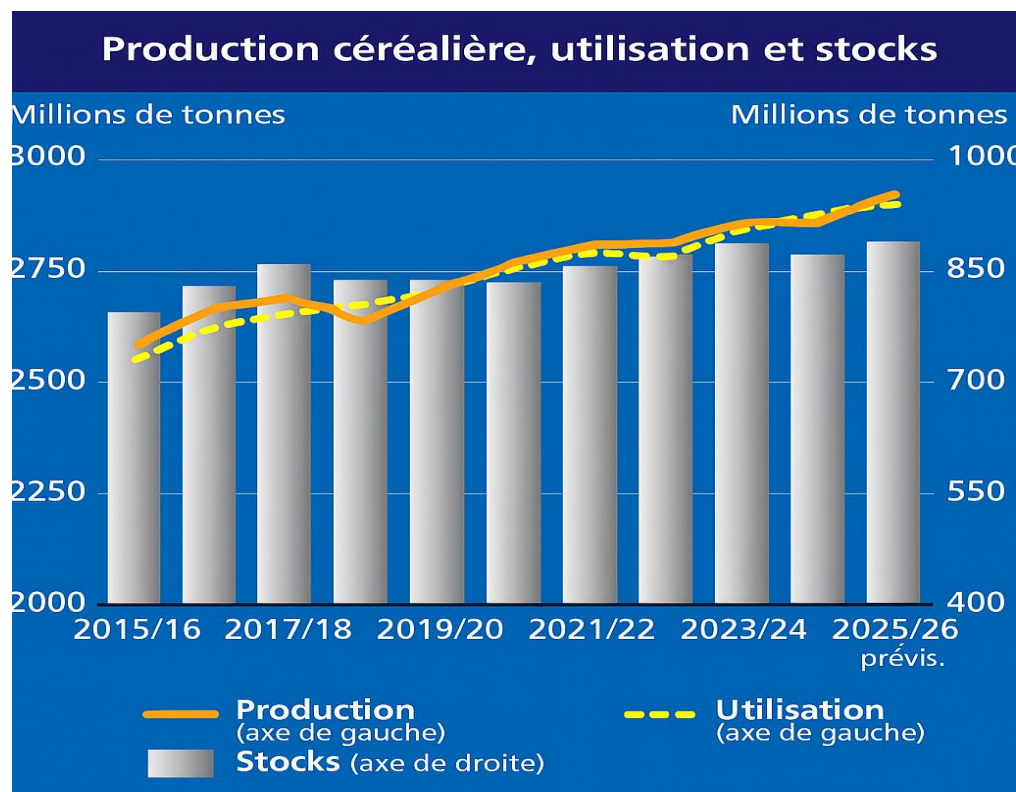


Figure 2 : Bulletin de la FAO sur la production, utilisation et stocks de blé (FAO, 2025).

Les prévisions concernant l'utilisation mondiale de céréales en 2025-2026 s'élèvent à 2 900 millions de tonnes, soit 2,0 millions de tonnes de plus que ce qui était prévu en juin et un niveau en hausse de 0,8 pour cent au regard des chiffres pour 2024-2025. Alors que La consommation mondiale de blé devrait se maintenir à 797,2 millions de tonnes. Par ailleurs, la FAO prévoit une légère augmentation des stocks mondiaux de blé, atteignant 316,2 millions de tonnes, en hausse de 1,7 million de tonnes par rapport aux prévisions de septembre (Fig. 2).

La céréaliculture constitue en Algérie la principale activité, et le blé dur occupe une place centrale dans l'économie Algérienne. Il couvre la moitié de la surface consacrée à cette activité (Mazouz, 2006).

Les pays du Maghreb comptent parmi les plus grands consommateurs de blé au monde, en particulier l'Algérie avec une consommation avoisinant les 216 kg par habitant et par an (Derbal, 2015).

Des importations massives de graines de céréales principalement le blé dur sont annuellement opérées par le gouvernement. En ce sens il a eu à mobiliser annuellement près de 2.5 milliards de dollars pour assurer les importations alimentaires, dont un tiers sert à couvrir les importations céréalières. Il est utile de rappeler que cette enveloppe représente plus de 25% des importations

totales. L'Algérie est devenue le premier importateur dans le monde, puisque ses importations annuelles représentent 50% des disponibilités totales du marché mondial (**Bourras, 2001**).

1.3. Zones clés de culture

1.3.1. Au monde

Les pays du pourtour méditerranéen représentent environ 50 % de la surface mondiale consacrée au blé dur (**Martínez-Moreno et al., 2022**). Les principaux pays producteurs et exportateurs de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sont : le Canada (5 à 7 millions de tonnes par an) et la Turquie (3 à 4 millions de tonnes par an), avec environ 2 millions d'hectares cultivés chacun (**USDA, 2015 ; Nagarajan, 2006**), suivis de l'Algérie, de l'Italie (premier producteur en Europe) et de l'Inde, chacun consacrant plus de 1,5 million d'hectares à cette culture (**Le Lamer et Rousselin, 2011 ; Bonjean et al., 2016 ; Al-Issa et Samarah, 2006**).

La France, la Grèce, le Maroc, le Pakistan, le Portugal, le Kazakhstan, la Russie, l'Espagne et la Tunisie cultivent du blé dur sur des superficies comprises entre 0,5 et 0,8 million d'hectares par an (**Nagarajan, 2006**). L'Azerbaïdjan, l'Irak et l'Iran, quant à eux, en cultivent ensemble plus de 0,7 million d'hectares (**Al-Issa & Samarah, 2006**). L'Australie explore également la culture du blé dur, avec environ 0,1 million d'hectares alloués chaque année à sa production (**EPAR, 2006**).

1.3.2. En Algérie

En Algérie, le blé dur est produit dans les trois régions les plus favorables, parmi les cinq zones qui caractérisent le domaine céréalier (**Fig. 3**). Ces régions sont la zone littorale dont la pluviométrie est supérieure à 600 mm, les plaines intérieures, avec une pluviométrie de 450 à 600 mm et les hauts plateaux, avec 350 à 450 mm. Les zones montagneuses plus de 600 mm, et la steppe, avec moins 300 mm (**ITGC**).

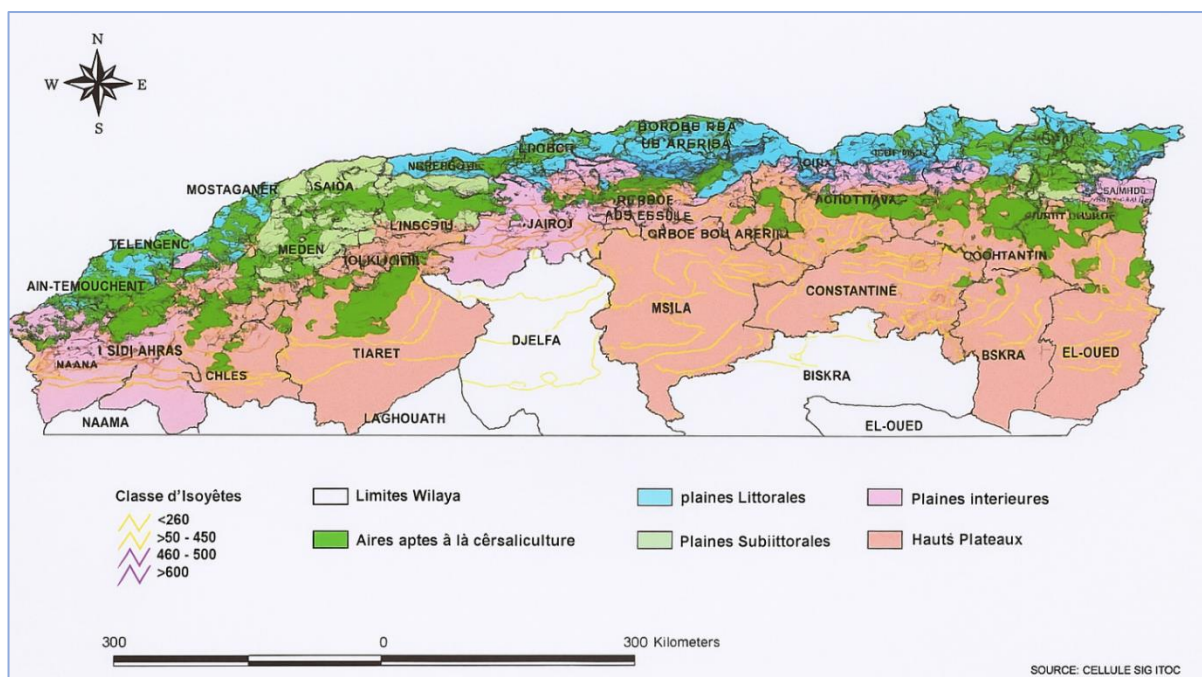


Figure 3 : Les principales zones céréalières en Algérie. (CELLULE SIG ITGC, 2022)

La Ministère de l'agriculture et du développement rural (MADR), a révélé qu'au cours de la saison agricole 2024/2025, la superficie des céréales occupe, en moyenne annuelle, 40% de la Superficie Agricole Utile (SAU). La superficie ensemencée en céréales durant la campagne 2024 est évaluée à 3,069 millions d'hectares, desquelles, 1,6 million hectares (52% de la superficie) seront consacrés au blé dur. Pour la campagne 2024/2025, l'USDA prévoit une production de trois millions de tonnes métriques de blé.

Lors d'une réunion avec des agriculteurs en juillet 2024, le ministre de l'agriculture et du développement rural a présenté des projets visant à étendre la culture des céréales dans le désert du Sahara. Plus d'un million d'hectares de terres agricoles devraient être aménagés d'ici 2028 dans les provinces du sud. Parmi ces terres, 500 000 hectares seront destinés au blé et à l'orge. Ces initiatives visent à renforcer la sécurité alimentaire et à réduire les importations (USDA, 2025).

1.4. Diversité du blé dur

1.4.1. Au monde

À l'échelle mondiale, le blé dur présente une diversité génétique significative qui répond à des pressions environnementales variées et à la demande de caractéristiques agroéconomiques spécifiques. Les variétés de blé dur se sont adaptées à une multitude de conditions climatiques, allant des régions tempérées aux zones semi-arides.

L'**Italie** est considérée comme le leader de la production de blé dur en Europe, avec une production moyenne de 4,26 millions de tonnes au cours de la dernière décennie, sur une superficie cultivée d'environ 1,28 million d'hectares (Xynias *et al.*, 2020)

La Sardaigne et la Sicile possèdent une grande diversité de génotypes traditionnels de blé dur cultivés depuis des siècles. Ces génotypes, telles que Cappelli, Timilia, Russello, Perciasacchi et Maiorca, sont appréciés pour leur qualité, leur productivité et leur tolérance au stress (Anastasi *et al.*, 2019).

Selon la Commission canadienne des grains (CCG), les variétés de blé dur les plus performantes au **Canada** comprennent Transcend, AAC Stronghold, CDC Precision, AAC Grainland et CWAD. Ces cultivars sont reconnus pour leur haute qualité, notamment leur teneur élevée en protéines et leur rendement élevé en semoule.

Reconnue pour sa qualité, la variété Canada Western Amber Durum (CWAD) est très prisée à l'échelle mondiale. Au cours des cinq dernières années, plus de 23 millions de tonnes de blé dur canadien ont été exportées vers 49 pays, parmi lesquels figurent le Maroc, l'Algérie, l'Italie, les États-Unis, le Pérou et le Japon (CCG).

Les principales variétés de blé dur en Turquie comprennent un mélange d'anciennes races locales et de variétés modernes issues de programmes de sélection. Plusieurs cultivars de blé dur sont reconnus pour leur adaptation, leurs performances et leur potentiel à l'exportation, avec un accent particulier sur les caractéristiques de qualité. Artuklu, Firat-93, Mutant 47, Harran 95 et Sariçanak-98 sont fréquemment cités comme des variétés performantes, offrant une qualité élevée et des rendements en grain rentables (Enver, 2019).

Parmi les variétés de blé dur les plus reconnues en Russie figurent Bezenchukskaya 205, Bezenchukskaya stepnaya, Marina et Zhemchuzhina Sibiri. Les variétés Bezenchuk ont été sélectionnées dans la région de Samara, tandis que Zhemchuzhina Sibiri provient de Omsk (Tajibayev *et al.*, 2021). D'autres variétés notables incluent Kharkovskaya 46 (et ses dérivés), ainsi que celles développées dans la région de l'Altaï, telles que Altaïka, Hordeiforme 53 et Altaïskaya niva. (Rozova et Pocornyak, 2014)

Plusieurs variétés de blé dur sont cultivées au Mexique, parmi lesquelles Baroyeca Oro C2013 et CENEB Oro C2017 figurent parmi les plus représentatives. Ces variétés, ainsi que d'autres comme Don Lupe Oro C2020, sont développées pour s'adapter à des régions et conditions spécifiques du Mexique, en particulier dans le nord-ouest du pays (Chávez Villalba *et al.*, 2015).

L'Algérie représente le principal marché d'exportation du blé dur mexicain, suivie par le Guatemala, le Venezuela et la France.

1.4.2. En Algérie

Le Blé dur aurait été introduit en Afrique du Nord depuis le Moyen Orient dès l'Antiquité. À partir de là, des variétés locales se sont adaptées aux conditions écologiques variées de l'Algérie : zones côtières, hautes plaines semi-arides, zones steppiques, et régions sahariennes (Miège, 1950) (Fig. 4).

L'Algérie, avec une position géographique favorable, joue un rôle essentiel dans la conservation et la culture du blé dur. Le climat méditerranéen et les variétés locales offrent une base propice au développement génétique du blé dur.

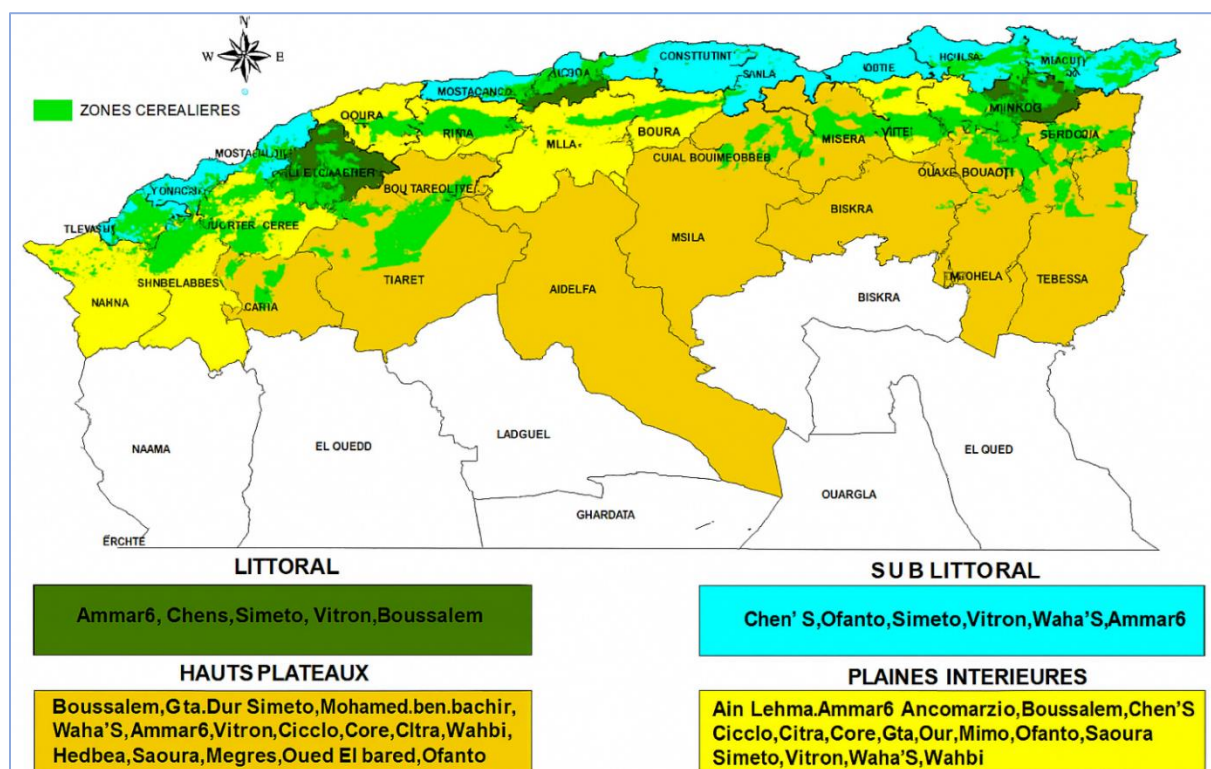


Figure 4 : Les principales zones céréalières en Algérie et la répartition des variétés des blés (blé tendre et blé dur) homologuées et en production par zone agro écologique. (CELLULE SIG ITGC, 2022)

La diversité du blé dur algérien est particulièrement importante. Orlov a signalé la présence de 22 variétés botaniques sur les 34 connues (**Orlov, 1923**). Au sein de ces variétés botaniques, on peut également distinguer plusieurs génotypes en fonction de caractères morphologiques et physiologiques. Cela explique pourquoi l'Algérie doit être considérée comme un centre secondaire de diversité du blé dur (**Boeuf, 1932**).

Ducellier en (1930), a décrit l'ensemble des espèces de blé cultivées en Algérie : les blés durs (avec et sans barbes). Avant l'indépendance, il en comptait vingt-neuf variétés d'origine arabes (Hedba, Mohamed ben Bachir, Bidi). Plus de 30 années après les travaux de **Ducellier (1930)**, **Laumont & Erroux (1961)** ont mentionné les mêmes variétés cultivées de blé dur à une ou deux exceptions.

Un grand nombre de variétés a été totalement perdu. Certaines sont disponibles dans des banques de gènes (en France, USA, ex. URSS, ICARDA, CIMMYT). Dans certaines régions montagneuses et dans les régions sahariennes, il devrait exister un matériel ancestral ou très ancien. Seules les prospections, les collectes et les caractérisations nous donneront une idée sur le matériel qui subsiste jusqu'à nos jours.

En 1995, l'ITGC (Institut Technique des Grandes Cultures) a dressé un catalogue des principales variétés de céréales (blés, orge, avoine, triticales) cultivées en Algérie (**Tab. 3**). Il est important de mentionner que plusieurs variétés ont éventuellement changé simplement de nom après avoir subi plusieurs essais de comportement, et parfois les noms ont été algérianisés. D'autres variétés, par contre, ont été obtenues après un travail laborieux de sélection. Cependant, plusieurs de ces variétés mises au point ne sont souvent pas adoptées par les agriculteurs car elles ne répondent pas à leurs préoccupations immédiates et ce en particulier à cause de l'environnement socio-économique (**Abdelguerfi et Laouar, 2000**).

Tableau 3 : Liste des blés durs mentionnés par l'ITGC (Abdelguerfi & Laouar, 2000)

Variété ou population	Observation
Blés durs	
1. Aribis (ex. Capeiti)	Origine Italie 1976, sélection ITGC
2. Bibans (ex. Montpellier 37.856)	Origine France (Montpellier, 1965)
3. Bidi 17	Ancienne sélection (Guelma)
4. Chougrane (ex. Polinicum)	Origine INRA Fr., sélection ITGC 1973
5. Guemgoum R'Khem	Origine Tiaret
6. Hedba 3	Locale (sélection 1921)
7. Hoggar (ex. Vitron)	Introduite d'Espagne, sélection ITGC (Tiaret)
8. Mohamed Ben Bachir	Locale (sélection 1931)
9. Oued Zenati 368	Ancienne sélection (à Guelma en 1936)
10. Rahouia 80 (Gloire de Montgolfier)	Ancienne variété locale (origine Tiaret 1980)
11. Righa (ex Cocorit 71)	Origine CYMMIT, sélection ITGC (Sétif)
12. Sahel 77	Origine CIMMYT, sélection ITGC 1977
13. Sebaou (ex. INRAT 69)	Origine INRA Tunisie, sélection ITGC
14. Tassili (ex. Mexicali 75)	Origine CIMMYT, sélection ITGC
15. Waha 'S'	Sélection ICARDA
16. Zibans (ex. ZB x FG)	Sélection ITGC (Sétif 1983)

Aujourd'hui, l'ITGC en Algérie travaille sur la diversification des variétés de blé dur pour améliorer la production agricole. Cela inclut l'étude de différentes variétés adaptées aux conditions locales, ainsi que des stratégies pour optimiser les rendements et la qualité du blé dur (Tab. 4).

Tableau 4 : Principales caractéristiques agronomiques et technologiques des variétés de blé dur locales et introduites, sélectionnées par l'ITGC pour la production céréalière (ITGC, 2022)

Variété	Principales caractéristiques agronomiques et technologiques
Vitron (Hoggar)	Tolérante au froid, à la verse et à l'helminthosporiose. Très bonne valeur semoulière, indice de jaune faible, teneur en protéines suffisante. Qualité pâtière moyenne (les pâtes ne supportent pas la surcuisson).
Waha "s"	Tolérante au froid, à la rouille et à la septoriose. Sensible à la sécheresse, aux gelées et au piétin-verse. Bonne valeur semoulière, indice de jaune variable, teneur en protéines suffisante. Qualité pâtière médiocre (pâtes très collantes, mauvais goût mais bon aspect).
Chen "s"	Tolérante à la sécheresse, à la verse et à la rouille. Bonne productivité. Bonne valeur semoulière, indice de jaune variable, indice de brun un peu élevé. Teneur élevée en protéines, cuisson acceptable mais supporte mal la surcuisson.
Mohamed Ben Bachir	Tolérante à la sécheresse et au mitadinage, sensible à la verse, à la septoriose, à la fusariose et au cèphe des chaumes. Très bonne valeur semoulière, indice de jaune faible, indice de brun un peu élevé. Teneur en protéines élevée. Bonne qualité des protéines, bonne qualité pâtière et couscoussière.
Hedba 3	Tolérante au froid et à la sécheresse, sensible aux rouilles, septoriose et oïdium. Bonne valeur semoulière, indice de jaune faible, teneur en protéines élevée. Qualité pâtière médiocre.
Gta dur	Tolérante à la verse, à la rouille brune et à l'oïdium. Productivité moyenne à bonne.
Oued Zenati	Tolérante à la sécheresse. Valeur semoulière satisfaisante, teneur élevée en protéines.
Simeto (Sersou)	Sensible à la sécheresse, tolérante à la verse. Bonne valeur semoulière, faible indice de jaune, indice de brun peu élevé. Teneur en protéines satisfaisante de très bonne qualité.
Bidi 17	Tolérante à la sécheresse et à la verse. Bonne valeur semoulière, teneur élevée en protéines.
Boussalem	Résistante au froid, à la verse et à la sécheresse. Résistante aux maladies (rouilles jaune, brune, noire), au piétin échaudage, à l'oïdium et à la fusariose. Bonne productivité. Bonne qualité semoulière (blé correcteur), résistante au mitadinage.

2. Caractéristiques morphologiques, physiologiques et agronomiques

2.1. Morphologie du blé

2.1.1. Appareil racinaire

L'Appareil racinaire est composé de deux systèmes successifs :

* Le système de racines primaires ou séminales, fonctionnel de la levée au début du tallage. Ce système est constitué d'une racine principale et de deux paires de racines latérales, soit cinq racines ; éventuellement une sixième racine peut éventuellement se développer.

* Le système de racines secondaires ou de tallage (ou coronales), apparaissant au moment où la plante émet ses talles. Ce système se substitue progressivement au précédent. Il est de type fasciculé (**Moule, 1971**)

2.1.2. Appareil Végétatif (système aérien)

Le système aérien est formé d'un certain nombre d'unités biologiques, les talles. Chaque talle est formée d'une tige feuillée ou chaume portant à son extrémité une inflorescence. La talle est à la graminée ce que le rameau feuillé est à l'arbre. Mais, chez la graminée, les ramifications partent toutes d'une même zone, court-nouée et située à la base de la tige, le plateau de tallage. La première talle apparue est appelée "brin-maître".

La tige est formée d'entre-nœuds, séparés par des nœuds, zones méristématiques à partir desquelles s'allongent les entre-nœuds et se différencient les feuilles. Chaque nœud est le point d'attache d'une feuille (**Fig. 5**).

Les feuilles sont alternes ou distiques (disposées sur deux rangs le long de la tige). Chaque feuille comprend deux parties : une portion inférieure enveloppant l'entre-nœud correspondant (la gaine) ; et une portion supérieure (le limbe) (**Fig. 5**).

Les gaines, attachées au niveau des nœuds, sont emboîtées les unes dans les autres et forment un tube cylindrique entourant la tige qui se déboîte au fur et à mesure de la croissance des entre-nœuds. A la jonction du limbe et de la gaine, on peut trouver une petite membrane non vasculaire, plus ou moins longue et dentelée, la ligule. De chaque côté de celle-ci, à la base du limbe se trouvent deux stipules plus ou moins embrassantes, velues, les oreillettes (**Moule, 1971**).

2.1.3. Appareil Reproducteur

L'inflorescence est un épi chez le blé. L'unité morphologique de base de l'épi est l'épillet (**Fig. 5**). Celui-ci est une petite grappe de 1 à 5 fleurs enveloppées de leurs 2 glumelles (inférieure et supérieure). Elles sont incluses dans deux bractées ou glumes (inférieure et supérieure). Le nombre de fleurs fertiles par épillet chez le blé est de 2 à 4.

Le grain est de section arrondie ou ovale, de poids moyen environ 45 mg ; il est dépourvu d'enveloppe (**Moule, 1971**).

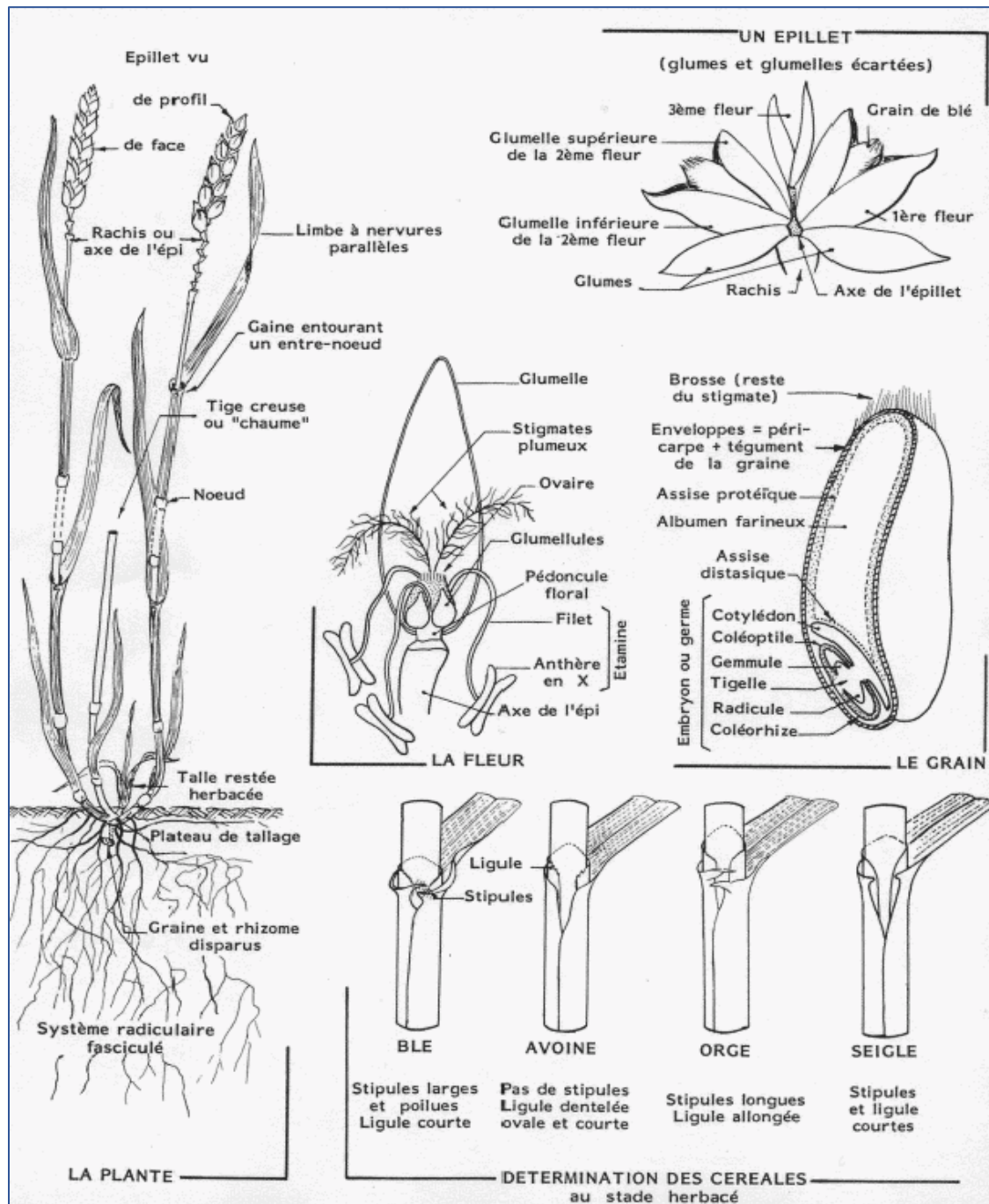


Figure 5 : Morphologie des graminées (exemple du blé) (Soltner, 1998)

2.2. Structure du grain de blé dur

Les graines de blé sont des fruits appelées caryopses. Elles ont une forme ovoïde, possèdent sur l'une de leur faces une cavité longitudinale (le sillon) et à l'extrémité opposée de l'embryon des touffes de poils (la brosse). Le grain de blé se compose de trois parties principales : Les enveloppes, le germe et l'albumen (Fig. 6) (Surget et Barron, 2005).

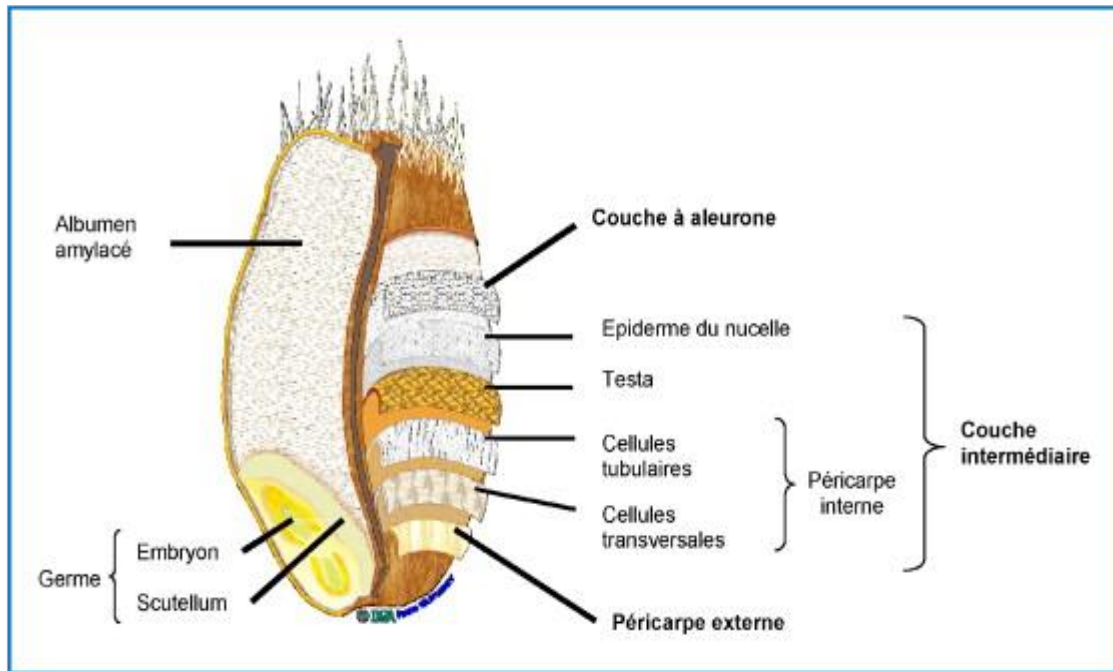


Figure 6 : Structure histologique du grain de blé dur (Surget et Barron, 2005)

2.2.1. Les enveloppes

Les enveloppes sont de nature cellulosique qui protège le grain et représentent 14-16% de la masse du grain. Elles renferment une teneur importante en protéines, en matières minérales et en vitamine du complexe B ; elles contiennent en outre les pigments qui donnent la couleur des grains. Les enveloppes ont une épaisseur variable et sont formées de trois groupes de téguments soudés : -le péricarpe ou tégument du fruit constitué de trois assises cellulaires :

-épicarpe, protégé par la cuticule et les poils.

-mésocarpe, formé de cellules transversales

-endocarpe, constitué par des cellules tubulaires. Il est riche en celluloses, hémicelluloses et pentosanes ainsi qu'en éléments minéraux (Godon & William, 1991).

2.2.2. Le germe (embryon)

Il constitue un organe de réserve, riche en protéines et en lipides pour la jeune plantule et forme environ 2,5% à 3% du grain de blé. Le germe comprend deux parties : la plantule (future plante) et le cotylédon (réserve de nourriture très facilement assimilable, destinée à la plantule) qui contient l'essentiel des matières grasses du grain. Enfin, le germe est riche en vitamine B1, B6 (Surget & Barron, 2005).

2.2.3. L'albumen ou amande (L'endosperme)

Constitue presque tout l'intérieur du grain et se compose principalement de minuscules grains d'amidon. On y trouve l'essentiel des réserves énergétiques qui nourrissent la plantule au moment de la germination. Il forme environ 80% du poids d'un grain et est constitué de granules d'amidon enchâssés dans le réseau protéique (gluten) (Surget & Barron, 2005).

Le grain de blé est principalement constitué d'amidon (environ 70%), de protéines (10 à 15% selon les variétés et les conditions de culture) et de pentosanes (8 à 10%). Les autres

constituants, pondéralement sont mineurs (quelques % seulement), sont les lipides, la cellulose, les sucres libres, les minéraux et les vitamines.

Ces constituants se répartissent de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques du grain. L'amidon se retrouve en totalité dans l'albumen amylacé, les teneurs en protéines du germe et de la couche à aleurone sont particulièrement élevées ; les matières minérales abondent dans la couche à aleurone. Les pentosanes sont les constituants dominants de cette dernière et du péricarpe. La cellulose représente près de la moitié de celui-ci, les lipides voisinent ou dépassent les 10% dans le germe et dans la couche à aleurone (**Feillet, 2000**).

2.2.4. Composition biochimique

La composition chimique du grain de blé se répartit de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques. L'amidon se retrouve en totalité dans l'albumen amylacé, les teneurs en protéines du germe et de la couche à aleurone sont particulièrement élevées (**Betschart, 1982**), les matières minérales abondent dans la couche à aleurone, les pentosanes sont les constituants dominants de cette dernière et du péricarpe, la cellulose représente près de la moitié de celui-ci, les lipides avoisinent ou dépassent les 10 % dans le germe et dans la couche à aleurone (**Tab. 5**) (**Feillet, 2000**).

Tableau 5 : Distribution biochimique des différentes parties d'un grain de blé (**Feillet, 2000**)

Constituant (% de la masse du grain)	Protéines	Matière minérale	Lipides	Matière cellulosique	Pentosanes	Amidon
Péricarpe (4 %)	7 - 8	3 - 5	1	25 - 30	35 - 43	0
Téguments (1%)	15 - 20	10 - 15	3 - 5	30 - 35	25 - 30	0
Reste du nucelle	30 - 35	6 - 15	7 - 8	6	30 - 35	10
Couche à aleurone	30 - 35	6 - 15	7 - 8	6	30 - 35	10
Germe	35 - 40	5 - 6	15	1	20	20
Albumen (81 – 83 %)		8 - 13	0,35 - 0,06	1	0,5 - 3	70 - 85

2.3. Cycle phénologie du blé dur

Le cycle de croissance de blé se compose de plusieurs phases végétatives au cours desquelles la plante passe d'un stage végétatif à un autre ou développe de nouveaux organes.

La phase germination – levée (**Fig. 7**) correspond à la mise en place du nombre de plantes installées par unité de surface du sol semée. Le stade végétatif de la levée est noté lorsque 50 % des plantes émergent de terre (**Henry et al., 2000**).

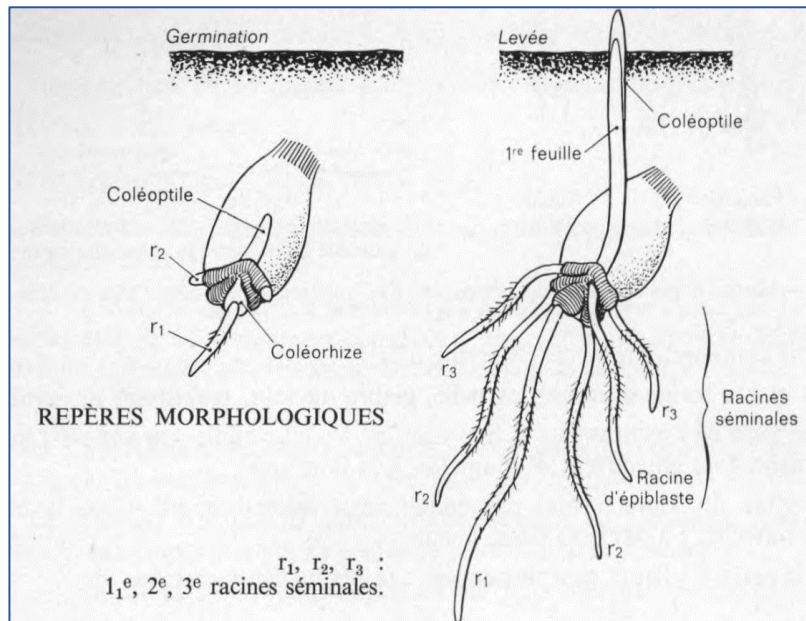


Figure 7 : La phase semis-levée de la période végétative du blé (Moule, 1971)

Le début de la phase tallage (**Fig. 8**) se fait à partir de l'apparition de la quatrième feuille. Il est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale primaire, puis d'autres talles naissent successivement à l'aisselle des deuxième et troisième feuilles de la tige principale ou le maître brin.

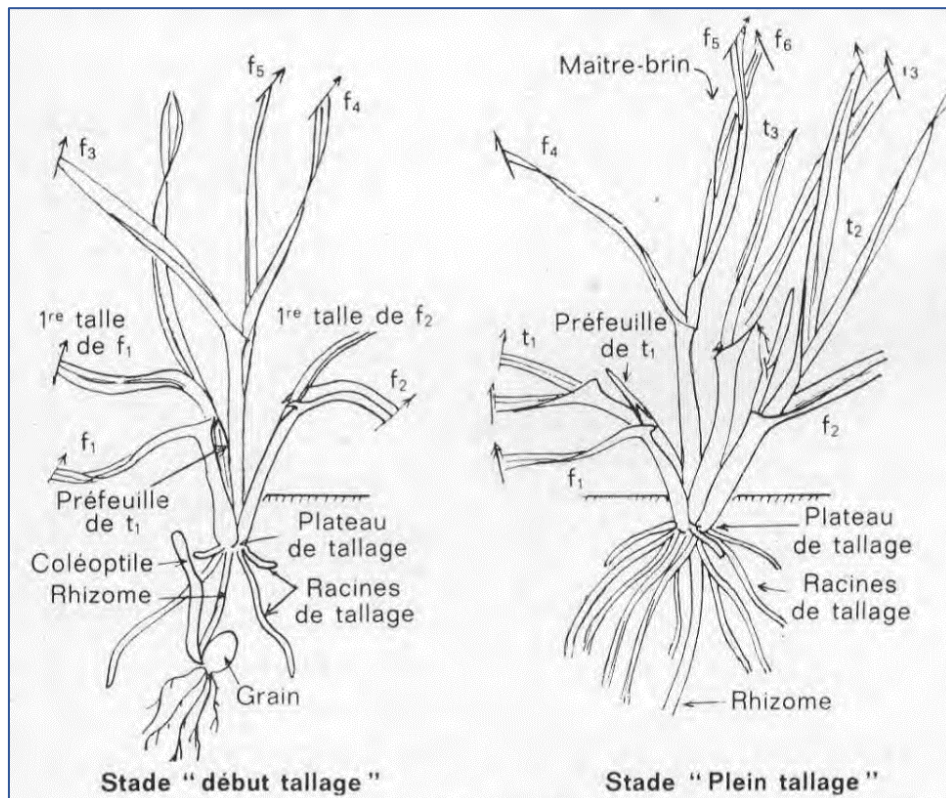


Figure 8 : La phase levée – tallage du blé dur (Moule, 1971)

La phase du tallage herbacée est suivie par le stade montaison (**Fig. 9**) qui débute dès que l'épi du maitre brin atteint une longueur de 1 cm, mesurée à partir de la base de la couronne ou plateau de tallage. C'est le stade épi-1cm qui fait suite à l'élongation du premier entre nœuds. La montaison est une des phases les plus critiques du développement du blé. Les stress hydrique ou thermique au cours de cette phase affectent le nombre d'épis montants par unité de surface (**Fisher et al., 1998**).

La phase de montaison se termine une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle, ce qui correspond au stage gonflement (**Fig. 9**).

Le stade épiaison débute par l'apparition de l'épi, hors de la gaine de la feuille drapeau (**Fig. 9**). Les épis dégainés fleurissent généralement entre 4 à 8 jours après l'épiaison (**Bahlouli et al., 2005**). Selon **Abbassenne et al., (1998)**, les basses températures au cours de cette phase réduisent fortement la fertilité des épis. Après la floraison, débute la phase de remplissage du grain au cours de laquelle le feuillage débute sa sénescence. L'azote et les sucres des feuilles, qui sénescent, sont remobilisés vers le grain (**Barbottin et al., 2005**).

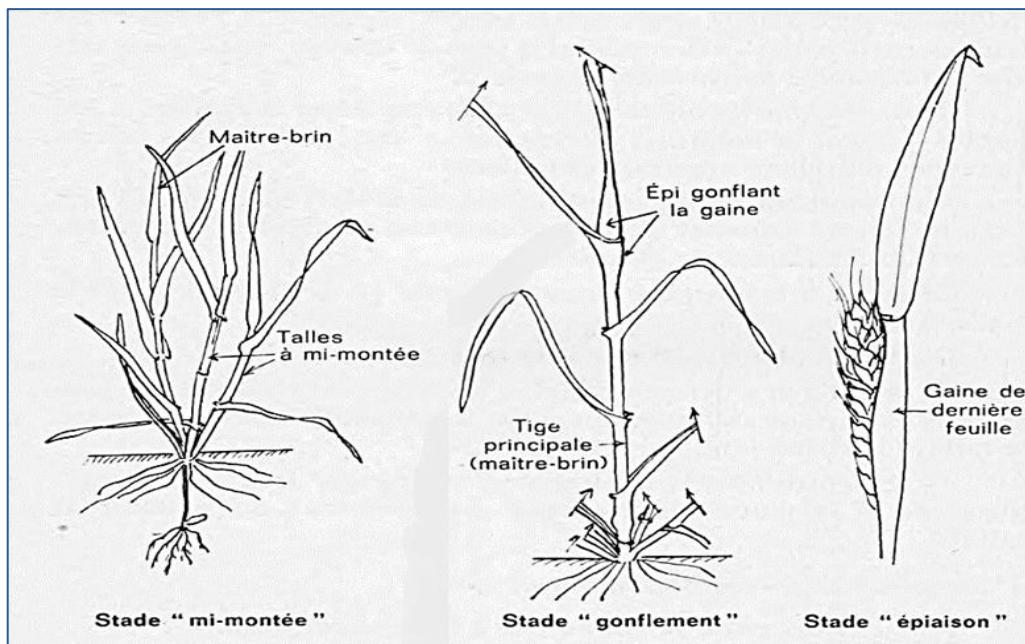


Figure 9 : Stade montaison – épiaison (Moule, 1971)

L'évolution du poids du grain se fait en trois étapes : la première est une phase de multiplication des cellules du jeune grain encore vert, dont la teneur en eau est élevée. Cette phase est suivie par la phase de remplissage actif du grain avec les assimilats provenant de la photosynthèse de la feuille étendard et du transfert des hydrates de carbone stockés dans le col de l'épi (**Belkherchouch et al., 2009**). Les fortes températures au cours de cette période provoquent l'arrêt de la migration des réserves des feuilles et de la tige vers le grain (**Bahlouli et al., 2005**). Cette phase se termine une fois le contenu du grain atteint son maximum, le grain se dessèche progressivement, pour murir (**Fig. 10**).

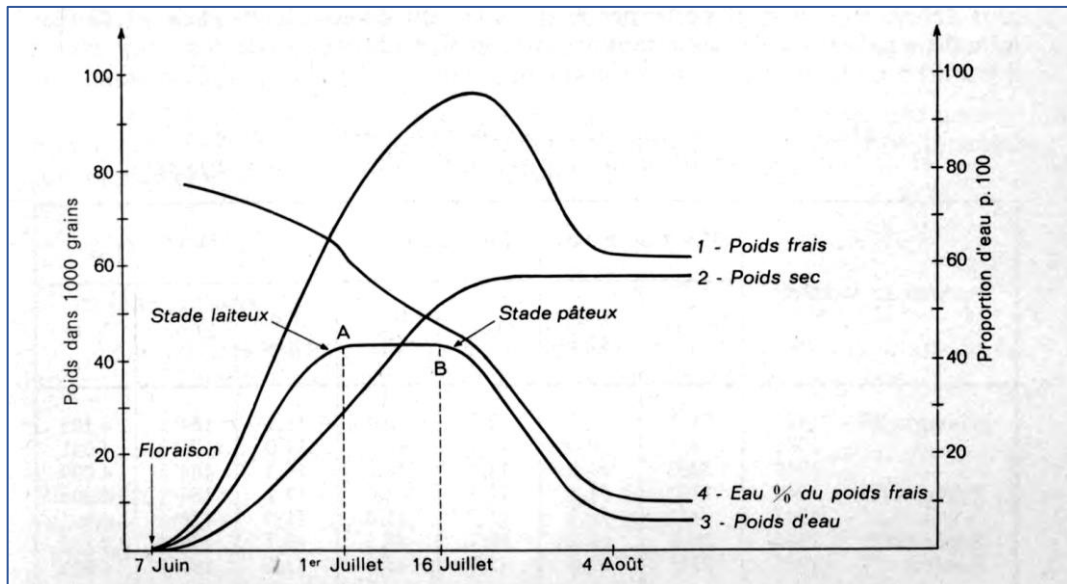


Figure 10 : Courbes caractéristiques du développement du grain de blé (Geslin, 1944 et Jonard, 1964).

3. Exigences de blé dur

Un bon comportement de la culture durant tout son cycle de développement exige la réunion de certains facteurs qui conduisent à l'observation d'un meilleur rendement.

3.1. Exigence climatique

Le développement de la plante se réalise sur des étapes distinctes durant lesquelles se forment les composantes constitutives du rendement (Acevedo, 1989). Dans un environnement donné, ce rendement est modulé de manière directe ou indirecte par des facteurs morphologiques, physiologiques et environnementaux (Prasad *et al.*, 2007).

Les conditions abiotiques défavorables, telles que le froid, la sécheresse et les températures élevées, freinent la croissance et le développement de ces composantes, en particulier durant les stades végétatifs (Evans & Wardlaw, 1976).

3.1.1. Température

La température est la caractéristique environnementale qui contrôle le développement de la plante, elle conditionne à tout moment la physiologie du blé (Tab. 6). Une température supérieure à 0°C est exigée pour la germination, le gel printanier affecte la formation de l'épi (Bouzerzour, 1998 ; Tahir *et al.*, 1998).

Selon Hazmoune (2006), la température joue un rôle crucial dans la croissance et le développement de l'apex de la plante. Elle influence notamment le rapport entre la matière sèche aérienne et la matière sèche racinaire. Elle participe également à la régulation de l'ouverture des stomates, un phénomène optimal entre 20 et 30 °C.

Sous conditions optimales une somme de température de 150°C est nécessaire pour accomplir la phase semis - levée, 500°C pour la phase levée- fin tallage et 850°C pour la phase épiaison – maturité physiologique (Soltner, 1985).

Tableau 6 : Effet de la température sur les phases de développement de blé dur

Phase du développement	Température optimale (°C)	Effet des hautes températures
Germination	12–20	Germination accélérée, mais stress si >35°C
Tallage	15–20	Tallage réduit si >30°C
Montaison	18–24	Allongement de la tige réduit
Floraison	20–24	Stérilité si >30°C
Remplissage des grains	20–25	Raccourcissement de la durée → grains plus petits
Maturation	20–30	Accélération de la sénescence

3.1.2. L'eau

L'eau est un facteur de l'environnement qui influence la quasi-totalité des réactions physiologiques des végétaux (**Tab. 7**). La littérature sur les recherches traitant les relations entre l'eau et la physiologie des plantes est riche. Les grandeurs liées au contenu en eau des tissus indiquent que l'eau est le principal constituant des végétaux, avec 60% à 80% de leur poids de matière fraîche (**Duthil, 1973 ; Catell, 2006**).

L'eau constitue le véhicule des éléments nutritifs et assure les réactions métaboliques. Cet élément est indispensable à la croissance et au développement de la plante. En effet, l'eau et l'état d'hydratation des tissus des végétaux interviennent pour la production de matière sèche.

Tableau 7 : Effet du stress hydrique sur le développement des céréales (**Austin, 1989**).

Stade de Développement	Effet du stress hydrique	Conséquence sur le rendement
Grain	Germination réduite et retardée.	Altération des composantes du rendement s'il y a moins de 100 plants/m ² .
Plantule	Taux plus élevé de mortalité de talles L'assimilation de l'azote est réduite.	Réduction des épis par mètre carré, et du rendement. Accélération de la sénescence.
Tallage, début épiaison	Mort des ébauches florales.	Réduction du nombre de grain et du rendement.
Allongement des tiges	Réduction de la longueur des tiges.	Une grande accumulation des sucres solubles dans les tiges limitant la perte de la capacité photosynthétique durant le remplissage du grain.
Anthèse	Accélération de la sénescence.	Réduction de la grosseur du grain.

En milieu méditerranéen semi-aride, les besoins en eau du blé s'accroissent en arrière-saison, période critique de rareté de l'eau (**Kelkouli, 2000**). En effet, l'arrière-saison coïncide avec les exigences les plus importantes, à un moment où l'eau est rare (**Chennafi et al., 2008**). De nombreuses recherches mettent en évidence l'impact négatif du déficit hydrique entre le stade d'épiaison et celui du grain laiteux à pâteux. Une carence en eau durant cette phase reproductive entraîne une réduction significative du rendement.

Toutefois, les techniques culturales appropriées relatives à la préparation de lit de semence, pour créer une structure favorable à la germination et la levée de la plantule, et améliorer la disponibilité de l'humidité du sol, permettent une bonne implantation de la culture et réduisent des effets des stress au cours du cycle végétatif (**Corbineau, 1995**)

De ce fait, la gestion des pratiques culturales est recommandée en milieu où l'évaporation est intense. Dans ce contexte, **Molden & Oweis (2007)** révèlent sous climat aride, au moins 90% des précipitations sont perdues par évaporation directe du sol, laissant seulement 10% disponible pour la transpiration.

3.1.3. Eclairement

D'après **Clement & Prats (1970)**, le blé est une plante de pleine lumière, nécessitant une forte intensité lumineuse pour un développement optimal. Le tallage herbacé s'interrompt lorsque la plante atteint un seuil photopériodique spécifique, qui varie selon les variétés. Un bon espacement entre les lignes de semis favorise une exposition lumineuse optimale, condition essentielle à un tallage efficace.

Simon et al., (1989), voient que le stade B précédant la montaison dépendrait principalement de la durée du jour, il faut en effet que la durée de l'éclairement soit d'environ 12 heures pour que l'épi commence à monter dans la tige.

3.2. Exigence édaphique

Le sol est le support de la végétation, son garde-manger et son réservoir en eau (**Girard et al., 2005**). Le sol influence la croissance des plantes à travers ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Sa composition en éléments minéraux, sa teneur en matière organique ainsi que sa structure jouent un rôle essentiel dans la nutrition végétale, conditionnant ainsi le potentiel de rendement en grain.

Selon **Soltner (1990)**, Les caractéristiques physiques favorables pour la culture de blé dur sont :

- ° Une texture fine, limono argileuse qui assurera aux racines fasciculées du blé une grande surface de contact, d'où une bonne nutrition.
- ° Une structure stable, résistant à la dégradation par les pluies d'hiver, évite au blé l'asphyxie et permet une bonne nitrification au printemps.
- ° Une bonne profondeur et une richesse suffisante en colloïdes, afin d'assurer la bonne nutrition nécessaire aux gros rendements (**Baldy, 1993**).

Les réserves en eau du sol sont définies par la réserve utile, calculée sur la profondeur maximale d'enracinement (**Oliosio et al., 2006**). La profondeur du profil du sol joue le rôle de réservoir d'eau. En absence d'obstacles, le blé colonise intensément et profondément les sols (**Nicoullaud, 1995**).

Cependant, le blé s'accommode bien à la terre argilo-calcaire, argilo-limoneuse ou argilo-sableuse, qui assure aux racines fasciculées du blé une grande surface de contact (**Soltner, 2000**). Par contre les sols, légers et acides, ne sont pas recommandés pour le blé dur (**Novak et al., 2006**). Le blé craint les sols tourbeux contenant de fortes teneurs en sodium, magnésium ou fer.

Le pH optimal se situe dans la gamme de 06 à 08. La culture de blé est modérément tolérante à l'alcalinité du sol dont la conductivité électrique (C.E.) ne doit pas dépasser 04 mmhos/cm (**Clement, 1971**).

Une préparation adéquate du lit de semences, qui crée une structure favorable à la germination et à la levée des plantules, ainsi qu'une meilleure disponibilité de l'humidité du sol, est essentielle pour une bonne implantation de la culture et pour minimiser les effets des stress tout au long du cycle végétatif.

3.3. Fertilisation

Une bonne gestion de la fertilisation minérale est une étape importante de la conduite culturale pour améliorer le rendement et de maximiser les gains à l'hectare. Pour atteindre le meilleur rendement, il faut satisfaire les besoins des cultures en éléments fertilisants par des apports d'engrais en quantités suffisantes et au moment opportun (**El Gharous et al., 1993**).

L'azote est un élément indispensable à la culture et la croissance du blé. En effet, c'est le pivot de la production de biomasse, du rendement et de la qualité des produits récoltés. C'est l'élément essentiel de la synthèse protéique par la formation de la radicale amine (NH₂) indispensable aux liaisons peptidiques (**Mazliak, 1998**). Le blé dur a besoin de la plus grande part de ses besoins en azote pendant la phase tallage-remplissage du grain. La quantité nécessaire peut provenir des réserves d'azote du sol ou d'un engrais de fond.

La qualité du blé dur à la récolte dépend étroitement de sa teneur en protéines. L'objectif est d'atteindre 13.5 % de protéines pour limiter le mitadinage et produire des pâtes d'une ténacité suffisante. La conduite de la fertilisation azotée est primordiale pour atteindre cet objectif. Il influence directement la croissance, le développement et les performances productives de la plante, en plus d'intervenir dans la formation des substances de réserve liées à la qualité des grains et des semences produites (**Sangoi et al., 2007**).

L'importance de l'azote (N) dans la culture du blé fait consensus, dans la mesure où une carence en azote entraîne des plantes plus petites, avec un nombre réduit de talles fertiles et une efficacité d'utilisation de l'azote plus faible, ce qui se traduit par une diminution du rendement en grains (**Ferreira et al., 2021 ; Souza et al., 2021**), ainsi qu'une réduction fréquente de la teneur en protéines des grains (**Souza et al., 2019**).

Dans ce contexte, des plantes bien nourries, en particulier en azote, produisent des grains de meilleure qualité nutritionnelle et morphologique — c'est-à-dire des grains bien développés, avec une teneur en protéines adéquate — conformes aux exigences du marché de consommation et de l'industrie boulangère (**Pataco et al., 2015 ; Lollato et al., 2021**).

Le blé dur est une culture peu exigeante en potasse mais il est, en revanche, moyennement exigeant en phosphore (**ARVALIS, 2021**).

Le phosphore est un élément fondamental parmi les trois éléments majeurs (N, P, K) apportés par les engrais et le plus anciennement connu (**Duthil, 1973**).

Le phosphore joue un rôle essentiel dans plusieurs processus physiologiques de la plante. Il contribue à la maturation des grains en réduisant la durée du cycle et en renforçant la solidité de la paille. Il est également indispensable à la formation des graines, celles-ci accumulant d'importantes réserves de phosphore. Par ailleurs, le phosphore stimule la croissance racinaire : un apport localisé de phosphore (associé au nitrate) induit une prolifération des racines dans la zone enrichie, contrairement au potassium ou à l'ammonium, dont les apports localisés suscitent une réponse racinaire beaucoup plus limitée (**Moughli, 2000**).

Le potassium est principalement retenu dans le sol par l'humus et les particules d'argile. Dans certains types de sols, il peut toutefois être fortement lessivé. Cet élément joue un rôle clé dans l'absorption des cations, la formation des hydrates de protéines, le maintien de la turgescence cellulaire, ainsi que dans la régulation de la gestion hydrique de la plante. Le potassium contribue également à renforcer la résistance des végétaux au gel, à la sécheresse et aux maladies. Il est enfin indispensable au transfert des assimilats vers les organes de réserve tels que les grains, les bulbes ou les tubercules.

L'interaction, souvent positive, entre les éléments fertilisants majeurs est bien connue. Ainsi, l'action de potassium est améliorée par l'azote. Une culture bien alimentée en azote, répond mieux aux apports de potassium.

Les besoins des céréales sont relativement faibles en magnésium (0.19 kg/q en blé dur) mais il demeure important pour le fonctionnement de la plante car c'est un élément constitutif de la chlorophylle. Certains types de sols sont plus disposés à un risque de carence : sable, craie ou limon superficiel à faible teneur en argile (**ARVALIS, 2021**).

Les besoins en éléments minéraux, principalement l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), varient selon les conditions de production et les objectifs de rendement visés. Le tableau ci-dessous présente les doses recommandées par l'**ITGC (2011)** en unités par hectare pour chacun de ces éléments (**Tab. 8**).

Tableau 8 : Les besoins en éléments fertilisants (NPK) de blé dans les zones potentielles de production (**ITGC, 2011**)

Zone de production	Objectif de rendement (q/ha)	Azote (N)	Phosphore (P)	Potassium (K)
Zone à plus de 600 mm de précipitations	40–50	140–175	60–75	72–90
Zone entre 600–400 mm de précipitations	20–30	70–105	30–45	36–54
Zone irriguée	60–70	210–245	90–105	108–126

4. Critères d'appréciation de la qualité du blé dur

D'une importance capitale en Algérie, les céréales sont stratégiques et constituent la base de l'alimentation de la population et la première source (60%) de l'apport calorifique. Jusqu'à 80% de l'apport protéique de notre ration alimentaire (**Sirat, 2018**).

La qualité du blé dur joue un rôle fondamental tant dans la satisfaction des exigences des consommateurs que dans la performance économique des filières céréalières.

Sur le plan économique, la qualité du blé est un facteur de compétitivité majeur. Les marchés internationaux privilégient les lots répondant à des normes strictes en matière de composition et de caractéristiques physiques, ce qui influence directement les prix à l'exportation. Pour les pays producteurs, améliorer la qualité du blé permet de réduire la dépendance aux importations, de valoriser la production locale et d'accroître les revenus des agriculteurs (**FAO**).

4.1. Qualité technologique

La qualité technologique du blé dur englobe toute une série de caractéristiques qui vont du rendement en semoule jusqu'à l'aptitude à la transformation de cette semoule en pâtes (**Nottin et al., 1949**).

La qualité technologique du blé détermine la transformation en produits finis tels que les pâtes, le couscous ou le pain. Des paramètres comme la teneur en protéines, la force du gluten, la couleur de la semoule ou encore la pureté du grain influencent directement les propriétés organoleptiques et nutritionnelles des aliments.

4.1.1. Teneur en protéines

Parmi les paramètres de qualité du grain de blé, la concentration en protéines constitue la propriété la plus déterminante pour la qualification des produits, en raison de son rôle essentiel dans les procédés de transformation industrielle, et notamment dans la fabrication des pâtes alimentaires. (**Lupini et al., 2021**)

Les protéines constituent entre 8 % et 20 % de la matière sèche des grains de blé, représentant ainsi un composant majeur influençant leurs propriétés technologiques et nutritionnelles. Les protéines du blé présentent une grande complexité et interagissent de manière variée entre elles, ce qui rend leur caractérisation difficile. En général, elles sont classées selon leur solubilité (**Shewry et al., 1986**).

C'est à Osborne (1907) que l'on doit la première classification des protéines. Il les a séparé en deux grands groupes suivant leur solubilité dans l'eau (**Linden & Lorient, 1994**).

Les protéines solubles : représente 15 à 20 % des protéines totales (Albumines solubles dans l'eau, Globulines solubles dans les solutions salines)

Les protéines de réserves : représentent 80 à 90 % des protéines totales (Gliadines solubles dans les solutions alcooliques, Gluténines solubles dans les solutions diluées d'acides ou de bases, ainsi que dans les détergents) (**Hernandez et al., 2004**).

Sur le plan quantitatif, la teneur en protéines est principalement influencée par les conditions agronomiques au cours du développement de la plante. Sur le plan qualitatif, elle repose sur les différences de propriétés des protéines, lesquelles sont déterminées par le patrimoine génétique de la variété (**Mok, 1997**).

Une teneur en protéines du grain, à la fois élevée et stable, constitue un caractère génétique essentiel pour la production de produits de haute qualité. Toutefois, sa combinaison avec d'autres caractères avantageux des variétés modernes demeure difficile à réaliser (**Kaan et al., 1993**).

La texture des pâtes cuites est principalement sous la dépendance de la teneur en protéines : 12 à 13 % de protéines dans la semoule sont nécessaires pour qu'un blé dur permette de fabriquer des pâtes de qualité requise (**Autran, 1996**). Par ailleurs, Les pâtes provenant d'une semoule pauvre en protéines présentent des lacunes à l'égard de toutes ces propriétés, ou de quelques-unes (**Dexter et al., 2001**).

4.1.2. Force de gluten

Le gluten est un complexe protéique viscoélastique constitué de 2 familles de protéines de réserve du grain : les gliadines et les gluténines, et c'est lors du contact avec l'eau que les gluténines et les gliadines s'associent pour former un complexe protéique insoluble que l'on appelle le gluten (**Pecquet & Laurere, 2003**).

Les protéines du gluten constituent 80 % du total des protéines du grain (**Osborne, 1907 ; Liu et al., 1996**). Le gluten est constitué de 75 à 80 % de protéines, 5 à 7 % de lipides, 5 à 10 % d'amidon, de 5 à 8 % d'eau et des matières minérales en proportion plus faibles (**Linden & Lorient, 1994**).

Les composantes majeures du gluten sont les gliadines et les gluténines, qui représentent 70 % des protéines totales du blé. Ce sont les deux principaux groupes de protéines de l'endosperme, et varient suivant la variété de blé utilisée (**Linden & Lorient, 1994 ; Masci et al., 1995 ; Mok, 1997**). La qualité des gliadines influence l'extensibilité de la pâte, les gluténines lui donnent élasticité et ténacité.

Elles sont généralement riches en asparagine, glutamine, arginine ou proline (**Kirkman et al., 1982**), mais très pauvres en acides aminés essentiels sur le plan nutritionnel tels que la lysine, le tryptophane et la méthionine (**Shewry, 2007**).

Les protéines du gluten interagissent entre elles pour former un réseau glutineux viscoélastique pouvant être transformé en divers produits alimentaires. Ce réseau constitue la principale structure macroscopique de nombreux aliments largement consommés. Sa viscoélasticité unique, sa capacité de rétention gazeuse et sa cohésion sont essentielles à la qualité des produits à base de céréales tels que le pain, les gâteaux, les biscuits et les pâtes (**Day et al., 2006**).

En fait, c'est le gluten qui communique à la pâte ses propriétés rhéologiques : cohésion, élasticité, ténacité. Un gluten fort confère une plus grande fermeté et stabilité aux pâtes après la cuisson. Alors que les pâtes réalisées à partir d'une semoule à gluten faible ont tendance à se détériorer rapidement et deviennent moulles avec surcuisson (**Payne, 1987**).

La capacité de gonflement des protéines du gluten de blé dur affecte la vitesse de sédimentation d'une suspension de farine dans le milieu de SDS (Sodium dodecyl sulfate). Par conséquent, une meilleure force du gluten de qualité donne lieu à une sédimentation plus lente et un volume de sédimentation plus élevé (**Kumar et al., 2013**).

4.1.3. Taux de vitrosité

Le mitadinage correspond à un grain qui n'est plus complètement vitreux et comportant des parties blanches (**Fig. 11**). Ces parties sont moins dures et produisent moins de semoule et plus de farine. Cela n'est pas recherché dans la transformation du blé dur, qui vise un rendement en semoule le plus élevé possible (**ARVALIS, 2021**).



Figure 11 : Différence entre un grain vitreux (à gauche) et un grain mitadiné (à droite) (**ARVALIS, 2021**).

Les zones vitreuses ont une structure compacte uniforme, les granules d'amidon étant étroitement liés par un réseau protéique, tandis que les zones amylacées du grain du blé sont opaques et ont un aspect crayeux en coupe, à cause de la présence de poches d'air (**Dexter & Matsuo, 1981**). Elles se forment à cause d'un manque de protéines qui empêche la formation d'un réseau protéique assez fort pour que toutes les parties du grain puissent se contracter également au fur et à mesure que le grain sèche pendant les derniers stades du mûrissement (**Dexter et al., 1988, 1989**).

Ce phénomène dû, en particulier, à l'excès d'eau dans le sol qui se manifeste lors des années pluvieuses surtout en fin du cycle de la plante ou à une carence en azote pendant le développement du grain. Il donne des grains gonflés, blanchâtres, à structure partiellement ou entièrement farineuse, en d'autres termes c'est la présence, dans la masse de la cornée de l'albumen, de tâches d'amidon farineux (**Desclaux, 2005**).

Sur le plan technologique, le taux de mitadinage est un critère d'appréciation déterminant dans le rendement et la qualité de la semoule et des produits dérivés (pâtes, couscous). En effet, chez les blés durs mitadinés, le grain est friable et a tendance à se désagréger en farine au lieu d'éclater en petits morceaux affectant ainsi le rendement en semoule et provoque des points blanchâtres sur les pâtes, ce qui réduit l'aptitude à la mouture du blé dur, puisque le marché de cette céréale privilégie les semoules grossières (**Nassif et al., 2011**).

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

Dans certaines procédures reconnues à l'échelle Internationale (ISO et ICC), les grains entièrement vitreux sont définis comme ne montrant pas la moindre trace d'albumen amylicé (**Dexter et al., 2001**).

4.1.4. Indice de jaune

L'indice de jaune du blé est un paramètre de qualité utilisé principalement pour le blé dur, la semoule et les produits transformés comme les pâtes alimentaires. La couleur jaune est principalement due aux pigments caroténoïdes.

Les valeurs de ce caractère résultent d'une composante jaune, principalement génétique, qui doit être la plus élevée possible et d'une composante brune, davantage liée aux conditions de culture, qui doit être faible (**Dexter et al. 2001**). La coloration jaune de semoule de blé dur est un critère très apprécié dans la fabrication de pâtes alimentaires dorées (**Clarke et al., 2005**).

L'intérêt de la mesure de cet indice est essentiellement commercial, les industries de transformation technologique recherchent souvent les semoules de couleur dorée (**Benbelkacem et al., 1995**). En effet, le consommateur recherche des pâtes claires de belle couleur jaune ambrée. Or, la législation interdisant toute adjonction de coloration dans les pâtes, la couleur ne peut provenir que de la semoule et par conséquent du blé dur.

4.1.5. Viabilité et vigueur

La qualité des semences est principalement déterminée par leur potentiel physiologique, notamment leur pouvoir germinatif et leur vigueur (**Marcos, 2015**).

La viabilité dénote le degré auquel une graine est viable, active métaboliquement et possède des enzymes capables de catalyser les réactions métaboliques nécessaires pour la germination et pour la croissance des plantes (**Ovcharov, 1971**). La viabilité est associée au taux de germination dans un essai. Le pourcentage de germination d'un lot de semence représente le taux des graines viables (**Copeland, 1976**).

La qualité des semences comprend des caractéristiques facilement mesurables telles que la viabilité, la pureté du lot de semences, l'état sanitaire et les dommages mécaniques. Cependant, un autre élément essentiel réside dans un critère plus difficile à cerner : la vigueur des semences (**Perry, 1980**).

La vigueur des semences est l'ensemble des propriétés qui déterminent l'activité et la performance de lots de semences présentant une germination acceptable dans un large éventail d'environnements (**ISTA, 2015**).

Dans le cadre de cette définition, il est précisé qu'il ne s'agit pas d'une propriété unique mesurable, mais d'un concept associé à différents aspects de la performance des semences, notamment : la vitesse et l'uniformité de la germination et de la croissance des plantules ; la capacité des graines à émerger dans des conditions environnementales défavorables ; et la performance après stockage, en particulier le maintien de la capacité à germer.

La vigueur peut donc être considérée comme le potentiel de performance des semences viables en pratique agricole, déterminé par l'interaction complexe entre les composantes génétiques et environnementales (**Whittington, 1973 ; Hodgkin & Hegarty, 1978**).

Les semences vigoureuses présentent un taux de germination plus élevé, une meilleure émergence et un développement initial plus rapide, ce qui favorise une implantation rapide et homogène du peuplement au champ (**Sbrussi & Zucareli, 2014**).

À l'inverse, les semences faiblement vigoureuses tolèrent moins bien les conditions environnementales défavorables, ce qui se traduit par une proportion plus élevée de plantules anormales et des lacunes sur la ligne de semis (**Henning et al., 2010**).

4.1.6. Poids de mille grains

Le poids de mille grains (PMG) s'agit d'un test de qualité appliqué au blé afin de déterminer son rendement potentiel en mouture. Le PMG du blé dépend de la taille et de la densité des grains. Connaître la masse de 1000 grains d'un échantillon de céréales donne des indications sur le mode d'élaboration du rendement et des problèmes pendant son développement (échaudage, attaques par les insectes ou par les maladies) (**Ghiti, 2020**).

Le poids de mille grains est un critère essentiellement variétal et dépend aussi des conditions de cultures (**ITCF, 2001**). Dans les zones chaudes de culture du blé dur telle que l'Afrique du nord, les PMG sont moins importants. Ce déficit provient de la brièveté de la période de reproduction (**Grignac, 1981 ; Benbelkacem & Kellou, 2000**).

4.1.7. Poids spécifique

Le poids spécifique (PS) correspond à la masse de grains contenue dans un volume donné (exprimé en kg/hl) et représente ainsi la masse volumique, également appelée poids à l'hectolitre. Couramment utilisé comme critère de référence dans les transactions commerciales, ce paramètre conserve un intérêt majeur pour l'évaluation de la qualité des grains (**Bordes et al., 2008**).

Elle est considérée comme un indicateur de la valeur semoulière en relation avec le rapport enveloppe sur amande. Plus le poids à l'hectolitre est élevé, plus le rapport enveloppes sur amande est faible et le rendement semoulier important (**Scotti, 1997**).

4.1.8. Valeur semoulier

Le Blé dur présentant une teneur élevée en protéines et un bon état physique donnera généralement une semoule à granulométrie uniforme, avec un minimum de particules farineuses (**Fu et al., 2017**).

À l'échelle mondiale, la semoule de blé dur est considérée comme la matière première la plus adaptée pour la fabrication des pâtes alimentaires, du couscous et de diverses variétés de pains, en raison de sa couleur pigmentaire naturelle, de la texture dure de ses grains et de sa bonne teneur et qualité en protéines. Les protéines de la semoule facilitent l'hydratation lors du mélange et assurent la structure des pâtes alimentaires. Une concentration élevée en protéines est une condition préalable à une qualité de cuisson supérieure des pâtes. La teneur en protéines constitue l'un des principaux déterminants de la valeur du blé dur pour la mouture et la transformation en pâtes (**Sissons et al., 2021**).

La valeur semoulière peut être définie comme l'aptitude d'un blé dur à donner un rendement élevé en semoule de pureté déterminée. Cette valeur peut être appréciée indirectement par détermination du PMG, du taux de mitadinage, de moucheture, par l'homogénéité de la taille

des grains et par le taux de cendres (**Kovacs, 1995**). **Dziki & Laskowski (2005)** ont indiqué que le poids de mille grains (PMG) du blé dur est associé au rendement en semoule et au poids spécifique. Ils ont également suggéré que l'uniformité de la taille des grains est très importante dans le processus de mouture, notamment pour les opérations de nettoyage, de conditionnement, de décorticage et de broyage.

La granulométrie des semoules varie beaucoup en fonction des marchés et des usages locaux. Dans les pays du Maghreb et du Moyen-Orient, on utilise surtout des grosses semoules pour la fabrication du couscous ou la consommation en l'état. Dans les pays européens et d'Amérique du Nord, où le développement de la semoulerie est lié à l'accroissement de la demande en pâtes alimentaires, les semoules moyennes ou fines sont alors préférées (**Abecassis, 1991**).

L'un des facteurs de qualité les plus importants du blé dur est son potentiel à produire une semoule et des produits de pâtes présentant une couleur jaune éclatante. La couleur jaune de la semoule et des pâtes est influencée par plusieurs facteurs : la teneur en pigments jaunes du grain ; la dégradation oxydative de ces pigments par la lipoxygénase lors de la transformation des pâtes ; ainsi que les conditions de transformation, telles que la température de séchage, la conception et le type de filière d'extrusion (**Borrelli et al., 1999 ; Troccoli et al., 2000**).

Les opérations de mouture de la semoule constituent un maillon essentiel entre le blé dur et les produits finis de qualité tels que les pâtes, le couscous et les produits de boulangerie méditerranéens populaires. Bien que la qualité de la semoule soit fortement corrélée à la qualité intrinsèque de la matière première, le blé dur, l'environnement de transformation joue un rôle majeur dans la constance et le maintien de la qualité finale de la semoule sur de longues périodes de production.

4.1.9. Qualité culinaire

La qualité culinaire est un critère important associé à la qualité de la semoule (**Liu et al., 1996**). Elle dépend des caractéristiques des blés mis en œuvre (potentiel de qualité propre à la variété et pouvant s'exprimer différemment selon le milieu) de la pureté des semoules (taux d'extraction) et des conditions de fabrication des pâtes. La qualité pastière peut être considérée du point de vue culinaire et du point de vue visuel. L'aspect visuel tient compte du degré de moucheture et de la couleur de la pâte, qui est due à la combinaison de deux composantes : les couleurs jaunes et brunes (**Porceddu, 1995**).

Une pâte de bonne qualité doit être « al dente », un terme qui décrit une pâte cuite de manière à rester ferme sous la dent. De manière générale, les pâtes doivent répondre aux exigences des consommateurs, telles que la préservation de la couleur, une surface lisse, de la fermeté et de l'élasticité. Elles doivent également supporter un léger surcuisson, présenter des pertes nutritionnelles minimales après cuisson et offrir un goût agréable (**Sissons et al., 2005**).

La qualité culinaire est déterminée par deux paramètres : Tenue à la cuisson et à la surcuisson qui dépend de la quantité et de la viscoélasticité du gluten et de la teneur en protéines (**D'Egidio et al., 1982**). D'après **Feillet & Dexter (1996)**, la qualité culinaire supérieure est liée au rapport élevé gluténines / gliadine ou au pourcentage élevé des protéines insolubles.

La force du gluten est largement considérée comme un critère secondaire important pour obtenir une qualité de cuisson supérieure des pâtes (**Sissons, 2008**). La continuité et la solidité de la

matrice protéique formée lors de l'extrusion jouent un rôle essentiel dans la détermination des caractéristiques texturales des pâtes. La relation entre la force du gluten et la qualité de cuisson des pâtes est complexe et non concluante. Par ailleurs, il existe de solides preuves qu'en conditions de séchage à haute température, la force du gluten influence moins la qualité de cuisson des pâtes que lors d'un séchage à basse température (**D'Egidio et al., 1993 ; Zweifel et al., 2003**). Le séchage à haute température est aujourd'hui prédominant dans l'industrie des pâtes.

Il est important de disposer d'un gluten à la fois fort et extensible pour convenir à la plupart des produits, y compris les pâtes longues et courtes, les pâtes fraîches, les pâtes laminées, le couscous, le pain cuit au four, etc. (**Abecassis et al., 2012**). Le blé dur présentant un gluten inextensible a des applications limitées. Il peut provoquer des problèmes lors de la transformation (par exemple pour les pâtes laminées) ou entraîner une qualité médiocre du produit fini (par exemple pour le pain).

4.2. Caractères agro morphologique de qualité

La qualité du produit fini dépend de la matière première. Cela étant dit, les paramètres morphologiques de la plante de blé, notamment la hauteur de la tige, la longueur de l'épi, la présence/absence des barbes (**Fig. 12**) exercent une influence importante sur la qualité technologique des grains.

Plusieurs critères permettent d'évaluer la qualité des grains de blé dur, lesquels dépendent en partie de la variété cultivée ainsi que des conditions climatiques.

4.2.1. Hauteur de la tige

La hauteur des plants est un caractère agronomique important pour la morphogenèse et la formation du rendement en grains chez le blé. Une hauteur de plant appropriée est associée à une réduction de l'incidence de la verse, à une augmentation du nombre de grains par épi, ainsi qu'à une amélioration de l'indice de récolte, entraînant ainsi une augmentation du rendement et de la qualité du grain (**Hedden, 2003 ; Griffiths et al., 2012**).

La hauteur de la plante est un caractère à héritabilité génétique qui reflète la plasticité écologique des géotypes dans divers contextes pédoclimatiques et dépend des conditions météorologiques. La résistance du blé à la verse ainsi que son rendement en grain dépendent de la hauteur et des propriétés anatomiques de la tige (**Korkhova et al., 2022a**).

La formation de la hauteur des plantes a été fortement influencée par les conditions météorologiques au cours des années d'étude. Il a été constaté qu'une pluviométrie plus élevée se traduisait par une plus grande hauteur des plants de blé d'hiver (**Korkhova et al., 2022b**).

La réduction de la hauteur augmente l'indice de récolte et la stabilité face à la verse, mais un nanisme excessif est associé à une diminution du rendement (**Berry & Berry, 2015 ; Tilman et al., 2011**). **Gavrilyuk (2016)** classe conventionnellement les variétés de blé d'hiver selon leur hauteur en cinq types : *Naines* – moins de 60 cm ; *Semi-naines* – 60 à 85 cm ; *à tige courte* – 85 à 105 cm ; *De taille moyenne* – 105 à 120 cm ; *Hautes* – plus de 120 cm.



Figure 12 : Composants morphologiques caractéristiques de la qualité du blé
(Zhai *et al.*, 2016)

Une hauteur optimale de plante comprise entre 0,7 et 1,0 m est considérée comme idéale pour obtenir un rendement maximal en conditions de pénurie d'eau (Spink *et al.*, 2004). La hauteur influence les performances de la plante, notamment en ce qui concerne le rendement et la qualité des grains (Skylas *et al.*, 2000).

Ibrahim (2019) et Mahpara *et al.* (2018) ont constaté que le rendement du blé dépendait de la hauteur des plants, du nombre de talles par plant et du poids sec. L'augmentation de la hauteur des plantes dans les populations hybrides de blé d'hiver entraîne une diminution du rendement en grain (Zhupina *et al.* 2021). La croissance végétative détermine la hauteur finale de la plante en fonction d'une production de biomasse élevée ou faible, tandis que la croissance reproductive fixe le rendement final de la plante en fonction de l'état physiologique de la partie végétative (Chen *et al.*, 2013 ; Rebetzke *et al.*, 2012).

La longueur du pédoncule est un autre caractère clé influençant la stabilité du rendement, la taille de l'épi, le poids des grains et la résistance à la verse. La longueur du pédoncule correspond à la distance entre le nœud de la feuille étendard et la base de l'épi (Scully *et al.*, 2009). Elle contribue à la hauteur de la plante et influence la verse ; ainsi, une longueur de pédoncule plus courte joue un rôle important dans la stabilité du rendement. Cependant, des

pédoncules plus longs, d'origine génétique, sont associés à des épis plus volumineux et à des grains de plus grande taille (**Rebetzke et al., 2011**).

4.2.2. L'épi

L'architecture de l'épi de blé constitue l'un des principaux caractères agronomiques influençant considérablement le potentiel de rendement du blé (**Wang et al., 2022**).

La longueur de l'épi et la compacité de l'épi sont des caractères morphologiques clés de l'épi, étroitement liés au nombre de grains par épi et au poids de mille grains chez le blé (**Yao et al., 2019**). Des épis plus longs se traduisent généralement par une densité de grains plus élevée et un plus grand nombre de grains par épi, augmentant ainsi le rendement. Ces observations sont étayées par des recherches montrant que la longueur de l'épi améliore la résilience du blé en conditions de déficit hydrique, facilitant une meilleure adaptation des grains aux stress environnementaux (**Frantová et al., 2022**).

Étant donné que l'épi de blé est un organe reproducteur important, de nombreuses études ont montré que les caractères morphologiques de l'épi (longueur et densité) sont positivement corrélés au rendement en grain (**Kumar et al., 2007**) ainsi qu'aux composantes du rendement (**Wu et al., 2012 ; Gao et al., 2015**). La corrélation entre la longueur de l'épi et le nombre d'épillets par épi, ainsi que son influence sur la répartition des grains, concorde avec les études menées sur le blé, notamment les travaux de **Aktas (2016)**, qui a souligné l'importance de ces caractères dans l'amélioration du rendement en grains.

L'augmentation du rendement constitue un défi pour les sélectionneurs en raison de l'héritabilité complexe et de la nature quantitative de ce caractère (**Patil et al., 2013**). Les sélectionneurs privilégient l'augmentation du nombre d'épis par unité de surface en réduisant la hauteur de la plante, et cherchent à accroître le nombre de grains par épi ainsi que le poids de mille grains en modifiant les caractères morphologiques de l'épi tels que la longueur de l'épi et la compacité de l'épi.

4.2.3. Les barbes

Parmi les caractères morphologiques de l'épi, les barbes possèdent la capacité de réaliser la photosynthèse et les échanges gazeux, fonctions qui sont associées au rendement du blé dans certaines conditions, en particulier en situation de stress abiotique (**Liller et al., 2017 ; Masoudi et al., 2019 ; DeWitt et al., 2020 ; Liu et al., 2021**).

L'importance des barbes chez le blé dur doit être évaluée chaque fois qu'une augmentation du rendement en grains est envisagée, en raison d'une plus grande capacité photosynthétique de l'épi barbu. Selon **Motzo & Giunta (2002)**, les barbes ont augmenté la surface de l'épi de 36 à 59 %, selon leur longueur, qui variait de 5,5 à 13,8 cm. Cela s'est traduit par une interception moyenne de 4 % de rayonnement supplémentaire par les épis barbus.

La position des barbes sur les épis de blé facilite le transfert des glucides vers les grains en raison de leur distance de translocation relativement courte (**Li et al., 2006 ; Ali et al., 2010**).

Des études antérieures ont montré que les cultivars barbus présentent des rendements plus élevés que les cultivars sans barbe ou dont les barbes ont été retirées (**DeWitt et al., 2020**). Par ailleurs, du fait de l'évolution biologique des caractères, les barbes jouent un rôle crucial dans

la dissémination des graines et dans la protection contre les prédateurs, tels que les animaux et les oiseaux (**Elbaum et al., 2007**).

5. Enjeux actuels et défis

La production céréalière en Algérie est fortement dépendante des conditions climatiques. Cela se traduit d'une année à l'autre par des variations importantes de la superficie agricole utile, de la production et du rendement. Ainsi, le manque de précipitations, mais aussi la mauvaise répartition des pluies pendant l'année explique en grande partie la forte variation de la production céréalière (**Djermoun, 2009**). Les caractères technologiques d'un blé sont fortement liés à sa variété. Et sont susceptibles de fluctuations sous l'influence des conditions environnementales, ces écarts peuvent aller jusqu'à déprécier complètement le blé vis à vis de l'industrie.

Entre 2002 et 2003, la production céréalière a connu une progression remarquable, passant de 1,95 à 4,26 millions de tonnes. En revanche, une forte baisse a été enregistrée entre 2007 et 2008, avec une chute de 50 %, passant de 3,5 millions de tonnes en 2007 à seulement 1,7 million de tonnes en 2008 (**Chabane, 2010**). Plus récemment, la production de céréales a atteint 4,1 millions de tonnes, pour la campagne 2021/2022 (**MADR, 2022**).

Ainsi, la production nationale ne couvre que 25% des besoins de consommation locale. Le reste est assuré par le recours aux importations qui ne représentent pas moins de 70% de la demande domestique en produits céréaliers dans un souci des pouvoirs publics de garantir la disponibilité de ces produits au niveau national, créant de ce fait un déséquilibre flagrant dans la balance commerciale agricole du pays.

La céréaliculture en Algérie est pratiquée essentiellement dans les zones semi-arides, occupe des superficies de l'ordre de 2.900.000 à 3.500.000 hectares, dont le un tiers se situe dans les zones dont la pluviométrie dépasse 450 mm/an. Les pratiques actuelles de notre agriculture se caractérisent par : * Une faible performance : les niveaux de rendements obtenus sont fluctuants et suivent d'assez près les courbes des précipitations avec des pics qui peuvent atteindre 50 q/ha et des creux de 5 q/ha. * Une forte dégradation de la ressource foncière : un taux très élevé d'érosion, 45 % de la superficie des zones telliennes, soit 12 millions d'hectares sont menacés par l'érosion (**Ziza, 2007**).

La céréaliculture est en effet, exposée tout le long de son cycle de développement à une série de contraintes hydrique et thermique. Le stress hydrique est toujours accompagné et agit en interaction avec d'autres stress abiotiques tels que les basses et hautes températures et l'excès de luminosité (**Mekhlouf, 2009**).

En effet le stress hydrique est considéré comme le facteur le plus important limitant la production des céréales. C'est l'un des tout premiers facteurs de limitation des rendements et c'est la première contrainte abiotique qui entraîne des différences non seulement entre les rendements moyen et potentiel mais aussi entre les différentes campagnes céréalières (**Sorrells et al., 2000**).

L'autre contrainte est représentée d'abord par les basses températures caractéristiques des climats de type méditerranéen imposent un hiver très froid et pluvieux (**Mekhlouf, 2009**). Les dégâts de gel tardif sont très fréquents sur les céréales, rendant l'adoption des variétés précoces

trop risquée (**Bouzerzour & Benmahammed, 1994**). La température journalière intervient à divers moments de la vie du blé dur de la germination jusqu' à la maturité. Selon **Gate (2008)** les conditions thermiques les plus nuisibles sont donc des températures excessives et persistantes entre la floraison et le stade grain laiteux.

Les interactions Génotype X Environnement, qui entraînent une incohérence des variétés les plus productives selon les environnements de culture, représentent un défi pour les sélectionneurs et compliquent les recommandations variétales.

Cependant, elles peuvent également offrir des opportunités, en augmentant les rendements grâce à des variétés spécifiquement adaptées à une région donnée ou à une pratique de gestion culturale, ou en limitant la baisse de rendement lors d'années défavorables grâce à la culture de variétés à rendement stable. Donc définir des stratégies d'adaptation et des objectifs de stabilité du rendement dans les programmes de sélection est indispensable pour optimiser la production céréalière.

Pour maximiser l'exploitation de la diversité du blé dur, l'Algérie doit surmonter plusieurs défis. L'un des principaux défis est la gestion durable des ressources hydriques, indispensable à l'irrigation des cultures. De plus, l'infrastructure agricole et l'accès limité aux technologies de pointe freinent la compétitivité internationale de l'Algérie dans la production de blé dur.

En revanche, l'investissement dans la recherche agronomique et les partenariats internationaux peuvent permettre un sursaut dans la production et la diversité génétique du blé dur en Algérie. En exploitant cette diversité, l'Algérie peut non seulement renforcer sa production nationale mais également contribuer significativement aux marchés mondiaux du blé dur.

CHAPITRE II. LE STRESS ENVIRONNEMENTAL

Introduction

De vastes superficies sont soumises à des stress abiotiques plus ou moins sévères. Parmi ceux-ci, les stress : hydrique, thermique et le stress biotique, sont les plus étudiés. (**Di Fonzo et al., 2000**). Le stress hydrique et le stress thermique sont souvent liés et peuvent survenir au cours d'un même cycle cultural. Une sécheresse peut résulter d'une vague de chaleur à l'échelle locale ou d'une augmentation chronique des températures régionales, entraînant des effets sévères, voire létaux, à l'échelle des organes ou de la plante entière, tout en augmentant les taux d'évaporation et en épuisant l'eau stockée dans le sol (**Breshears et al., 2021**).

La durée relativement longue nécessaire à la production du blé accroît la probabilité que la culture soit exposée à des épisodes de stress environnemental. Plusieurs facteurs environnementaux peuvent perturber la production de blé, et environ 40 % de la variabilité annuelle de cette production est attribuable aux stress liés aux vagues de chaleur et à la sécheresse (**He et al., 2022**).

Par conséquent, les conditions météorologiques extrêmes liées au changement climatique mondial représentent un défi majeur pour l'augmentation de la production de blé (**Hickey et al., 2019 ; Gupta et al., 2020**).

1. Stress hydrique

Le stress hydrique est défini comme un déséquilibre, qui s'agisse d'un déficit ou d'un excès, dans la disponibilité en eau au sein du milieu de culture, conduisant à une altération des processus physiologiques et/ou reproductifs de la plante, et se traduisant par une réduction des performances par rapport au potentiel optimal du génotype. D'un point de vue physique, le stress hydrique résulte d'un abaissement du potentiel hydrique dans l'air et/ou dans le sol en dessous d'une certaine valeur, dépendant du génotype, du phénotype et des caractéristiques du milieu (type de sol, température, vent) (**Lamaze et al., 1994**).

En effet, on assiste à un stress hydrique lorsque la demande en eau dépasse la quantité disponible pendant une certaine période ou lorsque sa mauvaise qualité en limite l'usage (**Madhava Rao et al., 2006**). L'installation d'une sécheresse se manifeste par la combinaison d'une part, de la restriction de la disponibilité en eau du sol et, d'autre part, de l'augmentation de la demande évaporative (**Kiani, 2007**).

En Algérie plus d'un million d'hectares sont consacrés pour le blé dur dans les régions semi-aride et notamment dans les haut-plateaux, qui se caractérise par une faiblesse et une forte irrégularité des précipitations et de fortes températures sur une grande partie de l'année (**Zitouni & Aïdaoui, 2006**).

Le stress environnemental constitue un important facteur limitant pour la production des céréales puisqu'il affecte tous les aspects de croissance. En effet plusieurs modifications se produisent au niveau de la plante lors d'un déficit hydrique (**Monneveux & Belhassen, 1997**). Tous les processus de la plante sont affectés par le déficit hydrique, que ce soit le métabolisme, l'organogénèse (production d'organe par les méristèmes) et la morphogénèse (phénomène de différenciation, et de croissance aboutissant à des organes matures) (**Doré et al., 2006**).

1.1. Effet sur le blé

De manière générale, les cultivars de blé sont considérés comme étant les plus sensibles à la sécheresse aux premiers stades de croissance, ce qui affecte la germination, l'établissement du couvert végétal et la couverture du sol (qui accroît l'évaporation du sol), ainsi que le développement de la culture (**Peltonen-Sainio et al., 2011**).

Il a été démontré que la sécheresse en début de saison est particulièrement préjudiciable aux cultivars utilisés en Europe du Nord, centrale et occidentale. Aux stades de croissance plus avancés, le système racinaire mieux développé du blé d'hiver assure un accès à l'eau dans les couches plus profondes du sol (**Kristensen et al., 2011**).

En Algérie, la rareté et le caractère irrégulier des précipitations peuvent être les facteurs d'une perte partielle ou totale de production, en particulier dans le cas des céréales. L'effet du stress dépend de son degré, sa durée, le stade de développement de la plante, le génotype et son interaction avec l'environnement (**Yokota et al., 2006**). La croissance des plantes est influencée par leurs caractéristiques génétiques ainsi que les facteurs environnementaux. Lorsqu'un stress hydrique survient, la plupart des processus relatifs à la croissance végétale sont affectés.

1.1.1. Sur la phénologie

L'effet du stress hydrique sur la phénologie des cultures a été identifié comme un point clé pour évaluer l'impact du changement climatique sur les cultures agricoles (**Mäkinen et al., 2018**). Le stress hydrique a un impact significatif sur la phénologie du blé, modifiant les différentes étapes de son développement et pouvant entraîner des pertes de rendement (**Fig. 13**).

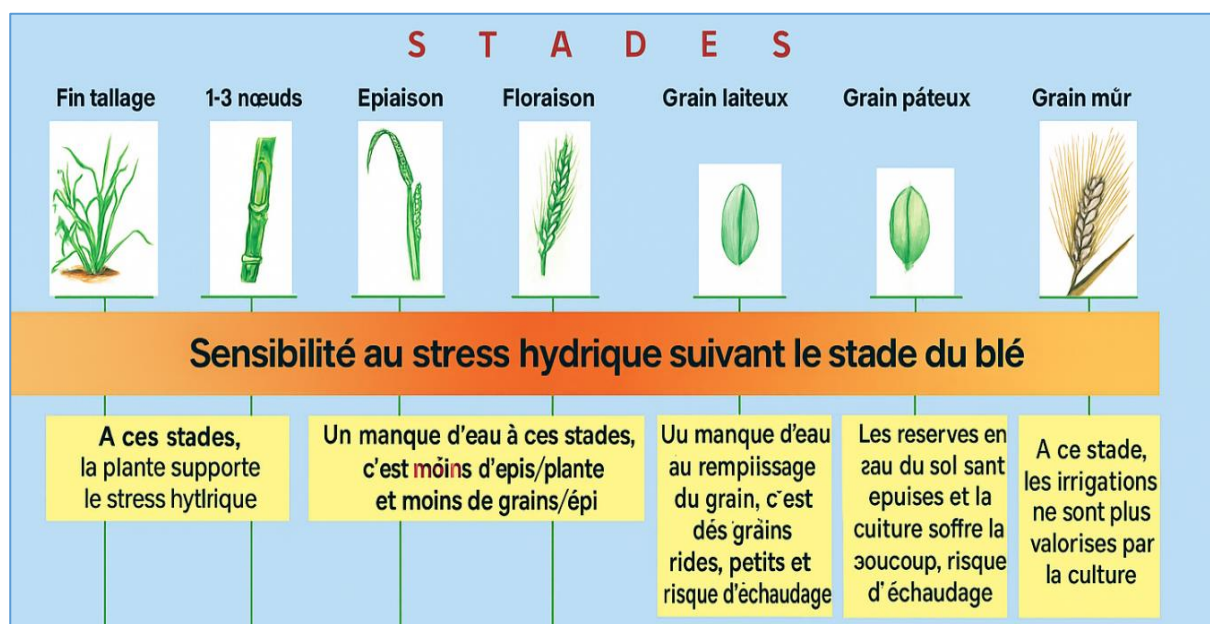


Figure 13 : Sensibilité au stress hydrique suivant le stade phénologique du blé (**ITGC, 2015**)

La période de sensibilité au stress hydrique s'étend du stade « 2 nœuds » jusqu'au stade « grains laiteux ». Du stade épi 1 cm à l'épiaison, le stress hydrique provoque une régression des talles. Cette régression est surtout marquée à partir du stade 2 nœuds pour le blé. Pendant la phase gonflement-floraison, le stress hydrique a un effet négatif sur la fertilité des épis (**Gendre, 2022**).

La durée du cycle, de semis à l'anthèse, se raccourcit au fur et à mesure que le déficit hydrique augmente, particulièrement le stade de la floraison qui se manifeste par sa diminution (**Garcia Del Moral et al., 2003 ; Magrin, 1990**).

Après la floraison, pendant la formation des enveloppes des grains puis leur remplissage, le stress hydrique réduit le poids des grains. A intensité de stress équivalente, son effet sur le rendement est moins marqué que pendant la fin de la montaison. Mais le déficit hydrique est souvent plus élevé pendant cette période, d'où un effet important sur le rendement.

Pendant le remplissage des grains, le blé est aussi sensible aux fortes températures (supérieures à 25°C). Cet effet négatif est moindre en culture irriguée car la transpiration plus élevée permet de limiter la température au sein de la culture (**Gendreau, 2022**).

Le stress hydrique altère la germination et la croissance des plantules en réduisant l'absorption d'eau, la vigueur et les processus métaboliques essentiels (**Fathi et al., 2016**). Chez le blé, cette sensibilité est particulièrement marquée aux stades précoces, contrairement à de nombreuses autres cultures (**Mahpara et al., 2022**).

Le déficit hydrique est l'un de principaux facteurs environnementaux qui affecte grandement la germination des espèces cultivées et réduit leur survie au cours des stades précoces de développement. La sécheresse réduit l'absorption d'eau et diminue la vigueur des plantules, deux facteurs préjudiciables à la germination (**Datta et al., 2011**). Il perturbe l'équilibre hydrique, altère les réactions métaboliques au niveau cellulaire, réduit la synthèse d'ATP et la respiration, et entraîne une mauvaise germination des graines (**Upadhyaya et al., 2021**).

Au cours de cette phase, c'est le métabolisme des carbohydrates qui se trouve fortement affecté (**Ingram et al., 1996**), à travers la perturbation du fonctionnement enzymatique impliqué dans ce processus. Il a été démontré que le glyceraldéhyde-3-déshydrogénase cytosolique est fortement induite par le déficit hydrique ce qui est l'origine d'un changement de l'acuité de la glycolyse (**Velasco et al., 1994**).

De la même manière que pour les organes végétatifs, tant la croissance des jeunes organes reproducteurs (ovules, puis fleurs puis grains) que leur nombre, définis par des processus de ramification, sont limités en cas de déficit hydrique. Il s'ensuit une réduction du nombre de grains et donc du rendement (**Fonseca & Westgate, 2005**).

1.1.2. Sur la morphologie

La morphologie du blé, en particulier la hauteur de la plante et le développement de l'épi, est fortement affectée par des conditions de déficit hydrique. La sécheresse est responsable de la réduction de la hauteur et d'une faible production de matière sèche en raison d'une diminution de l'activité photosynthétique (**Day & Intalap, 1970**).

La hauteur de la plante est positivement associée au rendement de l'épi grâce à l'amélioration des caractères de l'épi chez le blé en conditions normales. Une grande taille favorise une plus grande longueur d'épi et un nombre plus élevé de graines (**Edae, 2013**), tandis qu'une taille plus courte est associée à un plus grand nombre de talles fertiles chez le blé (**Daoura et al., 2013**). Cependant, le stress exerce des effets défavorables sur la hauteur de la plante et le développement de l'épi, réduisant ainsi le potentiel de rendement.

L'organe qui subit l'effet du déficit hydrique en premier lieu est le limbe foliaire dont la croissance ralentit et la sénescence s'accélère. Le stress hydrique diminue l'indice foliaire et la durée de vie de la feuille, et par voie de conséquence la capacité photosynthétique (**Turner, 1997**).

Les plantes soumises à un stress hydrique réduisent leur surface foliaire et augmentent la température de leur couvert végétal afin de limiter les pertes en eau (**Anjum et al., 2011**). En cas de déficit hydrique, la limitation de la perte d'eau peut également résulter de la réduction de la surface transpirante (**Turner et al., 2000**). La transpiration peut enfin être affectée par le phénomène d'enroulement foliaire, lui-même induit par la perte de turgescence (**Hsiao et al., 1984**) l'enroulement foliaire, fréquent chez de nombreuses plantes cultivées (blé, sorgho...) peut donc être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation.

La sécheresse durant la phase de développement reproductif altère la formation de l'épi et la fertilité des fleurons, constituant ainsi une cause majeure de pertes de rendement chez ces céréales tempérées (**Gol et al., 2017**). Le nombre de grains par épi est en fonction du nombre d'épillets par épi, tous les deux sont des composantes importantes dépendant étroitement de la disponibilité en eau (**Botwright Acuna et al., 2012**).

Le déficit hydrique n'affecte pas seulement la partie aérienne, mais la partie racinaire aussi. La répercussion se traduit par ralentissement de la croissance du système racinaire (**Benlaribi et al., 1990**). Le blé dur met en place un système racinaire très développé dans le cas d'un déficit hydrique, ce qui a une conséquence sur les produits photosynthèse qui seront détournés la production de grains (**Baldy, 1973**).

1.1.3. Sur la physiologie

Différentes modifications structurelles et physiologiques se produisent au cours du développement végétatif et reproductif. Les caractères contribuant au rendement réagissent à ces modifications, que la plante soit de grande ou de petite taille (**Gent & Kiyomoto, 1997**). Le déficit hydrique a un effet sur l'inhibition de la synthèse de certaines protéines et l'activation d'autres (**Bewley & Larsen, 1980**), tel que les protéines de choc thermique et les protéines LEA.

Les plantes réagissent aux stress en limitant leur croissance et en activant leurs mécanismes de défense, ce qui est nécessaire pour détourner leur énergie vers la tolérance au stress (**Kocheva et al., 2014**). Le stress perturbe la croissance et le développement normaux en raison d'un déséquilibre entre les ressources internes et externes (**Asif & Kamran, 2011**). Les plantes réagissent aux stress en limitant leur croissance et en activant leur système de défense via l'intégration de multiples voies hormonales.

La sécheresse correspond à une limitation de l'eau sous des températures élevées et s'accompagne de la formation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) en raison d'un potentiel osmotique réduit. Les ROS attaquent les membranes, altèrent leur structure et favorisent les dommages oxydatifs, ce qui réduit finalement le potentiel de rendement (**Kocheva et al., 2014**).

Lors de la sécheresse, les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère sont limités. Cet effet varie suivant les organes de la plante et l'âge du tissu. C'est ainsi que la photosynthèse des

feuilles est plus sensible au déficit hydrique que celle de la tige. L'effet dépressif d'un déficit hydrique sur la photosynthèse résulte d'une baisse de la conductance stomatique, d'une altération de l'appareil photosynthétique (**Sarda et al., 1992**)

La diminution de la photosynthèse, liée à la diminution de la teneur relative en eau et du potentiel hydrique foliaire, est due essentiellement, à la réduction de la pénétration du CO₂, limitée par une fermeture des stomates (**Plaut & Federman, 1991**). En effet, l'effet dépressif d'une contrainte hydrique sur la photosynthèse des végétaux résulte non seulement d'une baisse de la conductance stomatique, mais également d'une altération de l'appareil photosynthétique et/ou d'une diminution de la surface foliaire (**Kaiser, 1987**).

Différents auteurs, ont noté une diminution significative de la photosynthèse en cas de sécheresse (**Nouri, 2011**). A titre d'exemple, La culture du mil en condition difficile d'alimentation en eau, conduit à une diminution de la capacité maximale de photosynthèse d'environ 37% (**Radhouane, 2009**). **Gharti-Chhetri & Lales (1990)** ont montré aussi, chez d'autres espèces du genre *Triticum*, que la photosynthèse devient nulle lorsque le potentiel hydrique foliaire atteint -26 à -27 bars.

Sous un stress hydrique, une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur (**Bousba et al., 2009**). Selon **Tahri et al. (1997)**, une baisse dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles *a* et *b*) a été enregistrée chez trois variétés de blé dur sous l'effet du stress. Par ailleurs, nous remarquons une nette diminution de la teneur en pigments chlorophylliens (chlorophylle *a*, *b*) et caroténoïdiques des feuilles d'arganier, avec le stress hydrique, cela peut être due à la fermeture partielle des stomates qui limite la photosynthèse ou peut être le résultat de la dégradation de la chlorophylle (**Fahmi et al., 2011**).

Tout d'abord la photosynthèse est réduite en raison de la fermeture des stomates, puis elle est affectée par suite de l'altération de l'appareil photosynthétique (réduction de l'assimilation chlorophyllienne, inactivation de l'enzyme fixatrice du CO₂, ...). Cela conduit à une limitation du transfert des assimilats des feuilles vers les épis et réduit, en conséquence, le remplissage des grains (**Ricards, 1983 ; Khaldoun et al., 1990 ; Benlaribi et al., 1992**).

Cependant le déficit hydrique induit un déficit de nutrition azotée (**Garwood & Williams, 1967**), qui provient principalement des réductions de flux d'azote à la racine, et secondairement des réductions des capacités d'absorption par les racines et de la réduction du transport entre les parties souterraines et racinaires du fait de la chute de la transpiration (**Lemaire & Denoix, 1987**).

Enfin, on ne sait pas avec certitude, à ce jour, pourquoi certaines espèces montrent des états de nutrition azotée optimale en sec (sorgho, dactyle aggloméré) alors que chez d'autres (blé) ils se révèlent très sensibles (**Bassiri Rad et al., 1999 ; James & Richards, 2005 ; Gonzalez, 2006**) si bien que le stress azoté se combine au déficit hydrique (**Sadras, 2005**).

1.1.4. Sur le rendement et ses composants

Lorsqu'une plante subit un épisode de sécheresse au stade reproductif, le poids des grains diminue en raison de la dessiccation induite par la sécheresse et de la maturité précoce des cultures de blé (**Sayar et al., 2010**). Elle affecte également les caractères contribuant au

rendement du blé, tels que le nombre de talles par plante, le poids des grains et le nombre de grains par épi (**Farooq et al., 2009**).

Le déficit hydrique a un effet dépressif sur le rendement et ses composantes (**Kara, 2000 ; Chennafi et al., 2006**). Chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.), la sécheresse est une des causes principales des pertes de rendement, qui varient de 10 à 80% selon les années, en région méditerranéenne (**Nachit et al., 1998**).

Tout déficit hydrique qui affecte la formation d'une ou plusieurs composantes, affecte le rendement. La phase de maturation correspond à la période de remplissage du grain. L'effet du déficit hydrique, au cours de cette dernière phase, se traduit par une diminution de la taille du grain (**Bahlouli et al., 2005**). D'après **Grignac (1986)**, la diminution du poids du grain est liée au dessèchement de la dernière feuille, du dernier entre-nœud, et de l'épi.

La sécheresse constitue un des principaux stress abiotiques affectant la production et la qualité du blé dur à l'échelle mondiale. Outre la perte de rendement, les effets de ces stress ont un impact très significatif sur la qualité du blé dur, comme en témoignent une baisse du poids spécifique, une réduction de la taille des grains, un rendement de mouture plus faible et une teneur en cendres de la semoule plus élevée (**Wang et al., 2021**).

Une sécheresse survenant au stade jeune (tallage) réduit surtout la croissance en hauteur et le nombre d'épis par unité de surface. Par contre, lorsqu'elle survient aux stades gonflement ou anthèse, elle réduit, plutôt le poids des épis et le rendement en grains. Ainsi, Le stade juste avant épiaison (gonflement) est le stade le plus sensible au déficit hydrique puisqu'une sécheresse survenant à ce stade peut réduire les rendements en grains d'environ 70% par rapport au témoin (**Ben Naceur et al., 1999**).

Ces stress réduisent les assimilats stockés dans les tiges après l'épiaison et affectent l'appareil photosynthétique au cours de la phase de remplissage (**Bahlouli et al., 2006**). Le nombre d'épillets fertiles est réduit lorsque la sécheresse se produit pendant la phase de différenciation des épillets se traduisant par une réduction du nombre de grains par épi (**Bouzerzour et al., 2002**).

Le manque d'eau après la floraison, combiné à des températures élevées, entraîne une diminution du poids de 1000 grains par altération de la vitesse de remplissage des grains et/ou de la durée de remplissage (**Triboï, 1990**), provoquant ainsi l'échaudage (**Benbelkacem & Kellou, 2001**). Ce qui entraîne une réduction du rendement. Par ailleurs, et pour bien se développer, la plante doit disposer de mécanismes d'adaptation qui lui permettent de supporter la sécheresse (**Slama et al., 2005**).

2. Stress thermique

Wardlaw et al. (1989) montrent que la température optimale pour le développement et le remplissage du grain, varie de 12 à 15°C pour de nombreux génotypes de céréale à paille. Ils observent une diminution de 3 à 5 % du poids du grain pour chaque degré d'augmentation de la température à partir de la base des 12 à 15°C. Dans l'écart des moyennes de températures de 12 à 15°C, une réduction de la durée de remplissage est compensée par une augmentation du taux de remplissage, avec pour effet peu de variation du poids moyen du grain.

2.1. Effet sur le blé

Le blé, en tant que culture de saison fraîche, présente une température optimale de croissance de 15 °C durant le stade reproductif, et il a été observé qu'une augmentation d'un degré Celsius au-dessus de cet optimum entraîne une réduction du rendement de 3 % à 4 % (**Wardlaw et al., 1989**). Cependant, il a été rapporté que la température moyenne mondiale augmente à un rythme de 0,18 °C tous les dix ans (**Hansen et al., 2012**). Ainsi, l'impact probable du stress thermique sur le blé a récemment suscité une attention croissante (**Moriondo et al., 2011**). Le stress thermique provoque des lésions au niveau des structures cellulaires et perturbe diverses voies métaboliques, en particulier la photosynthèse, la thermo stabilité des membranes et les voies liées à la synthèse de l'amidon (**Larkindale & Knight, 2002**).

2.1.1. Sur la phénologie

La température peut modifier les rythmes de développement et de croissance des plantes. De même, le stress thermique affecte les caractères agronomiques à tous les stades de croissance, mais les stades précédant la floraison ainsi que la période d'anthèse sont comparativement plus sensibles aux températures élevées que les stades postérieurs à la floraison (**Cossani & Reynolds, 2012**).

Sous l'effet du stress thermique, le blé achève son cycle de vie beaucoup plus rapidement que dans des conditions normales (**Fischer et al., 1985**) ; par conséquent, les stades de croissance de la culture auront une durée plus courte, avec moins de jours pour accumuler les assimilats au cours du cycle de vie, ce qui entraîne une réduction de la production de biomasse (**Wahid et al., 2007** ; **Fischer & Maurer, 1976**).

Les plantes ont un besoin thermique précis avant d'atteindre certains stades phénologiques. Le système des unités thermiques cumulées a été adopté pour déterminer les dates de floraison/épiaison et de maturité des différentes cultures. Cependant, les différents stades phénologiques varient dans leur sensibilité à la sécheresse et au stress thermique élevé, et cela dépend de l'espèce et du génotype, car il existe de fortes variations interspécifiques et intraspécifiques (**Wollenweber et al., 2003** ; **Howarth et al., 2005**).

La réduction de la durée des phases phénologiques a été étudiée chez plusieurs cultures, et ses effets proviennent principalement de l'altération des processus biochimiques, notamment dans la synthèse des substances transloquées vers les épis (**Shirdelmoghanloo et al., 2016**). Cette diminution de la durée des phases phénologiques modifie parfois l'expression des gènes structuraux régulateurs de la synthèse de protéines, telles que la glutamine, ainsi que leur mobilisation vers les épis (**Royo et al., 2016**). La réduction de la durée des phases phénologiques entraîne également des effets irréversibles et s'accompagne de modifications biochimiques et physiologiques directement corrélées à une baisse de rendement (**Singh et al., 2017**).

Les résultats de **Flohr et al. (2017)** confirment la sensibilité de la phénologie au réchauffement durant les stades reproductifs. De plus, ils ont observé une réduction significative de la phase d'allongement de la tige et de l'anthèse, soulignant l'impact négatif du réchauffement sur la phénologie du blé.

2.1.2. Sur la morphologie

Dans les zones arides et semi-arides d'altitude, le stress thermique peut intervenir même en début du cycle. L'effet des hautes températures au semis se manifeste par une réduction de la longueur du coléoptile (**Hazmoune, 2000**).

La hauteur des plantes, sous l'effet du réchauffement, a été significativement réduite, et des différences ont été observées dans les dernières phases phénologiques des stades végétatifs. Cette variable a présenté une corrélation négative avec la longueur des épis, la masse des épis et le nombre de grains pleins (**Garatuza-Payan et al., 2018**).

Certaines études ont établi que, chez le blé, la sensibilité au réchauffement se manifeste après l'anthèse (**Dias & Lidon, 2009 ; Prasad et al., 2017**) et se caractérise par une sénescence précoce et un mauvais remplissage des grains, entraînant l'avortement des épillets distaux et une diminution de la masse individuelle des grains, ce qui réduit le rendement en grains (**Yang et al., 2017**).

2.1.3. Sur la physiologie

Des températures élevées prolongées peuvent provoquer un stress osmotique, en raison de l'évaporation rapide de l'eau des sols, entraînant une concentration plus élevée en sels (**Limbalkar et al., 2018**).

La dénaturation des protéines et l'augmentation des niveaux d'acides gras insaturés causées par le stress thermique perturbent le mouvement de l'eau, des ions et des solutés organiques à travers les membranes, ce qui entraîne une augmentation de la perméabilité membranaire et, par conséquent, une inhibition des fonctions cellulaires (**Cossani & Reynolds, 2012**).

La contribution de l'activité photosynthétique au rendement n'est pas toujours proportionnelle (**Yang et al., 2017**). Par exemple, des températures élevées peuvent affecter indirectement l'activité photosynthétique en réduisant la durée des phases phénologiques en raison d'une sénescence précoce. Le réchauffement peut accélérer la sénescence des organes photosynthétiques.

Il existe des preuves que la concentration en pigments chlorophylliens peut être réduite différemment sous l'effet du réchauffement et que, bien que les valeurs de photosynthèse puissent être élevées durant certaines phases phénologiques, le rendement peut diminuer (**Yang et al., 2016**).

La réduction à la fois de la biomasse et du rendement en grains confirme les effets négatifs du réchauffement sur la morphologie et la physiologie des cultures. Selon **Shirdelmoghanloo et al. (2016)**, une activité photosynthétique élevée permet de maintenir la masse individuelle des grains, bien que le nombre de grains remplis diminue et que la proportion de grains vides augmente, ces deux facteurs étant les principales causes de la réduction du rendement. Il est probable que, lors de la photosynthèse, dans certaines conditions de stress, une part importante des photoassimilats soit utilisée pour la synthèse de métabolites secondaires destinés à la protection des plantes. De plus, lorsque les plantes sont exposées à des conditions défavorables, les macromolécules sont dégradées en leurs bases monomériques afin d'assurer l'osmorégulation et la remobilisation de l'amidon (**Chandra et al., 2017**).

2.1.4. Sur le rendement et ses composants

Des températures élevées durant les stades reproductifs ou le remplissage des grains peuvent affecter le rendement en réduisant le nombre, le poids et la qualité des grains (**Parent et al., 2017**).

Une méta-analyse portant sur 1 700 simulations publiées (**Challinor et al., 2014**) a estimé une perte de rendement significative du blé pour chaque augmentation de 2 °C de la température dans les régions tempérées et tropicales. **Asseng et al. (2015)** ont rapporté une diminution de 6 % pour chaque hausse de 1 °C de la température dans la production de blé, ce qui équivaut à une réduction d'environ 42 millions de tonnes à l'échelle mondiale. Par conséquent, le principal défi de l'agriculture actuelle est de maintenir les niveaux de productivité des cultures afin de répondre aux besoins d'une population croissante dans un contexte de ressources limitées.

Un stress thermique pendant le remplissage des grains, peut provoquer de fortes fluctuations, non seulement du rendement en grains, mais aussi de la teneur et de la composition en protéines du grain, avec des effets importants sur les propriétés rhéologiques de la pâte ainsi que sur la qualité du produit fini (**Borghi et al., 1995a ; Ciaffi et al., 1995**)

Dans le climat méditerranéen, les variations de la teneur en protéines et des propriétés rhéologiques d'échantillons de semences d'un même cultivar cultivé dans des lieux différents, ou même dans un même lieu mais avec des pratiques agronomiques différentes, peuvent être aussi importantes que les variations observées entre différents cultivars cultivés dans un même environnement. Cependant, le climat méditerranéen offre une opportunité unique pour la production de blés de haute qualité (**Timms et al., 1981 ; Borghi et al., 1995b**).

3. Stress biotique

L'élévation des températures peut favoriser la prolifération des agents pathogènes et leur dispersion vers de nouvelles régions, ce qui représente une menace majeure pour les cultures de blé et facilite l'émergence de nouvelles maladies localement. Le blé dur est soumis à un stress biotique causé par la présence de différentes maladies tout au long de son cycle végétatif, ceci à une incidence sur les rendements ainsi que sur le bon développement du blé dur.

En particulier, la rouille (**Fig. 14**) et l'oïdium (**Fig. 15**) constituent depuis des décennies les principales menaces pour la production de blé, tandis que la fusariose de l'épi (**Fig. 16**) et la pourriture de la couronne sont des maladies relativement récentes, en expansion rapide, qui font actuellement l'objet d'efforts de sélection pour la résistance (**Xiao et al., 2022**).

Parmi les nombreux agents pathogènes qui endommagent la culture du blé, les agents responsables des rouilles sont les plus répandus. Ils sont signalés dans tous les pays producteurs de blé (**Roelfs, 1992**) et provoquent de graves dégâts à la production mondiale de blé. On distingue la rouille brune des feuilles (*Puccinia triticina*), la rouille noire de la tige (*P. graminis* f. sp. *tritici*) et la rouille jaune (*P. striiformis*). Tous les agents pathogènes des rouilles sont des parasites obligatoires et possèdent une gamme d'hôtes spécifique.

**Figure 14 : Rouille brune (BASF, 2025)****Figure 15 : Oïdium blanc (BASF, 2025)****Figure 16 : La fusariose (BASF, 2025)**

L'agent pathogène de la rouille jaune, est capable d'infecter le blé à n'importe quel stade de développement, dès le stade une feuille, et peut provoquer une perte totale de résistance chez certaines variétés. Parmi les facteurs environnementaux influençant le comportement et la propagation de l'agent pathogène, la température joue un rôle majeur dans les épidémies de rouille jaune : des températures basses associées à une forte humidité sont favorables à la maladie, mais des cas d'adaptation de la rouille à des températures plus élevées ont été rapportés (Hovmøller *et al.*, 2008).

L'oïdium du blé, causé par le champignon biotrophe *Blumeria graminis* f. sp. *tritici*, infecte les cultures à l'échelle mondiale, entravant la croissance des plantes, réduisant le nombre de talles, le nombre de grains et leur poids, et pouvant entraîner la mort des plants (Jankovics *et al.*, 2015).

La fusariose de l'épi, également connue sous les noms de brûlure de l'épi ou fusariose de l'épi, est causée par l'infection par des membres du complexe d'espèces *Fusarium graminearum* (Boenisch & Schäfer, 2011).

Les virus peuvent également entraîner une baisse significative du rendement du blé, en particulier les virus à ARN transmis par le sol tels que le virus « Wheat yellow mosaic », et le virus « Chinese wheat mosaic » (Yang *et al.*, 2022).

La culture des céréales est exposée à l'attaque d'insectes ravageurs pouvant entraîner des pertes importantes de rendement (PROFERT, 2018). La nuisibilité de ces ravageurs peut intervenir à différents stades :

- A la levée, par des pertes causées par des insectes du sol (le vers blanc, le taupin, le puceron du cornouiller...).
- Au développement végétatif, par des attaques sur feuilles et des contaminations virales causées par les insectes vecteurs de virus (le puceron du feuillage, le puceron des épis...).
- Au stockage, par les charançons.

3.1. Effet sur le blé

Les stress biotiques exercent des effets conjoints sur la morphologie (réduction de la surface foliaire et de l'intégrité de l'épi), sur la physiologie (diminution de la photosynthèse et des assimilats disponibles) et sur la qualité technologique (perte de valeur industrielle liée aux contaminations fongiques).

La fusariose de l'épi entraîne une baisse de la qualité et du rendement du grain, ainsi que la production de grains avortés, ratatinés et décolorés, appelés « grains tombstone ». Les grains infectés accumulent également des mycotoxines trichothécènes (notamment le déoxynivalénol, le nivalénol et le zéaralénol), représentant un risque sanitaire majeur pour les consommateurs et le bétail (Boenisch & Schäfer, 2011).

Le virus « Wheat yellow mosaic », responsable de symptômes tels que des feuilles en mosaïque ou striées de jaune ainsi qu'un nanisme des plantes, se propage rapidement vers de nouvelles régions. Il engendre généralement des pertes de rendement de l'ordre de 10 à 30 %, pouvant atteindre jusqu'à 70 % lors des années épidémiques (Sun *et al.*, 2013 ; Chen *et al.*, 2014).

Les rouilles (jaune, brune et noire) causées par des espèces du genre *Puccinia* affectent sévèrement la morphologie des plantes, en réduisant la surface foliaire fonctionnelle et en entraînant un dessèchement prématuré des feuilles (Chen, 2005). Ces pertes de surface photosynthétique se traduisent par une altération des échanges gazeux et une réduction de l'assimilation du CO₂, perturbant ainsi la physiologie de la plante et limitant l'accumulation d'assimilats destinés aux grains (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

La septoriose (*Zymoseptoria tritici*) induit des lésions nécrotiques et chlorotiques sur les feuilles, ce qui réduit la durée de la photosynthèse active et accélère la sénescence (Fones & Gurr, 2015).

Les attaques d'insectes réduisent également le remplissage des grains en provoquant des avortements floraux, ce qui affecte directement le rendement et la qualité du produit récolté.

4. Mécanismes d'adaptation

Le rendement du blé peut être augmenté de 25 % grâce au développement de génotypes tolérants aux stress abiotiques et biotiques (**Gill et al., 2004**). L'interaction génotypes × environnement joue un rôle essentiel dans l'amélioration du rendement et de la qualité du blé (**Amanuel et al., 2018 ; Johansson et al., 2020 ; Nehe et al., 2019**).

Cooper et al. (2013), Hussain et al. (2004), Mahpara et al. (2017) et Mahpara et al. (2018) ont étudié l'impact de l'environnement sur la germination et la croissance du blé. Ils ont conclu que les génotypes modifiaient de manière significative le nombre de jours jusqu'à l'épiaison, la longueur de l'épi, la stature des plants, le nombre de talles productives par plant et le rendement en grains.

La réponse des plantes au stress environnementale peut être étudiée par l'identification de caractères liés à la tolérance aux niveaux physiologique, cellulaire, biochimique et moléculaire. Ainsi, l'étude de la diversité des mécanismes de tolérance peut fournir des informations intéressantes sur les différentes possibilités d'adaptation.

La résistance est un terme générique qui comprend plusieurs processus. On en distingue classiquement quatre : L'échappement, la restauration, la tolérance à la déshydratation et l'évitement. **Kiani et al. (2007)**, a défini et établi une classification des 'stratégies' d'adaptation des plantes à la sécheresse : la première consiste à 'éviter' le stress hydrique et l'autre à le 'tolérer'.

La tolérance constitue une stratégie permettant à la plante de maintenir ses fonctions physiologiques malgré une altération de son état hydrique. Elle suppose que l'organisme parvienne à un équilibre thermodynamique avec le stress, c'est-à-dire que les conditions internes de la plante soient ajustées à celles de l'environnement. Dans le cas de la sécheresse, la tolérance implique la capacité de survivre à une dessiccation sans dommage majeur pour les structures cellulaires, ainsi que de restaurer une croissance normale après réhydratation. (**Temagoult, 2009**).

La notion de l'adaptation se confond parfois avec celle de résistance et de tolérance aux stress en fait l'adaptation n'est que la résultante de la tolérance aux contraintes (**Ceccarelli & Grandos, 1992**). Une plante adaptée est donc celle qui tolère ou résiste à un stress donné et réussit à produire à un niveau satisfaisant par rapport à une autre plante qui sera dite non adaptée (**Fellah et al., 2002**).

Les différents mécanismes adaptatifs combinés entre eux peuvent conférer aux plantes des comportements différents en situation de contraintes hydriques. L'adaptation se rapporte à des modifications de structure ou de fonction héritables, qui augmentent l'adéquation de l'organisme dans un environnement stressant.

L'acclimatation, par ailleurs se rapporte à des modifications physiologiques non héritables, qui interviennent au cours de la vie d'un individu. Ces modifications se produisent lors d'une exposition graduée au stress, elles permettent à l'individu de vivre et de se reproduire dans un environnement stressant. La capacité de s'acclimater est bien sûr un caractère génétique, mais les modifications produites en réponse au stress ne sont pas transmises à la génération suivante (**Hopkins, 2003**).

4.1. Adaptation phénologique

La dynamique de la phénologie des cultures est un élément crucial pour déterminer le rendement final. L'effet d'un climat plus chaud sur la phénologie des cultures a été identifié comme un point clé pour évaluer l'impact du changement climatique sur les cultures agricoles (**Moriondo & Bindi, 2007 ; Garatuza-Payan *et al.*, 2018 ; Mäkinen *et al.*, 2018**)

La phénologie des plantes est principalement régie par la température de l'air et, sous stress thermique, le cycle de croissance du blé est généralement raccourci, le début du processus de sénescence est anticipé et la durée de la période de remplissage des grains est réduite. Cela diminue l'efficacité du remplissage des grains et l'accumulation de matière sèche, entraînant ainsi une baisse du rendement et de la qualité (**Ferrise *et al.*, 2011 ; Al-Karaki, 2012 ; Carboni, 2011**).

Les mécanismes d'évitement constituent une stratégie adaptative par laquelle la plante limite les effets délétères d'un stress malgré sa présence dans l'environnement. L'esquive, considérée comme le premier niveau d'évitement, repose sur une synchronisation phénologique permettant d'aligner la durée du cycle de développement de la plante avec la période de disponibilité hydrique.

Le stress thermique affecte généralement davantage le développement reproductif que la croissance végétative. Un développement anormal des inflorescences et une réduction de la fertilité, causés par une chaleur excessive, se traduisent souvent par des pertes de rendement (**Zinn *et al.*, 2010**).

Les plantes peuvent généralement s'adapter à de faibles augmentations progressives de température par des ajustements de traits de développement, tels que la date de floraison, la morphologie de l'inflorescence et les caractéristiques reproductives mâles. Le développement rapide avec une floraison précoce permet à la plante d'éviter les périodes sèches. Cette stratégie appliquée aux espèces cultivées a amené à décaler la date de semis et/ou à sélectionner des variétés plus précoces permettant d'éviter les déficits hydriques de fin de cycle (**Mao *et al.*, 2023**).

D'après **Papadakis (1983)**, la précocité d'un génotype par rapport à un autre se matérialise par le nombre de jours à réaliser jusqu'à l'épiaison lorsqu'ils sont semés et à la même date. De ce fait l'utilité de la sélection se basant sur la précocité dans la date d'épiaison est plus à même de répondre aux soucis d'éviter à la plante des contraintes liées aux froids tardifs et surtout la sécheresse et les hautes températures de fin de cycle (**Van oosteram *et al.*, 1993**).

Le développement de plantes présentant un avantage en conditions de stress abiotiques constitue un défi majeur pour les programmes d'amélioration du blé dur. Les génotypes possédant le caractère stay-green sont des candidats potentiels pour assurer le rendement dans les régions semi-arides (**Di Fonzo *et al.*, 2000**).

4.2. Adaptation morphologique

Certaines caractéristiques telles que la hauteur de la plante, le nombre de talles par plante, le nombre d'épillets par épi, le nombre de grains par épi, le poids de 1 000 grains et la durée jusqu'à maturité sont rapportées comme étant liées à la tolérance à la sécheresse chez le blé (**Ahmad *et al.*, 2006 ; Javed *et al.*, 2024**).

La taille de la plante est importante dans le contexte d'une croissance limitée et de l'activation des défenses afin d'obtenir des résultats satisfaisants. Une plante de petite taille atteint plus rapidement sa hauteur finale qu'une plante de grande taille et passe plus tôt à un comportement défensif contre les espèces réactives de l'oxygène, minimisant ainsi les dommages oxydatifs pour assurer des performances de rendement fiables (**Selote & Khanna-Chopra, 2006**).

De manière générale, les plantes de petite taille se caractérisent par de meilleures performances en conditions de ressources limitées grâce à une forte capacité d'osmorégulation, une activité antioxydante élevée et une bonne stabilité membranaire. Elles satisfont également plus facilement leurs besoins que les plantes de grande taille en raison de moindres exigences nutritives (**Kocheva et al., 2014**).

Il a été admis que les variétés de céréales les plus tolérantes à la sécheresse sont celles qui se caractérisent par une paille haute. Cette tolérance résulterait de l'aptitude à remplir correctement le grain en phase terminale du cycle grâce aux quantités d'assimilats stockées dans la tige et particulièrement au niveau du col de l'épi (**Blum, 1988**).

Elle s'expliquerait aussi et souvent par le fait qu'une paille élevée est associée à un système racinaire profond capable d'une meilleure aptitude d'extraction de l'eau du sol (**Bagga et al., 1970**). La stature semi-naine est un caractère recherché chez le blé, car elle confère non seulement une résistance à la verse, mais permet également une utilisation plus efficace des engrais azotés (**Farooq et al., 2018 ; Ojha & Ojha, 2020**).

La longueur du pédoncule est également liée à la tolérance à la sécheresse, car le stress hydrique peut inhiber la croissance du pédoncule, entraînant un retard d'épiaison, une réduction de la fertilité des épillets et une diminution du rendement en grain (**Muthurajan et al., 2010**).

Une augmentation de la longueur du pédoncule chez différents génotypes de blé a été observée par **Bilgrami et al. (2018)**. Les pédoncules plus longs sont associés à une biomasse d'épi accrue et à une meilleure protection contre les pathogènes foliaires (**Tessema et al., 2020**). Ils stockent également la majeure partie des glucides solubles dans l'eau en période de stress et contribuent à environ 12 % du poids sec du grain (**Paul & Duhan, 2021**).

Une réduction de la croissance foliaire est bénéfique aux plantes soumises à un stress hydrique, puisque la surface des feuilles est diminuée et la transpiration réduite. Habituellement, l'effet exercé par un potentiel hydrique faible est attribué à une perte de turgescence des cellules des zones en croissance (**Nabors, 2008**).

Un autre type d'adaptation foliaire développé par la plante face à un manque d'eau est l'enroulement de la feuille qui peut être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation (**Amokrane et al., 2002**). **O'toole & Cruz (1980)** ont montré que l'enroulement des feuilles entraîne une diminution de 40 à 60% de la transpiration.

Selon **Blum (1988)**, l'activité photosynthétique est moins affectée par les hautes températures de fin de cycle que la feuille étandard. Certains chercheurs se sont également intéressés à la surface de la feuille étandard du blé et ont constaté que celle-ci jouait un rôle clé dans l'amélioration du rendement en grains du blé (**Luo et al., 2018 ; Ma et al., 2020 ; Zhao et al., 2018**).

La longueur du col de l'épi constitue un bon indicateur de tolérance au déficit hydrique (**Fisher et al., 1978**). Le rôle de ce paramètre s'expliquerait par la quantité d'assimilats stockée par ces organes susceptibles d'un transfert vers le grain en cas de déficit terminal (**Gate et al., 1990**).

Les barbes jouent un rôle clé en conditions de stress abiotiques, car elles renforcent la photosynthèse lorsque la sénescence foliaire survient précocement ou lorsque les feuilles sont endommagées (**Tambussi et al., 2007**). **Grignac (1965)** indique que les blés barbus sont plus résistants que les blés faiblement aristés lors d'un déficit hydrique. Les barbes augmentent chez les céréales la possibilité d'utiliser les assimilats lors de la phase de maturation des graines. Elles arrivent à contribuer pour environ 15% au remplissage du grain du fait qu'à ce moment, elles sont les seuls organes qui restent photo synthétisante.

L'efficacité de l'extraction de l'eau du sol par les racines figure parmi les types d'adaptation permettant à la plante d'éviter ou, plus exactement, de retarder la déshydratation de ses tissus (**Turner et al., 2000**). L'augmentation de l'absorption peut être due à l'extension de l'absorption en profondeur et en surface, à la vitesse de croissance et de ramification des racines (**Laurent & Sané, 2007**).

La densité racinaire vue sous l'angle du nombre et de la profondeur est un indicateur de l'aptitude de la céréale à extraire de l'eau du sol surtout en zones sèches où elle manifeste un dynamisme dans la croissance (**Richards & Passiora, 1981**).

Némmar (1983) mentionne qu'un système racinaire bien développé contribue à l'obtention d'un bon rendement en grains en cas de déficit hydrique. Les études réalisées sur quelques variétés algériennes et étrangères de blé dur, ont montrées une réduction de la masse racinaire sèche reflétant l'inhibition de la croissance due au déficit hydrique avec diminution du diamètre liée à une contraction et une perte de turgescence des racines.

4.3. Adaptation physiologique

Le stress hydrique et le stress thermique, agissant individuellement ou conjointement, sont connus pour entraîner une réduction de la conductance stomatique, de la fertilité des épis, de la capacité et de l'efficacité photosynthétiques (**Fig. 17**), ainsi qu'une perturbation de l'équilibre source-puits (**Posch et al., 2022**).

Le stress thermique est connu pour modifier l'architecture de la plante de blé et, lorsqu'il est aggravé par un stress hydrique, il entraîne une altération de l'ajustement osmotique, des dommages causés par des composés réactifs (les espèces réactives de l'oxygène) ainsi qu'une réduction de la teneur en pigments photosynthétiques (**Barnabás et al., 2008 ; Tricker et al., 2018**).

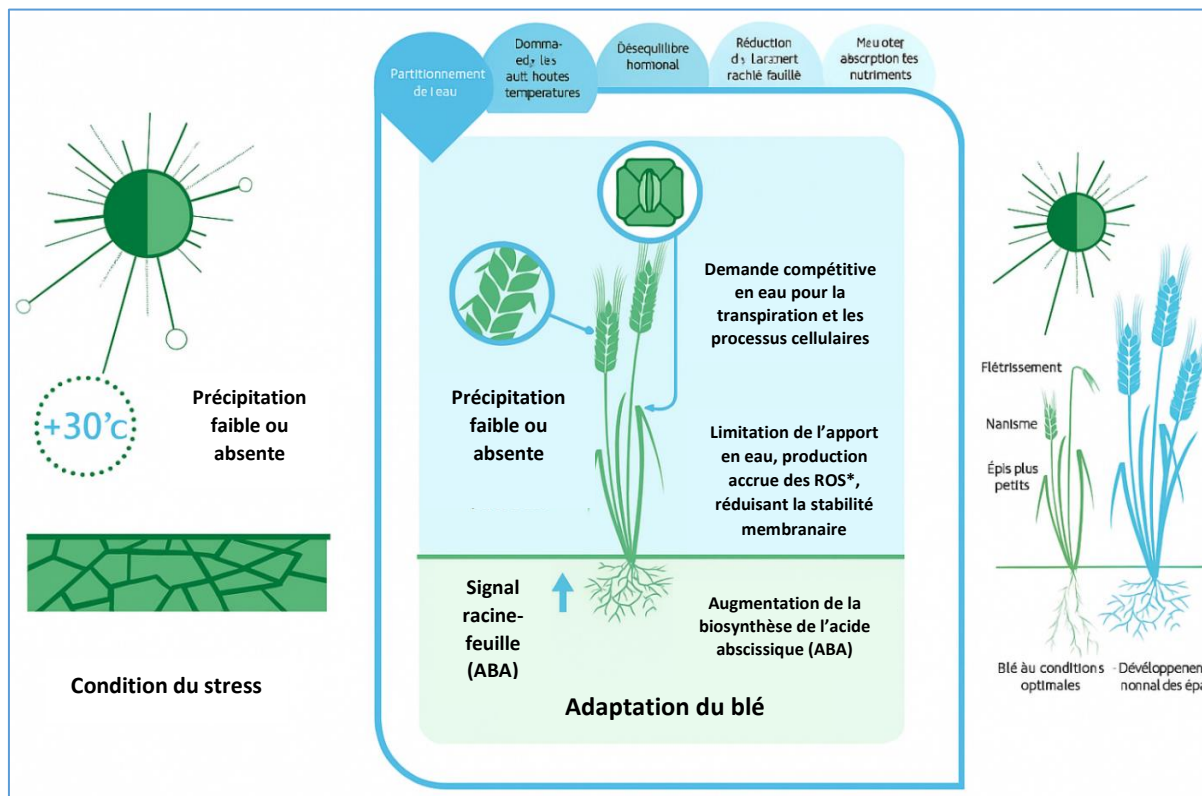


Figure 17 : Adaptation de la plante de blé sous stress environnemental (ROS : espèces réactives de l'oxygène) (Ali, 2019)

La réduction de la perte en eau par la fermeture stomatique est un moyen d'adaptation des plantes au stress hydrique (Hopkins, 2003). La régulation de l'ouverture-fermeture des stomates dépend, du potentiel hydrique foliaire et de l'humidité de l'air au champ (Turner, 1997). Le degré de fermeture des stomates est déterminé par la mesure de la conductance stomatique (Grieu *et al.*, 2008). Une faible conductance conduit à une fermeture des stomates rapide en conditions de déficit hydrique. Les génotypes à faible conductance sont plus sensibles au déficit de vapeur et à la baisse du potentiel hydrique foliaire que les génotypes à forte conductance. Une faible conductance est généralement proposée comme un trait favorable à l'adaptation à la sécheresse (Jones & Rawson, 1979).

La fermeture stomatique s'accompagne d'une réduction de l'assimilation de CO₂ dans les feuilles (par diminution de diffusion) et d'une augmentation de la température des feuilles (le flux transpiratoire contribue à une dissipation de l'énergie radiative incidente) qui peut entraîner une altération des processus photochimiques de la photosynthèse (Grieu *et al.*, 2008).

En situation de stress hydrique, au niveau des racines, l'acide abscissique (ABA), un hormone végétale naturelle ; est synthétisée en réponse à la dessiccation du sol. L'émission de cette hormone bloque la croissance des organes et ferme les stomates (Hamon, 2007), mais la forte accumulation d'acide abscissique, ou une sensibilité accrue à cette hormone en conditions de stress hydrique, semblent affecter négativement la croissance et l'activité photosynthétique des plantes en situation de sécheresse. (Sarda *et al.*, 1992).

La teneur relative en eau constitue un indicateur physiologique directement lié à l'état hydrique de la plante (**Collinson et al., 1997**). Ce paramètre est couramment utilisé pour évaluer la résistance des espèces au stress hydrique (**Berka & Aïd, 2009**). Selon **Turner (1986)**, le maintien d'un potentiel hydrique élevé dépend à la fois de l'efficacité d'extraction de l'eau du sol et de la capacité de la plante à limiter ses pertes hydriques par transpiration.

Sous des conditions de rayonnement solaire intense et de sécheresse, la conductance stomatique diminue, tandis que le déficit hydrique du sol réduit le taux normal de transpiration. Cette limitation de la transpiration entraîne une élévation de la température du couvert végétal (**Rebetzke et al., 2013**).

La température du couvert végétal (canopy temperature) constitue un indicateur pertinent pour l'étude de la tolérance des plantes aux stress hydriques et thermiques. Chez le blé, la température du couvert végétal fait référence à la température de la surface supérieure de la plante (feuilles et les épis), mesurée à l'échelle du couvert, plutôt qu'au niveau du sol ou de l'air environnant. Elle présente l'avantage de la rapidité et de la facilité d'acquisition, nécessaire pour un diagnostic hydrique. Ceci a conduit au développement de plusieurs indicateurs de stress hydrique basés sur la relation qui existe entre la température, les propriétés optiques des végétaux et leur état hydrique.

4.4. Adaptation biochimique

De nombreux gènes contrôlant le métabolisme des sucres simples sont régulés en amont par les variations de l'hydratation cellulaire. Quoi que l'hydrolyse de l'amidon et la libération des sucres réducteurs énergétiques constituent une étape incontournable dans le déroulement de la germination, mais indirectement la disponibilité des carbohydrates pendant cette phase assure un rôle de protection contre le déficit hydrique. Ils constituent les principaux osmolytes impliqués dans l'ajustement osmotique, assurent une protection des macromolécules essentiellement membranaires (**Bray et al., 1989**).

Les cultures ont développé des adaptations face à la sécheresse, telles que la réduction de la teneur en acides aminés (**Michaletti et al., 2018**) ou l'accumulation supplémentaire de sucres, susceptibles d'être remobilisés vers le grain lorsque la photosynthèse ne peut plus soutenir le remplissage des grains (**Guo et al., 2018 ; Nemati et al., 2018 ; Marček et al., 2019**).

Le maintien de la turgescence en conditions de déficit hydrique permet de retarder la fermeture stomatique, de préserver le volume des chloroplastes et de limiter le flétrissement foliaire, conférant ainsi à la plante une meilleure tolérance au déficit hydrique interne. Cette capacité favorise le maintien prolongé de l'activité photosynthétique, dont les produits carbonés peuvent être mobilisés aussi bien pour l'ajustement osmotique que pour la croissance racinaire (**Kiani, 2007**). Chez de nombreuses espèces, la réponse au stress hydrique se traduit par une diminution du potentiel osmotique, résultant de l'accumulation de solutés. Ce mécanisme, connu sous le nom d'osmorégulation, constitue un processus adaptatif majeur face à la sécheresse (**William & Hopkins, 2003**).

Les principaux solutés impliqués dans l'osmorégulation sont des acides organiques, des acides aminés et des sucres. Parmi ceux-ci, la proline occupe une place particulière : son accumulation pourrait contribuer à l'ajustement osmotique (**Kauss, 1977**), participer à la régulation du pH

cytoplasmique (**Pesci & Deffagna, 1984**) ou encore constituer une réserve d'azote mobilisable par la plante après la période de stress (**Tal et Rosenthal, 1979**).

Les variétés qui accumulent plus de proline sont aussi celle qui connaissent la plus forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa (**Tahri et al., 1997**). D'après **Bensari et al. (1990)**, lorsque la contrainte hydrique cesse, la feuille reconstitue les réserves d'amidon et, si une nouvelle contrainte hydrique intervient, le temps d'adaptation est plus court.

Hare & Cress (1997) ont souligné que, bien que les sucres tels que le glucose, le fructose et le saccharose présentent un pouvoir osmotique inférieur à celui de la proline, ils contribuent néanmoins au maintien de l'équilibre osmotique. De nombreuses études ont par ailleurs mis en évidence l'accumulation de sucres solubles en réponse à la dessiccation. Il en ressort que, si divers sucres solubles peuvent être présents dans des tissus bien hydratés, le saccharose est le principal sucre accumulé dans les tissus soumis à la déshydratation (**Déjardin et al., 1999**).

Selon **Bousba et al. (2009)**, le stress hydrique chez le blé dur entraîne une diminution notable de la teneur en chlorophylle. Cette réduction s'accompagne d'une baisse de l'activité photosynthétique, elle-même liée à la diminution de la teneur relative en eau et du potentiel hydrique foliaire. La limitation de la photosynthèse est principalement due à une restriction de la diffusion du CO₂, réduisant ainsi la concentration interne en CO₂. Toutefois, cette baisse de la photosynthèse nette ne traduit pas une altération de la capacité photosynthétique intrinsèque des tissus foliaires (**El Jaafari & Paul, 1993**).

Les protéines de stress également jouent un rôle essentiel dans l'adaptation des plantes. Certaines, dites fonctionnelles, contribuent directement à la tolérance, notamment les aquaporines et les enzymes impliquées dans la biosynthèse des osmolytes (glucides et acides aminés). D'autres, qualifiées de régulatrices, participent aux voies de signalisation menant à l'induction de ces protéines fonctionnelles (**Campalans et al., 1999 ; Schulze et al., 2005**).

Les plantes réagissent aux agressions biotiques par la synthèse d'une large gamme de molécules organiques, capables d'agir soit directement par des mécanismes biochimiques, soit indirectement par des modifications structurales limitant l'invasion microbienne (**Hamli et al., 2020**). Parmi ces réponses figurent le renforcement des barrières mécaniques, notamment par l'épaississement de la paroi cellulaire, l'incrustation de polysaccharides tels que la callose, l'accumulation de métabolites dérivés de la voie des phénylpropanoïdes comme la lignine et les composés phénoliques, ainsi que la production de protéines et glycoprotéines structurales, telles que les glycoprotéines riches en hydroxyproline (HRGPs) (**Claude & Nicolas, 2009 ; Sylvie et al., 2011**).

4.5. Adaptation génétique

Des efforts ont été déployés pour comprendre les bases génétiques des réponses aux stress abiotiques impliquant des caractères agronomiques et physiologiques.

La tolérance au stress hydrique résulte d'un réseau complexe de gènes. Les avancées en biologie moléculaire ont permis d'identifier de nombreuses séquences induites par la déshydratation. Une compréhension approfondie de ce phénomène nécessite une approche intégrée combinant

analyses physiologiques, génétiques, biochimiques et moléculaires, afin d'identifier les gènes clés impliqués dans la tolérance (**Dubos, 2001**).

Les modifications du métabolisme primaire constituent une composante essentielle de la réponse adaptative des plantes aux conditions de stress. De fait, un grand nombre de gènes modulés lors du stress hydrique présentent des profils d'expression similaires sous d'autres contraintes environnementales (**Deepika & Anil, 1999**). Parmi eux, certains sont directement liés à la photosynthèse, notamment ceux codant pour la petite sous-unité de la Rubisco, impliquée dans l'assimilation du CO₂, ainsi que les protéines Cab (Chlorophyll a/b), associées à la capture des photons (**Blomstedt et al., 1998**).

Umeda et al. (1994) ont analysé les variations des transcrits codant pour les enzymes impliquées dans la biosynthèse de l'ATP chez le riz soumis à un stress hydrique, et ont mis en évidence une induction coordonnée de l'expression des gènes associés à cette voie métabolique.

Bien que certains gènes impliqués dans la perception thermique et la régulation des réponses thermo-morphogéniques aient été caractérisés (**Jung et al., 2016 ; Sureshkumar et al., 2016 ; Casal & Balasubramanian, 2019**), les mécanismes contrôlant la différenciation et l'activité des organes du blé sous stress thermique restent encore mal élucidés. Une variante allélique du gène *ELF3* a notamment été associée à la précocité, à la floraison, au nombre d'épillets et à la fertilité florale en réponse à la température (**Lewis et al., 2008 ; Prieto et al., 2018 ; Ochagavía et al., 2019**).

L'exploration de nouvelles sources de variabilité génétique apparaît dès lors comme une priorité pour renforcer la tolérance à la chaleur dans les programmes de sélection. Ainsi, une étude menée sur plus de 1 200 lignées traditionnelles de blé mexicain issues de contextes thermiques contrastés a révélé une corrélation hautement significative entre la teneur en chlorophylle foliaire et le poids de mille grains, permettant l'identification d'accessions supérieures.

Les espèces sauvages constituent une importante réserve de variabilité génétique, souvent supérieure à celle observée chez les cultivars modernes, notamment pour des caractères liés à la tolérance au stress. Ainsi, *Triticum dicoccoides* et *T. monococcum* ont été identifiés comme des sources prometteuses de gènes d'intérêt pour l'amélioration de la tolérance à la chaleur (**Hede et al., 1999**).

Le progrès génétique en matière de tolérance à la sécheresse repose sur la sélection de caractères associés au rendement en conditions de stress, la sélection directe sur le rendement en grains s'étant révélée peu efficace (**Benmahammed et al., 2005**). Dans ce cadre, la tolérance au stress est définie comme la capacité d'un génotype à maintenir un rendement élevé indépendamment des conditions environnementales, ce qui renvoie au concept de stabilité du rendement (**Cattivelli et al., 2002**).

CHAPITRE III. AMELIORATION DU BLE ET SOLUTIONS

La production du blé est soumise à des contraintes multiples, parmi lesquelles le changement climatique (**Rizwan et al., 2024**), la dégradation des sols (**Campos-Avelar et al., 2023**) et l'exigence croissante de systèmes agricoles durables visant à limiter le recours excessif aux intrants chimiques (**Wang et al., 2024 ; Soares et al., 2024**). Ces facteurs représentent des obstacles majeurs à la stabilité et à l'intensification de la production, nécessitant le développement de stratégies scientifiques intégrées pour en atténuer les effets.

1. Génétique et amélioration variétale

Plusieurs mécanismes génétiques, favorisant la résilience par la modulation de l'expression de gènes clés impliqués dans la tolérance au stress ou dans les voies de signalisation associées, ont été exploités par les sélectionneurs afin de compenser les effets de ces conditions environnementales sur le rendement du blé (**Mickelbart et al., 2015 ; Ismail & Horie, 2017**).

Améliorer la tolérance du blé à la chaleur et à la sécheresse vise non seulement à garantir un rendement stable au cours des bonnes comme des mauvaises saisons, tout en maintenant un rendement élevé dans des conditions optimales, mais aussi à préserver la qualité en minimisant leurs effets sur les propriétés morphologiques des grains, lesquelles influencent négativement la qualité de mouture. Ainsi, l'amélioration de la résistance du blé aux stress abiotiques nécessite une compréhension approfondie des gènes et des mécanismes moléculaires associés à la tolérance au stress.

1.1. La sélection

La sélection de génotypes combinant des caractères agro-morphologiques favorables et des caractéristiques de haute qualité sera essentielle pour développer des variétés performantes répondant aux exigences à la fois du secteur agricole et du secteur industriel. De plus, la préservation de cette diversité génétique et phénotypique est cruciale pour garantir la durabilité de la production de blé, en particulier face aux défis liés au changement climatique et à la demande mondiale croissante en aliments (**Manhou et al., 2025**).

La sélection d'une plante cultivée se base sur le pool de gènes existant dans l'espèce considérée, ce qui justifie l'intérêt de la préservation de la biodiversité. Pour certaines propriétés désirées, telles que la résistance aux maladies fongiques ou virales, la diversité au sein du pool de gènes du blé n'est pas suffisante.

Basé sur l'alternance de phases de sélection (choix des meilleurs génotypes) et de recombinaison (inter croisement des meilleurs génotypes), ce mode d'amélioration a concerné, en premier lieu, les espèces allogames. Procédant par cycles successifs définis par les 3 opérations (obtention, évaluation puis recombinaison des meilleures descendances), la sélection récurrente offre de nombreuses modalités définies selon le système de choix et de recombinaison des unités en sélection (**Gallais, 1977 ; Frey, 1981**).

1.1.1. Critères qualitatifs de sélection

Pour déterminer le cultivar le mieux adapté à un environnement donné, il est essentiel de prendre en compte l'interaction Génotype × Environnement, car les cultivars peuvent réagir de manière très différente selon les conditions de culture (**Fig. 18**) (**Yan & Holland, 2010**). Il influence directement la croissance, le développement et les performances productives de la

plante, en plus d'intervenir dans la formation des substances de réserve liées à la qualité des grains et des semences produites (Sangoi *et al.*, 2007).

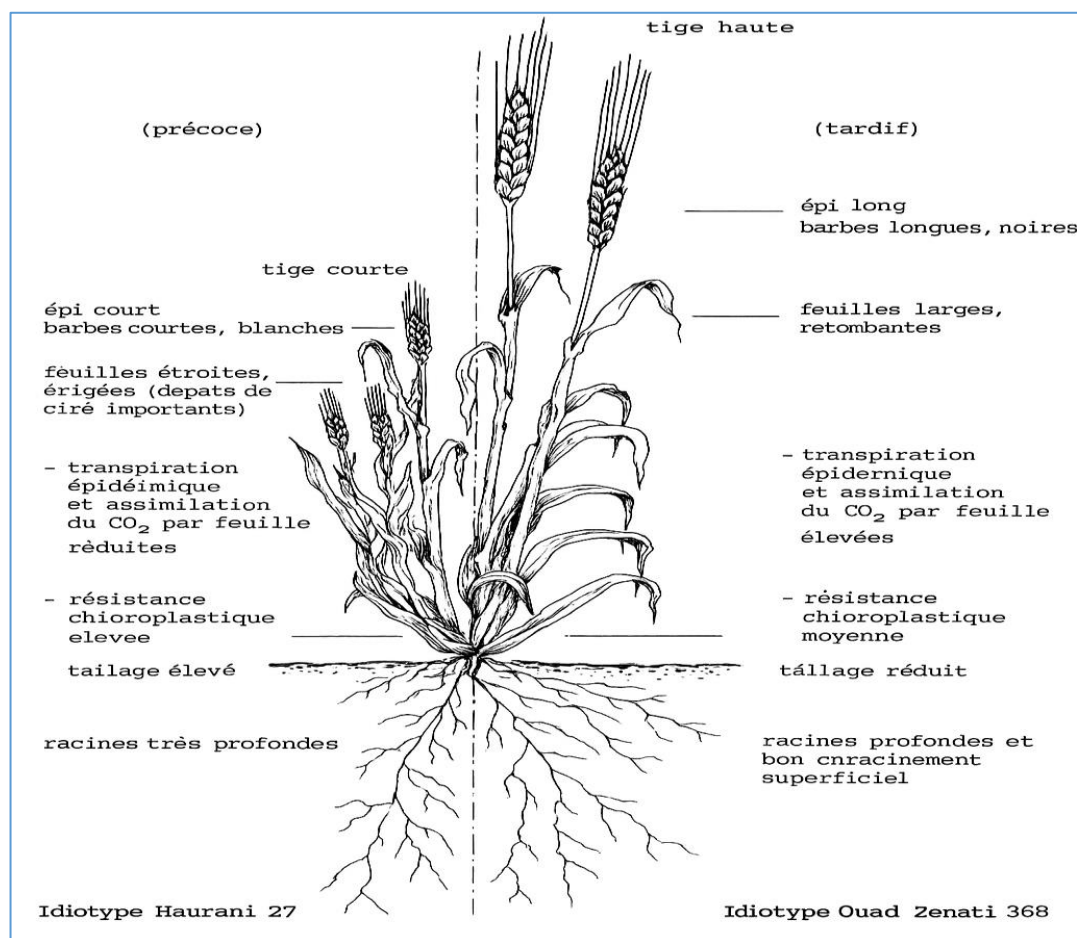


Figure 18 : Représentation schématique des idiotypes de blé dur correspondant aux conditions du Moyen Orient (Haurani 27, à gauche) et des hauts plateaux algériens (Ouad zenati 368, à droite) (Dib *et al.*, 1992)

Les systèmes naturels de protection de la plante face aux agressions biotiques de son environnement figurent parmi les thématiques de recherche actuelle. Il est essentiel de bien comprendre les caractères et les mécanismes liés à la résistance au stress, ce qui faciliterait la sélection de variétés de blé résilientes ainsi que le développement de pratiques culturales adaptées. Les défenses naturelles des plantes utilisent des voies de signalisation complexes souvent liées à celles de réponse aux stress abiotiques. Un aspect moins étudié est celui de la résistance de la plante qui s'opère avant son attaque, lors de sa reconnaissance par le bio-agresseur (Rosa *et al.*, 2009 ; Fiala *et al.*, 1993).

1.1.1.1. Pour adapter au stress environnemental

La variabilité et les extrêmes climatiques devraient augmenter à la fois en intensité et en fréquence (Ray *et al.*, 2015). Si la disponibilité de cultivars présentant une stabilité de rendement face à l'éventail d'événements climatiques extrêmes susceptibles de se produire dans les principales régions de production n'est pas assurée (Reyer *et al.*, 2013 ; Tao *et al.*, 2017),

cette variabilité accrue du climat aura des conséquences néfastes sur la quantité et la qualité des rendements, et donc sur la sécurité alimentaire (**Semenov & Shewry, 2011**).

Il est grand temps de développer des variétés de blé à haut rendement adaptées à différentes conditions de stress. Les futures augmentations du rendement potentiel du blé nécessiteront une augmentation de la surface photosynthétique aux premiers stades de croissance, afin d'accroître le rayonnement incident intercepté par la culture et la biomasse totale produite (**Slafer et al., 2001**).

Certaines variétés peuvent remplir rapidement leurs graines/grains, ce qui peut constituer un avantage dans des environnements où sévissent la sécheresse et le stress thermique en fin de saison, durant la période de remplissage des graines/grains (**Bavei et al., 2011**). Ainsi, elles peuvent éviter l'arrêt prématuré de la croissance des grains et l'accélération de la maturité physiologique observés chez les variétés à maturité tardive en conditions environnementales stressantes telles que les températures élevées.

La sélection visant à réduire la durée du remplissage des grains, tout en maintenant la durée de la période précédant l'épiaison, pourrait ainsi offrir un moyen de raccourcir le temps jusqu'à maturité sans réduire le rendement en grains, en évitant la sécheresse terminale et le stress thermique élevé. Ainsi, allonger la période de développement avant l'épiaison constituerait une meilleure stratégie pour augmenter le rendement en grains que prolonger la durée de la phase de remplissage des grains. Il est recommandé, pour les zones méditerranéennes semi-arides, de privilégier la sélection de génotypes à haut rendement combinant une maturité précoce et une longue phase de développement avant l'épiaison (**Al-Karaki, 2012**).

Le caractère stay-green est un trait héréditaire chez les plantes qui se traduit par un retard de la sénescence foliaire, permettant de prolonger la période d'activité photosynthétique durant la phase de remplissage des grains, même en conditions de stress. Cette photosynthèse prolongée peut améliorer la tolérance au stress et contribuer à l'augmentation du rendement en grain (**Antonietta et al., 2024**). Ainsi, les plantes présentant ce caractère contribuent à accroître le rendement des cultures et affichent de meilleures performances même en conditions de disponibilité hydrique limitée (**Christopher et al., 2018**). Le caractère stay-green est essentiel pour maintenir la photosynthèse, améliorer l'assimilation du carbone et renforcer la tolérance à la sécheresse chez le blé (**Qayyum et al., 2025**).

Clarke et al. (1991), suggèrent que la teneur relative en eau comme critère de criblage pour la sélection de lignées tolérantes à la contrainte hydrique. Les génotypes qui maintiennent leur teneur relative en eau de la feuille élevée lors du stress hydrique seront probablement les plus tolérants et seront les plus productifs (**Sassi et al., 2012**). **Benmahammed et al. (2008)**, notent que la corrélation positive entre la teneur relative en eau et la biomasse accumulée indique, qu'en général, l'accumulation de la biomasse sous stress est dépendante du contenu foliaire en eau.

L'architecture du système racinaire joue un rôle central dans l'évitement du stress hydrique, en raison de son importance dans l'absorption et le transport de l'eau et des nutriments (**Uga et al., 2013**). Des gènes régulant l'angle des racines, d'autres gènes impliqués dans la régulation de la croissance et du développement racinaire en conditions de sécheresse ont également été

identifiés. Par exemple, il a été démontré que « **TaNAC69-1** » réprime directement la transcription de « **TaSHY2** » et « **TaIAA7** » afin de moduler la croissance racinaire en réponse à un traitement de sécheresse, ce qui se traduit par des rendements plus élevés en conditions de disponibilité limitée en eau (**Chen et al., 2016**).

Les protéines de stress jouent un rôle dans l'adaptation de la plante et de ce fait de nombreux chercheurs abordent la résistance au stress par l'isolement et l'étude de ces molécules (**Campalans et al., 1999**). Parmi elles, les protéines LEA (Late Embryogenesis Abundant) constituent un groupe majeur, hydrophiles et non enzymatiques, fortement induites en réponse au stress hydrique (**Campbell & Close, 1997**). Elles jouent un rôle clé dans la protection des membranes et protéines cellulaires, grâce à leurs structures quaternaires (**Close, 1996**), et participent à la stabilisation des structures cytoplasmiques durant la déshydratation (**Ramanjulu & Bartels, 2002**). Leur résistance à la dénaturation thermique et acide suggère une fonction de tampon hydrique limitant la perte d'eau (**Tompa et al., 2006**). Un autre groupe important est constitué par les aquaporines, protéines membranaires qui augmentent la perméabilité à l'eau et régulent la conductivité hydraulique des tissus (**Maurel & Chrispeels, 2001**). Leur expression est modulée par la déshydratation ; la répression de leurs gènes réduit la perméabilité membranaire, favorisant la conservation de l'eau cellulaire en conditions de sécheresse (**Smart et al., 2001**).

L'accumulation de la proline constitue également un mécanisme essentiel de tolérance au stress hydrique (**Slama et al., 2002**). L'accumulation de proline sous l'effet du stress hydrique suggère la possibilité d'une sélection, sur la base de ce caractère, des génotypes capables de maintenir une bonne survie et un rendement en grains stable dans des conditions hydriques limitantes. Pour cette raison, **Bellinger et al. (1991)** ont proposé l'accumulation de proline comme critère de sélection.

L'acide abscissique (ABA), phytohormone bien connue, joue un rôle central et conservé dans la fermeture des stomates afin d'atténuer la transpiration en réponse au stress hydrique (**Ma et al., 2009**). Les protéines « PYRABACTIN RESISTANCE (PYR) / PYR1-like (PYL) », récepteurs de l'ABA chez les plantes, participent à cette réponse à la sécheresse. La surexpression de « TaPYL4 » ou « TaPYL1-1B » renforce la résistance à la sécheresse et améliore les rendements du blé en conditions de stress (**Mega et al., 2019 ; Mao et al., 2022a ; Zhang et al., 2022**).

En plus des mécanismes mentionnés ci-dessus, plusieurs études récentes indiquent qu'une augmentation de la capacité antioxydante pendant un stress abiotique peut également améliorer considérablement la résistance du blé à la sécheresse. Par exemple, la surexpression de « TaASR1-D » peut stimuler l'activité antioxydante chez le blé, renforçant ainsi la résistance à plusieurs stress abiotiques et garantissant des rendements élevés en grain même en conditions de stress (**Qiu et al., 2021**).

Ces paramètres représentent donc de solides candidats pour l'introgression visant à créer des lignées résistantes à la sécheresse.

1.1.1.2. Pour améliorer la qualité

Les sélectionneurs choisissent des caractères présentant une forte capacité de rendement et/ou une stabilité interannuelle de la production dans diverses conditions (**Finlay & Wilkinson, 1963**), tout en veillant à équilibrer soigneusement ces caractères avec d'autres exigences, telles que la résistance aux maladies ou la tolérance à la verse.

La sélection de matériel génétique de blé dur à haut rendement ne doit pas reposer uniquement sur le rendement en grains (**Rezzouk et al., 2022 ; Taghouti et al., 2023**). Les paramètres agromorphologiques et les caractères de qualité, tels que la longueur des barbes, la longueur de l'épi, le poids du grain et la qualité nutritionnelle, sont essentiels pour identifier et développer des variétés performantes, en particulier dans les environnements soumis à la variabilité climatique et aux contraintes abiotiques.

Ces caractères sont souvent plus héréditaires et plus stables que le rendement lui-même, ce qui facilite une sélection indirecte plus efficace et contribue à atténuer les difficultés liées à la complexité polygénique du rendement en grains et aux interactions génotype × environnement (**Manhou et al., 2024 ; Hannachi et al., 2022**).

La hauteur de la plante, la longueur de l'épi et la compacité de l'épi constituent des indicateurs de sélection importants utilisés dans les programmes de sélection à haut rendement (**Li et al., 2020**). De nombreux chercheurs se sont également intéressés à la culture du blé et ont constaté qu'un nombre accru de talles productives, associé à d'autres composantes du rendement, augmentait le rendement en grain du blé (**Abdelkhalik, 2019 ; Liu et al., 2019 ; Mahpara et al., 2017 ; Mahpara et al., 2018**). La longueur du pédoncule présente une forte corrélation avec le poids des grains, les caractères de la feuille étandard (longueur, largeur et surface) ainsi qu'avec la hauteur de la plante. Le développement de variétés naines à haut rendement est possible en sélectionnant, dans les futurs programmes d'amélioration, des gènes favorables pour la longueur du pédoncule (**Farooq et al., 2018**).

La longueur de l'épi constitue le composant de rendement le plus important chez le blé, car une plus grande longueur d'épi se traduit par un nombre plus élevé d'épillets par épi et, par conséquent, un rendement en grain plus élevé. **Mahpara et al. (2017)** ont également rapporté des résultats similaires et confirmé qu'une longueur d'épi accrue contribue à l'augmentation du rendement en grain du blé.

La relation entre les propriétés de mouture et les propriétés physiques des grains de blé a été largement étudiée. **Dziki & Laskowski (2005)** ont indiqué que le poids de mille grains (PMG) du blé dur est associé au rendement en semoule et au poids spécifique. Des recherches récentes sur la relation entre la taille des grains et le génotype, en lien avec les performances de mouture, confirment encore l'importance de ces aspects pour la sélection de blé dur approprié (**Wang et al., 2021**).

1.2. Stratégies de caractérisation fonctionnelle de gènes

Un génome de référence de haute qualité est essentiel pour la découverte de gènes d'élite et de variations allélique sous-tendant l'amélioration génétique du blé. Sur le plan génétique, le blé possède un génome allohexaploïde composé des sous-génomes A, B et D, qui s'est formé à travers deux événements successifs de polyploïdisation au sein du genre « *Triticum* » et de son

genre sauvage apparenté « *Aegilops* », conduisant respectivement à la formation du blé tétraploïde (AABB) puis hexaploïde (AABBDD) (IWGSC, 2014).

Des efforts ont été déployés pour comprendre les bases génétiques des réponses aux stress abiotiques impliquant des caractères agronomiques et physiologiques. Parallèlement à l'assemblage du génome, les études d'association à l'échelle du génome GWAS (Genome-Wide Association Studies) et la cartographie de locus de caractères quantitatifs QTL, permettent d'identifier rapidement et avec précision les gènes contribuant aux caractères de réponse au stress.

1.2.1. Études de GWAS (Genome-Wide Association Studies)

Les GWAS sont considérés comme la stratégie la plus efficace pour la découverte et la caractérisation fonctionnelle de gènes/allèles favorables et de leurs voies associées dans des populations naturelles (Gupta *et al.*, 2020).

Le séquençage à haut débit et le génotypage à marqueurs denses ont conduit à une adoption large des GWAS comme approche fiable pour repérer les régions génomiques responsables de la variation de caractères quantitatifs complexes (Huang & Han, 2014 ; Juliana *et al.*, 2019 ; Pang *et al.*, 2020 ; Mei *et al.*, 2022).

Les GWAS peuvent être utilisés pour cribler diverses variétés au sein d'une population naturelle et, une fois les génotypes établis pour chaque accession, l'analyse phénotypique peut servir à évaluer différents caractères quantitatifs dans cette population (Huang & Han, 2014). Ainsi, une évaluation complète des caractères de réponse au stress peut contribuer à la construction de bases de données phénotypiques indispensables aux GWAS, lesquels permettent à leur tour de détecter à l'échelle des populations les variations naturelles ou les éléments génétiques impliqués dans la détermination d'un phénotype particulier de réponse au stress.

1.2.2. La cartographie de locus de caractères quantitatifs (QTL)

La cartographie de QTL reste l'approche privilégiée pour les populations biparentales. Grâce à ces méthodes, pas moins de 1 200 QTL liés au stress hydrique, 300 QTL liés au stress thermique et plus de 500 QTL associés à la tolérance à la salinité ont été identifiés sur l'ensemble des 21 chromosomes du blé (Gupta *et al.*, 2020).

Différents gènes liés à la hauteur et au rendement sont localisés sur 17 chromosomes de blé sur 21. Les corrélations phénotypiques significatives entre la hauteur et les caractères contribuant au rendement s'expliquent par des associations génétiques entre leurs gènes candidats et les QTL situés au sein d'un même groupe de liaison (Zhang *et al.*, 2013).

Ces associations offrent une opportunité efficace de pyramide génétique pour obtenir une hauteur de plante idéale et un potentiel de rendement optimal (Wu *et al.*, 2012). La sélection de gènes ou de caractères liés au rendement entraîne une sélection associée des gènes ou caractères responsables de la hauteur, et inversement (Würschum *et al.*, 2015).

L'amélioration génétique et l'ingénierie des cultures futures nécessitent une compréhension fine de la régulation adaptative des caractères complexes en interaction avec l'environnement. Cependant, la majorité des recherches se sont limitées à l'étude de stress isolés, alors que les réponses aux stress combinés (chaleur-sécheresse, sécheresse-salinité, chaleur-infection) restent encore peu explorées en raison de leur grande complexité (Yang *et al.*, 2023).

Une étude approfondie est donc nécessaire afin de fournir une vision d'ensemble précise des réseaux génétiques et de leurs interactions contrôlant la réponse des plantes aux stress combinés. Une telle approche pourrait faciliter l'identification et l'ingénierie du génome améliorant la résilience climatique du blé. Grâce aux progrès en génomique, au séquençage à haut débit et aux analyses de phénotypage, les sélectionneurs peuvent se tourner vers les apparentés élités du blé afin d'accroître la diversité génétique et d'identifier des traits liés à la résilience environnementale à transférer par introgression dans les variétés dites de « blé intelligent », capables de maintenir un rendement élevé en conditions favorables comme défavorables (**Mao et al., 2023**).

1.3. Reintroduction du genome locale

Ces populations génétiquement diversifiées contribuent à améliorer la résilience au stress et la stabilité du rendement grâce à l'application de techniques modernes de sélection, y compris les approches génomiques (**Pantha et al., 2024**).

Ayant été cultivées pendant des millénaires dans des environnements difficiles, les variétés locales ont conservé des caractères génétiques qui renforcent leur résilience, notamment face à la sécheresse et au stress thermique (**Lopes et al., 2015**). Contrairement aux variétés modernes, qui privilégient des rendements élevés et une uniformité génétique, les variétés locales offrent des rendements modérés mais fiables, tout en jouant un rôle important dans la conservation de la biodiversité et la durabilité des écosystèmes (**Lazaridi et al., 2024**).

Il convient de noter que de nombreux allèles ou gènes de résistance aux stress ont probablement été éliminés lors de la Révolution verte et des programmes de sélection axés sur le haut rendement au cours du siècle dernier, en raison de leur liaison étroite avec des loci associés à des traits indésirables (**Østerberg et al., 2017**).

Dans l'espèce *Triticum durum*, les génotypes locaux traditionnels semblent constituer des idéotypes aux conditions Algériennes de culture (**Benlaribi & Monneveux, 1988 ; Ali Dib & Monneveux, 1992**) leur permettant depuis d'être utilisés comme géniteurs dans les travaux d'amélioration, présentés par Hurd aux USA dès 1968.

Malgré l'introduction de nouvelles variétés de blé dur à haut rendement, les génotypes locaux (Hedba 3, Bidi 17, O.Zenati 368, MBB) qui sont peu productifs, restent les mieux adaptés aux conditions de déficit hydrique que subissent nos régions. En année difficile les variétés d'introduction sont très instables (**Hazmoune, 2000**).

Les sélectionneurs cherchent aujourd'hui à restaurer ces QTLs de résistance aux stress et à identifier des variétés à haut rendement en conditions stressantes (**Fig. 19**). Néanmoins, des travaux récents suggèrent que des combinaisons de traits physiologiques contribuent à la détermination du rendement en conditions de stress (**Anantha et al., 2016 ; Kumar et al., 2021**), ce qui pourrait expliquer pourquoi l'introgression d'un seul gène ou QTL de réponse au stress conduit rarement à une résistance efficace dans les variétés performantes.



Figure 19 : Nouvelles idéotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) obtenues en Russie par combinaison de QTLs de plus de 6000 génotypes cultivés dans diverses conditions environnementales et géographiques pendant 15 ans (Lyapunova, 2017)

2. Amélioration biochimique et technique

2.1. Biostimulants

La recherche de méthodes innovantes et respectueuses de l'environnement pour améliorer la résistance et la productivité du blé a suscité un intérêt croissant pour les biostimulants. Ceux-ci se sont imposés comme des outils précieux en agriculture moderne grâce à leur facilité d'application et à leur composition respectueuse de l'environnement (Servalesa, 2023 ; Zulfiqar *et al.*, 2024).

Selon Kauffman *et al.* (2007), Les biostimulants sont des substances, autres que les engrais, qui favorisent la croissance des plantes lorsqu'elles sont appliquées à faibles doses. Un biostimulant est défini comme une substance ou un produit d'origine végétale ou microbienne qui, appliqué sur les plantes ou dans la rhizosphère, améliore l'efficacité de l'utilisation des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques et/ou certains traits de qualité de la plante, sans constituer une source directe de nutriments (du Jardin, 2015).

Les biostimulants (BS) sont des produits d'origine biologique regroupant divers agents tels que les activateurs métaboliques, les phyto-stimulateurs, les biofertilisants, les régulateurs de croissance, les agents de biocontrôle, les éliciteurs et les conditionneurs de plantes (Yakhin *et*

al., 2017). Appliqués au sol ou directement aux cultures, ils visent à améliorer la croissance, la tolérance aux stress abiotiques et biotiques, ainsi que la productivité des plantes.

Les biostimulants sont généralement classés en trois grands groupes selon leur origine et leur composition : (1) les substances humiques (HS), (2) les produits contenant des hormones (HCP), et (3) les produits contenant des acides aminés (AACP). Les HCP, tels que les extraits d'algues, renferment des quantités identifiables de substances de croissance végétale actives telles que les auxines, les cytokinines ou leurs dérivés.

Les substances humiques, les extraits d'algues et les biostimulants microbiens (PGPR, champignons mycorhiziens) améliorent l'efficacité nutritionnelle et hydrique, stimulent la photosynthèse et retardent la sénescence foliaire, contribuant ainsi à l'augmentation du rendement et de la qualité du blé sous stress abiotique (Maignan *et al.*, 2020 ; Tanveer *et al.*, 2024 ; Kibret *et al.*, 2024 ; Aburri, 2022).

Selon Ayed *et al.* (2022), divers facteurs peuvent influencer l'efficacité des biostimulants, notamment le type de biostimulant, le cultivar de blé considéré, les modalités d'application, la dose et le moment d'application (Maignan *et al.*, 2021), ainsi que les conditions environnementales prévalentes (Ma *et al.*, 2022 ; Radzikowska-Kujawska *et al.*, 2022).

Malgré l'accumulation croissante de travaux sur les biostimulants, les interactions complexes entre ces substances, le blé et l'environnement demeurent encore insuffisamment élucidées (Moreno-Moraga *et al.*, 2024).

2.2. Pulvérisation foliaire (foliar spraying)

Il a été démontré que les biostimulants renforcent la tolérance des plantes à la sécheresse, ainsi qu'à d'autres stress. Des effets comparables ont aussi été observés suite à la pulvérisation foliaire de nutriments. En conditions de stress hydrique, la fertilisation foliaire à base de molécules humiques a amélioré la rétention d'eau des feuilles ainsi que le métabolisme photosynthétique et antioxydant (Fu Jiu *et al.*, 1995). L'application foliaire d'acide humique a également favorisé l'allongement des racines (Malik & Azam, 1985) et l'augmentation de l'indice foliaire (Figliolia *et al.*, 1994). Plusieurs travaux de recherche ont montré que l'acide humique peut être utilisé comme régulateur de croissance, capable de moduler le niveau hormonal, d'améliorer la croissance des plantes et de renforcer leur tolérance au stress (Piccolo *et al.*, 1992).

En conditions semi-arides, l'application foliaire d'acide humique peut constituer une alternative à la fertilisation du sol classique et une source rapide d'azote lors du remplissage du grain. Durant cette phase, l'assèchement du sol provoque une sénescence précoce, réduit la photosynthèse et raccourcit la période de remplissage du grain chez le blé (Johnson & Moss, 1976 ; Yang *et al.*, 2000).

2.3. Enrobages des semences

L'enrobage des semences est une technique qui consiste à recouvrir la graine d'une fine couche de matériaux (poudres minérales, polymères, colorants, agents de protection, nutriments, micro-organismes, régulateurs de croissance, etc.) dans le but d'améliorer leur performance agronomique (Copeland & McDonald, 2001).

Les traitements de semences nécessitent des quantités d'ingrédients actifs par hectare nettement inférieures à celles des traitements foliaires, principalement en raison de la surface réduite à traiter (**Schmitt *et al.*, 2009**).

Les semences et les plantules sont exposées à une large gamme de contraintes biotiques et abiotiques susceptibles de compromettre la vigueur initiale et, par conséquent, le rendement (**Zaheer *et al.*, 2021**). L'enrobage des semences représente une approche technologique ciblée, spécifique à chaque culture, développée afin de conférer une protection contre les principaux agents de stress, permettant ainsi aux génotypes végétaux d'exprimer intégralement leur potentiel génétique (**Halmer, 2008**).

L'enrobage des semences constitue une solution pertinente non seulement pour faire face à la majorité des stress biotiques, mais également pour atténuer les effets négatifs des stress abiotiques, tels que la sécheresse et la salinité, grâce à l'application ciblée de nutriments, de micro-organismes et de phytohormones (**Vitti *et al.*, 2022 ; Qiu *et al.*, 2020**).

3. Stratégies agronomiques

Les préoccupations croissantes concernant les vulnérabilités et la durabilité du système agricole basé sur la monoculture ont conduit à un réexamen critique des pratiques actuelles dans le secteur. De nombreuses études ont montré que l'agro biodiversité peut améliorer la productivité agricole, la résilience et la capacité d'adaptation (**Bravo-Peña & Yoder, 2024**).

Des données issues de projets de recherche et de développement menés au cours des dernières décennies indiquent clairement que les agroécosystèmes présentant une diversité d'espèces sont mieux placés pour prospérer dans les conditions actuelles et s'adapter aux environnements changeants (**Waha *et al.*, 2018**).

3.1. Techniques d'irrigation

La rareté de l'eau et la répartition inégale des précipitations dans le temps et dans l'espace constituent un problème très sérieux, particulièrement au cours des dernières années en raison du changement climatique. Par conséquent, l'irrigation contrôlée est essentielle pour accroître les rendements agricoles et réduire la consommation d'eau (**Aase & Pikul Jr, 2000 ; Li *et al.*, 2001**).

Pour remédier à un déficit hydrique regrettable, le recours à l'irrigation d'appoint (**Fig. 20**) devient indispensable. La connaissance de chaque phase de développement du blé et l'identification exacte de chaque stade sont obligatoires à l'agriculteur pour intervenir au bon moment à chaque situation de la culture (**Chadouli & Mohamed, 2015**).

L'irrigation déficitaire régulée (IDR) est l'une des approches recommandées à moyen terme par la FAO pour faire face au manque d'eau en agriculture. Elle consiste à appliquer moins d'eau que les besoins totaux de la culture, mais de manière contrôlée et pendant des périodes spécifiques de son cycle de développement. Cette technique permet de contrôler la croissance végétative en augmentant l'indice de récolte (la proportion de biomasse allouée à la croissance reproductive) (**Razouk, 2018**).

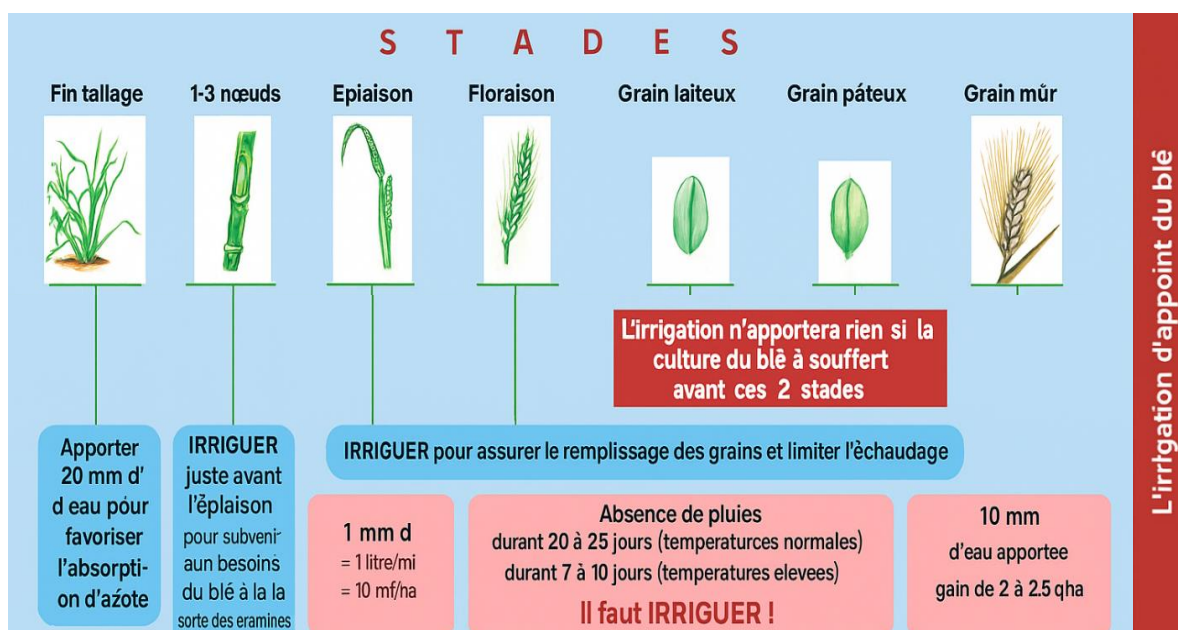


Figure 20 : Irrigation d'appoint du blé (ITGC, 2015)

3.2. Gestion du sol

Le blé présente des besoins nutritionnels élevés, tant en azote (N) qu'en autres éléments nutritifs, qui sont continuellement absorbés au cours de sa culture. Ce phénomène a conduit à le considérer comme une culture appauvrissante pour le sol (**Benini et al., 2023**). En effet, il a été estimé que le blé peut extraire annuellement jusqu'à 200 kg ha⁻¹ d'azote (N) et de potassium (K), ainsi que 50 kg ha⁻¹ de phosphore (P) (**Chuan et al., 2013**). Compte tenu de ces éléments, une fertilisation adéquate du blé est indispensable pour obtenir des rendements élevés et une bonne qualité des grains (**Tyagi et al., 2022**), tout en prévenant l'épuisement des sols.

Afin de contrer les effets négatifs liés au recours croissant à la fertilisation chimique, plusieurs alternatives ont été proposées pour assurer un apport durable en nutriments aux plantes. Parmi celles-ci figurent les engrais organiques ou à libération lente, les amendements et les biostimulants, ainsi que l'application de pratiques agricoles à faible impact, telles que, par exemple, la pulvérisation foliaire (**Tilman et al., 2002 ; Ugulu et al., 2021**)

La nanotechnologie, notamment par l'utilisation de particules d'engrais à l'échelle nanométrique, pourrait offrir de nouvelles approches pour améliorer les pratiques actuelles de gestion des cultures. La réduction de la taille des particules d'engrais entraîne une augmentation du nombre de particules par unité de poids ainsi que de la surface spécifique, ce qui favorise le contact entre l'engrais et la plante, et conduit à une meilleure absorption des nutriments (**Liscano et al., 2000**). En dessous de 100 nm, les nanoparticules permettent aux plantes d'utiliser l'engrais plus efficacement, de réduire la pollution et d'être plus respectueuses de l'environnement, tout en se dissolvant plus facilement dans l'eau, ce qui accroît leur activité (**Joseph & Morrison, 2006**).

PARTIE II.
VOLET EXPERIMENTALE

CHAPITRE I. INTERACTION GENOTYPES DE BLE DUR/ ENVIRONNEMENT**Introduction**

Le rapport récent du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) indique que la température moyenne de surface mondiale a augmenté de 1,1 °C par rapport à la période préindustrielle. Il est bien établi que la région méditerranéenne figure parmi les zones du monde les plus vulnérables aux épisodes de sécheresse et de chaleur (**Tramblay et al., 2020**), marqués par un déplacement vers des régimes pluviométriques moins uniformes en conséquence de températures plus élevées (**Felsche et al., 2024**). En Algérie, le réchauffement climatique a eu un impact plus négatif qu'ailleurs. Alors que l'augmentation de la température mondiale au XX^e siècle était d'environ 0,74 °C, la hausse observée en Algérie se situait entre 1,5° et 2 °C, soit plus du double de la moyenne mondiale. Le réchauffement climatique a également entraîné une baisse estimée des précipitations de 10 à 20 % (**Tabet-Aoul, 2010**).

L'augmentation des températures peut entraîner un décalage et une réduction des saisons de culture, ainsi qu'une accélération de la dégradation des sols et de la perte des terres productives. En conséquence, la production agricole connaîtra des réductions moyennes des rendements céréaliers allant de 5,7 % à près de 14 % (**Mohamed, 2012**).

Les céréales constituent les cultures annuelles les plus importantes pour l'agriculture algérienne (**Hadibi et al., 2009**). Le blé dur occupe la moitié de la superficie agricole consacrée à cette activité (**Mazouz, 2006**). Les recherches sur le blé d'hiver dans la région méditerranéenne montrent que les futures augmentations de température avanceront l'apparition des stades phénologiques, accompagnées d'un raccourcissement de leur durée (**Mo et al., 2016 ; Rezaei et al., 2018**), ce qui entraînera une plus faible accumulation de matière sèche totale et une diminution des rendements (**Tubiello et al., 2000 ; Moriondo et al., 2011**).

Les cultures céréalières algériennes sont exposées tout au long de leur cycle de développement à une série de stress hydriques et thermiques. Le déficit hydrique demeure le facteur le plus limitant pour la culture du blé dur (**Annicchiarico et al., 2005**). La zone de culture de blé dur en particulier se caractérise par de larges fluctuations spatio-temporelles des quantités de pluies et des températures. De ce fait, les stress abiotiques sont fréquents, et plus particulièrement lorsque le cycle de la culture tire à sa fin (**Bahlouli et al., 2005**).

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement morphologique de quelques variétés de blé dur dans trois zones agro climatologiques différentes.

1. Matériel et méthodes**1.1.Présentation des zones d'étude**

Notre étude a été réalisée au niveau de trois zones : Tiffech, Souk Ahras, Algérie ; Sidi Fredj, Souk Ahras, Algérie ; Mauguio, France.

1.1.1. Tiffech :

Tiffech est une commune de la wilaya de Souk Ahras. Elle se situe 25.6 km vers le sud-ouest de Souk Ahras. L'essai a été conduit à la ferme expérimentale de Monsieur El-ARIBI, un multiplicateur de semences céréalières à Tiffech, Souk Ahras, 1.6 km loin du centre-ville de Tiffech (**Fig. 21**).

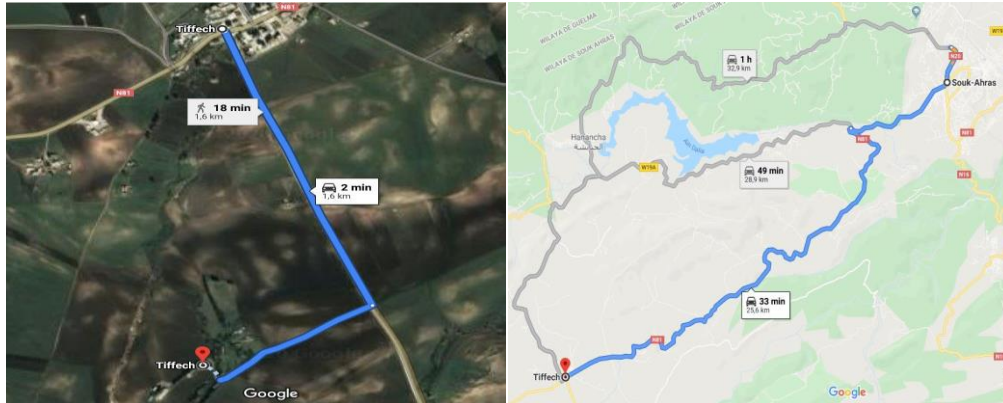


Figure 21 : Localisation géographique de la zone d'étude Tiffech.

La ferme a une altitude de 919m, une latitude de 36.1566 et une longitude de 7.69879, 36° 9' 24" Nord, 7° 41' 56" Est.

Le climat de Tiffech est dit tempéré chaud. En hiver, les pluies sont bien plus importantes à Tiffech qu'elles ne le sont en été. La classification de Köppen-Geiger est de type Csa. En moyenne la température à Tiffech est de 17 °C. Il tombe en moyenne 681 mm de pluie par an. Les illustrations suivantes représentent le bilan météorologique (**Fig. 22**) de Tiffech entre le 01/09/2019 et le 01/09/2020.

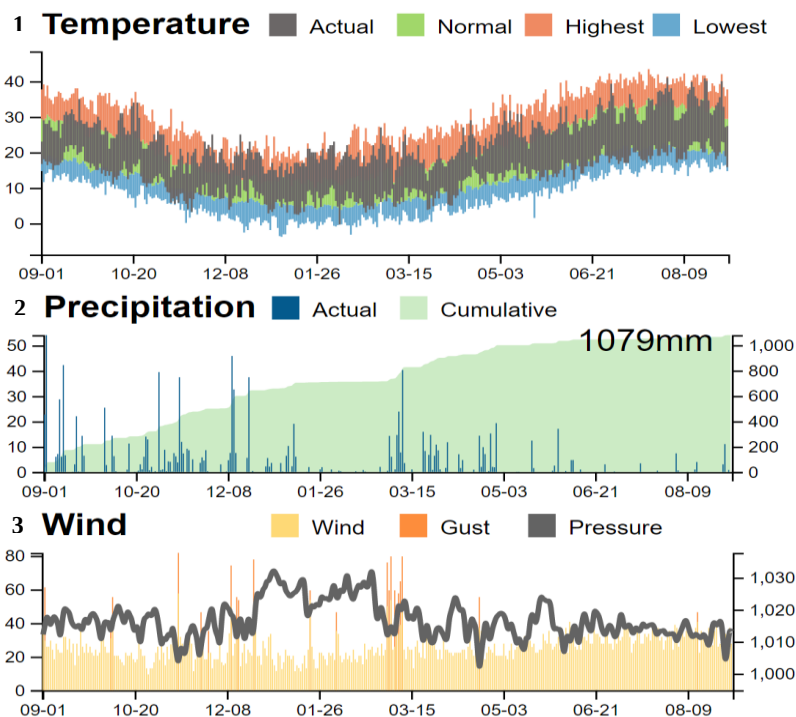


Figure 22 : Bilan météorologique de la zone de Tiffech ; 1 : Température, 2 : précipitation, 3 : vent (visualcrossing, 2020)

1.1.2. Sidi Fredj :

Sidi Fredj est une commune de la wilaya de Souk Ahras. Elle se situe 37.2 km vers le sud-est de Souk Ahras. L'essai a été conduit à la ferme de Monsieur Aouadi, 4 km loin du centre-ville de Sidi Fredj (**Fig. 23**).



Figure 23 : Localisation géographique de la zone d'étude Sidi Fredj

La ferme a une altitude de 805m, une latitude de 36.1537 et une longitude de 8.19528, 36° 9' 13" Nord, 8° 11' 43" Est.

Le climat de Sidi Fredj est chaud et tempéré. En hiver, les pluies sont bien plus importantes à Sidi Fredj qu'elles ne le sont en été. D'après Köppen et Geiger, le climat y est classé Csa. La température moyenne annuelle à Sidi Fredj est de 18.2 °C. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 605 mm

Les illustrations suivantes représentent le bilan météorologique de Sidi Fredj (**Fig. 24**) entre le 01/09/2019 et le 01/09/2020.

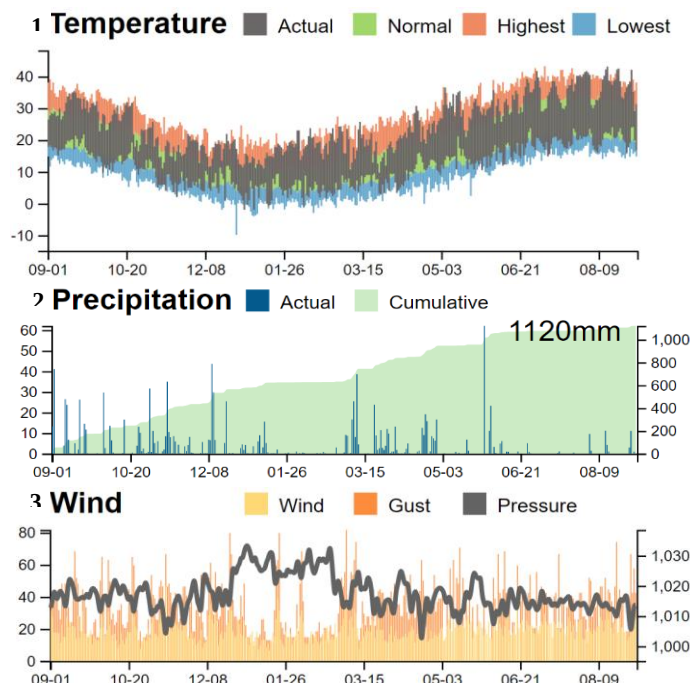


Figure 24 : Bilan météorologique de la zone de Sidi Fredj ;

1 : Température, 2 : précipitation, 3 : vent (**visualcrossing, 2020**)

1.1.3. Mauguio :

Mauguio est une commune française située dans le département de l'Hérault, en région Occitanie. Le troisième dispositif expérimental était réalisé au niveau de L'Unité Expérimentale DiAScope (**Fig. 25**). DiAScope est un lieu d'étude et d'observation de la Diversité (des plantes et de la biodiversité en général) et de leurs capacités d'Adaptation à des environnements divers. Elle offre 75 ha de champs et 2500 m² de serres pour l'expérimentation sur grandes cultures et arboriculture.

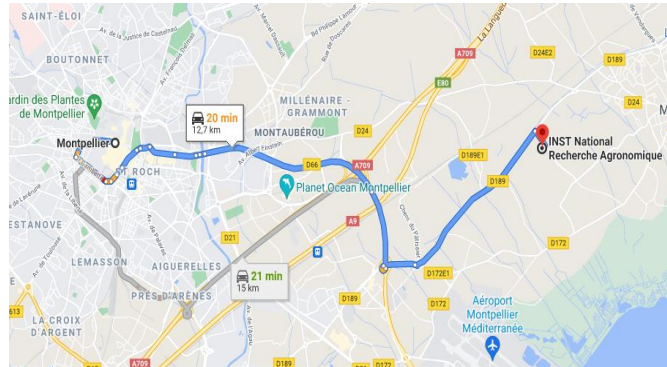


Figure 25 : Localisation géographique de DiAScope

Le climat est méditerranéen franc, caractérisé par des hivers doux, étés chauds, fort ensoleillement et vents fréquents. D'après Köppen et Geiger, le climat y est classé Csa. La température moyenne annuelle à Mauguio est de 15.1 °C. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 709 mm.

Les illustrations suivantes représentent le bilan météorologique de Mauguio (**Fig. 26**).

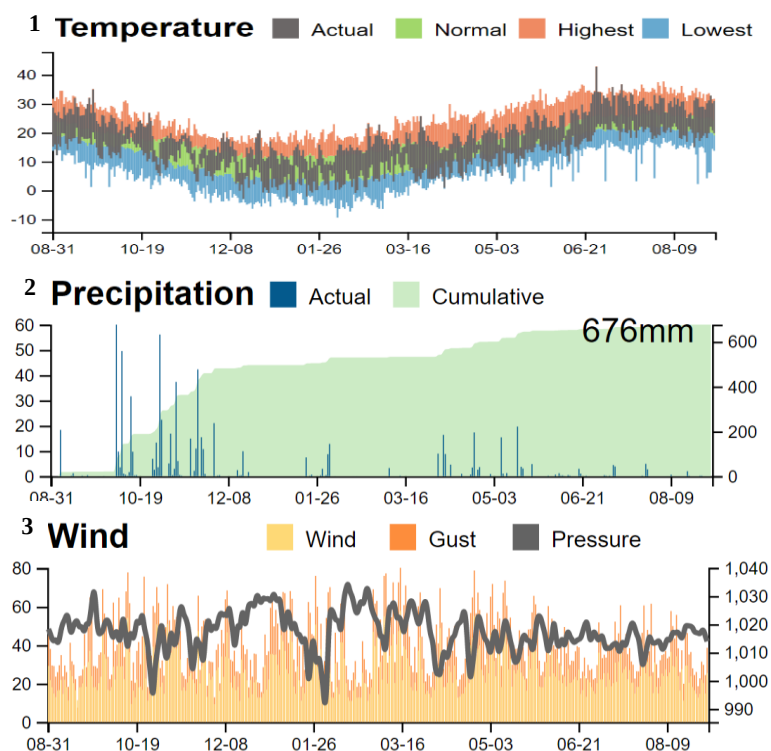


Figure 26 : Bilan météorologique de la zone de Mauguio ; 1 : Température, 2 : précipitation, 3 : vent (visualcrossing, 2020)

1.2. Matériel végétal

Vingt-neuf (29) variétés de Blé dur (*Triticum durum* Desf.) (**Tab. 9**) ont été cultivées dans les trois sites expérimentaux. Le germoplasme a été fourni par l'Unité Expérimentale de Melgueil DIASCOPE (INRA Montpellier, France).

Tableau 9 : Matériel végétal étudié

N°	Génotype	Abréviation	N°	Génotype	Abréviation
01	AGATHE	AGA	16	DURENTAL	DUR2
02	AGRIAL	AGR	17	DURGAMM	DUR1
03	ANEMONA	ANE	18	ECLADUR	ECL
04	ARCOUR	ARC	19	ESCAL	ESC
05	ARDENOIS918448	ARD2	20	JAGUAR800858	JAG
06	ARDENTE	ARD1	21	KIEVLANKA	KIE
07	ARMET	ARM	22	MEGADUR	MEG
08	BEAUDUC	BEA	23	MONDUR	MON2
09	BIODUR	BIO	24	MONTFERRIER	MON1
10	BRUMAIRE	BRU	25	NEPAL	NEP
11	CAR1924	CAR	26	ROMEO	ROM
12	CEEDUR	CEE	27	TELEDUR	TEL
13	DAMOISO	DAM1	28	TOMCLAIR	TOM2
14	DAMOISOX	DAM2	29	TOMCLAIR800891	TOM1
15	DIABOLO	DIA			

1.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté est un dispositif de type blocs aléatoires similaires avec une disposition parallèle des parcelles. Les dimensions des parcelles sont : 1,5m de longueur x 0,5m de largeur avec deux répétitions pour chaque variété (**Fig. 27**).

1.4. Paramètres mesurés

Les paramètres morphologiques suivants ont été mesurés sur des bottillons de 10 plantes prélevées aléatoirement de chacune des parcelles :

- **La hauteur moyenne de la tige** : mesurée en centimètres de la base de la tige à la base de l'épi.
- **La longueur de l'épi** : mesurée en centimètres de la base de l'épi à l'extrémité du dernier épillet sans les barbes.
- **La longueur des barbes** : mesurée en centimètres de l'extrémité du dernier épillet vers l'extrémité des barbes.
- **La distance feuille étendard - épi** : mesurée en centimètres de la ligule de la dernière feuille à la base de l'épi.

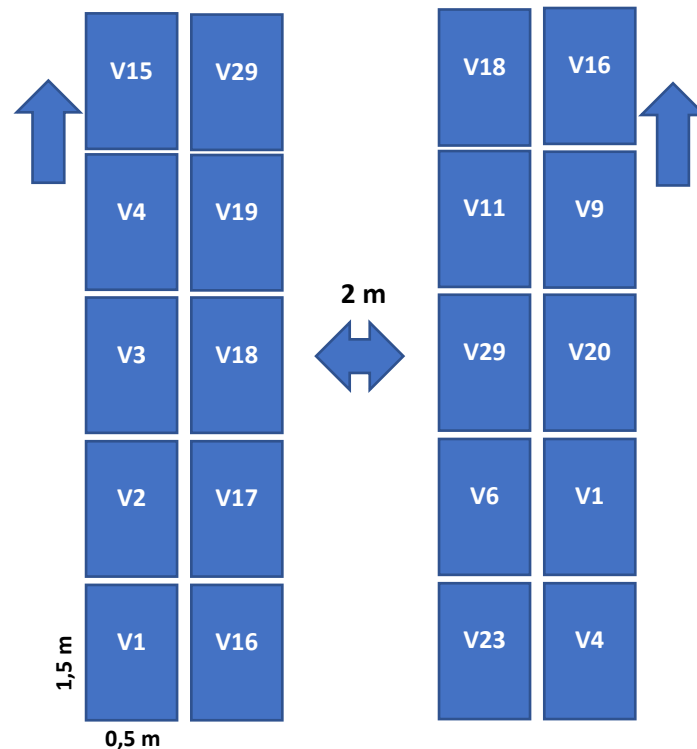


Figure 27 : Dispositif expérimental

1.5. Analyse de données

L'interaction génotype x environnement et la variation de comportement due aux génotypes ont fait l'objet d'une analyse de variance, une analyse multivariée (corrélations) ainsi d'une analyse en composantes principales (ACP) par le logiciel de calcul statistique et graphique. R.

L'analyse de la variance nous permet de déterminer les différences entre les moyennes des différents paramètres. L'analyse de corrélation est utilisée pour voir l'interaction entre les différents paramètres morphologiques des génotypes étudiés dans le même site expérimental. L'analyse en composantes principales nous permet d'interpréter la différence de l'interaction génotype x environnement selon la zone d'étude ainsi que les paramètres étudiés.

2. Résultats et discussion

2.1. Analyse en composantes principales

L'ACP représentant les 4 variables étudiées montre que la hauteur moyenne et la distance épi-dernière feuille sont très corrélées, alors que la longueur des barbes et de l'épi ne paraît pas corrélée.

D'après la Figure 28, la Dim 1 porte la majorité de l'information qui est expliquée principalement par la hauteur moyenne de la tige et la distance entre la feuille étendard et l'épi. La variable contribuant la plus dans l'explication de la Dim 2 est la longueur des barbes. La longueur des épis explique la Dim 3.

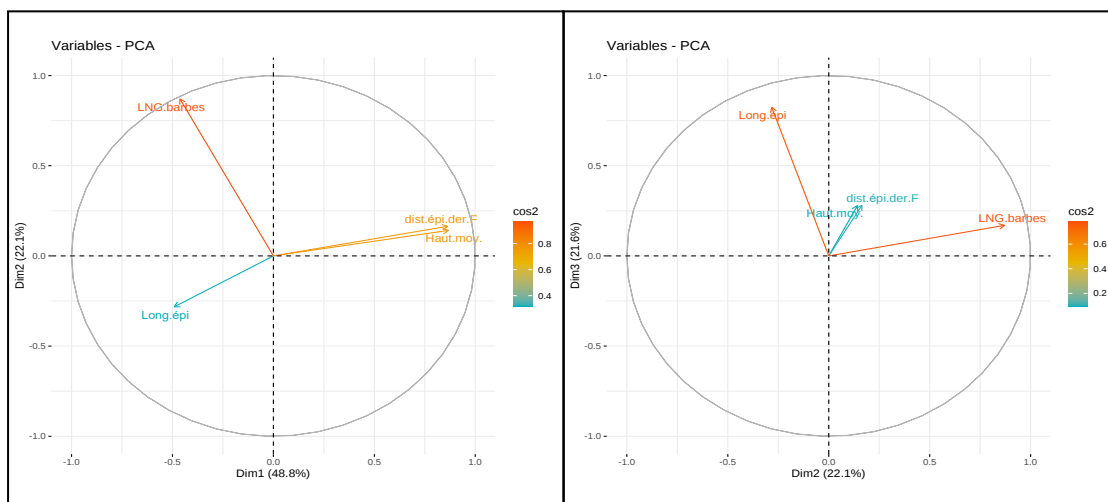


Figure 28 : Résultats de l'analyse en composantes principales

(Haut.moy : Hauteur de la tige, Long.épi : longueur de l'épi, LNG.barbes : longueur des barbes, dist. épi.der.F : distance feuille étendard-épi)

Les 3 sites sont bien différenciés par l'ACP intégrant la matrice totale des données (**Fig. 29, 30**). Les données mesurées à Mauguio se situent principalement dans la partie droite du graphique, celle de Sidi-Fredj à gauche et le site de Tiffech semble intermédiaire.

La hauteur moyenne de la tige et la distance feuille étendard-épi ont joué un rôle important dans la répartition d'un grand groupe de cultivars (**Fig. 29**), notamment ARDENTE, MONTFERRIER, AGATHE (Mauguio), ECLADUR, AGATHE, BEAUDUC (Tiffech) et ECLADUR, AGATHE (Sidi-Fredj).

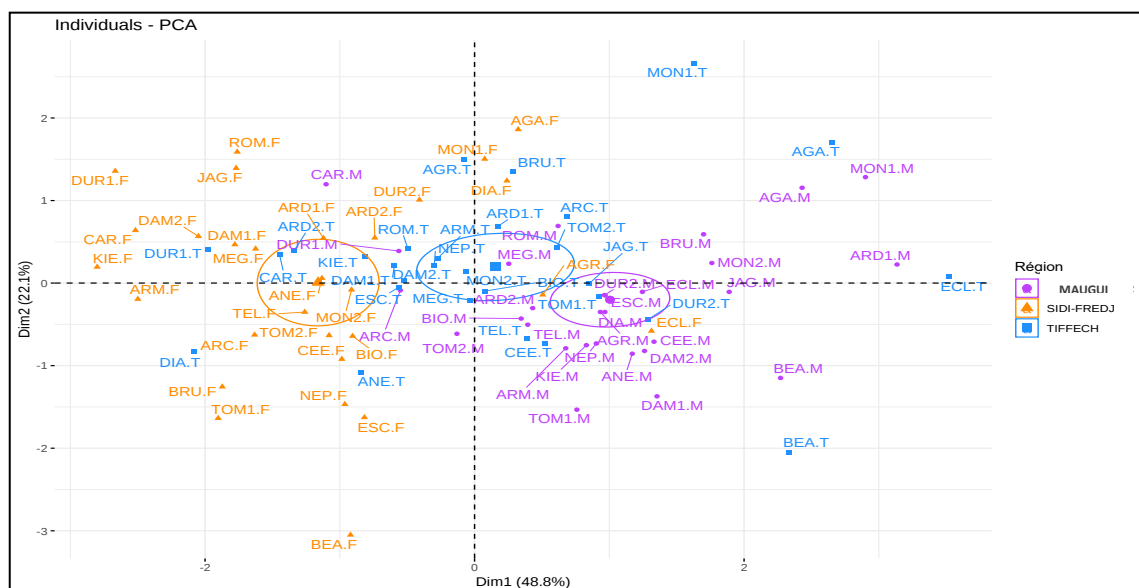


Figure 29 : Représentation graphique individuelle des génotypes sur le plan D1xD2 de l'ACP et leur répartition selon le milieu de culture

Tandis que le contenu en longueur de barbes participe à la formation de la seconde dimension (**Fig. 30**). Ce qui permet la distinction d'un deuxième groupe formé de AGATHE, ROMEO, MONTFERRIER (Sidi-Fredj), MONTFERRIER, AGRIAL et AGATHE (Tiffech) et CAR1924, DURGAMM et AGATHE (Mauguio). Le paramètre longueur des épis explique principalement la répartition sur la troisième dimension, composé principalement par : BEAUDUC, ECLADUR et TOMCLAIR (Sidi-Fredj), DIABOLO et BEAUDUC (Tiffech) et MEGADUR et TOMCLAIR (Mauguio).

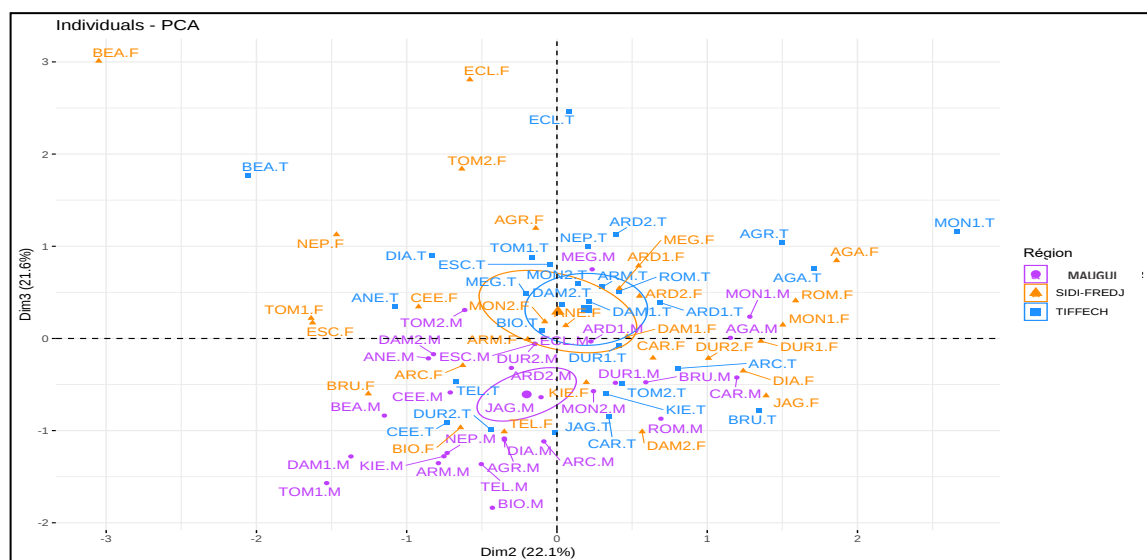


Figure 30 : Représentation graphique individuelle des génotypes sur le plan D2xD3 de l'ACP

Les conditions climatiques étaient plus ou moins différentes dans les trois sites d'expérimentation. L'interaction génotype x environnement a été responsable de l'instabilité des résultats. La différence était particulièrement observée au stade épiaison (stress thermique à Mauguio et un stress hydrique/thermique à Sidi-Fredj).

Pour cela, un comportement différent a été observé au niveau des paramètres étudiés surtout pour la hauteur moyenne de la tige et la longueur des barbes. Cependant, quelques variétés n'ont pas vraiment montré une interaction environnement-génotype significative (AGRIAL, ANEMONA, ARCOUR, CEEDUR, ESCAL et MEGADUR).

Les conditions climatiques de Mauguio ont induit une augmentation de la hauteur moyenne de la tige, qui est un indicateur que la croissance des génotypes n'a été pas limitée. La diminution du taux de précipitation et l'augmentation de la température au stade de l'épiaison ont stimulé une croissance significative de la longueur des barbes pour la majorité des variétés cultivées à Sidi-Fredj. Ceci peut être considéré comme un mécanisme d'adaptation pour minimiser la perte d'eau.

2.2. Analyses de la corrélation

L'analyse des corrélations entre les paramètres mesures montre qu'il y a des liaisons positives et négatives, tantôt faibles tantôt fortes. Ainsi elle met en évidence la différence du comportement des génotypes expérimentées vis-à-vis des paramètres climatiques de chaque zone d'étude.

L'étude des coefficients de corrélation entre les différentes variables mesurées chez les 29 variétés cultivées à Mauguio (**Fig. 31.1**), montre qu'il existe une corrélation positive significative entre la hauteur de la tige et la distance épi-feuille terminale. On observe aussi que la longueur des barbes et la longueur d'épi sont corrélées positivement. D'autre part, la longueur d'épi et la distance entre l'épi et la feuille terminale sont corrélées négativement. Les résultats montrent aussi qu'il n'existe pas de corrélation significative entre la hauteur de la tige et la longueur de l'épi et des barbes.

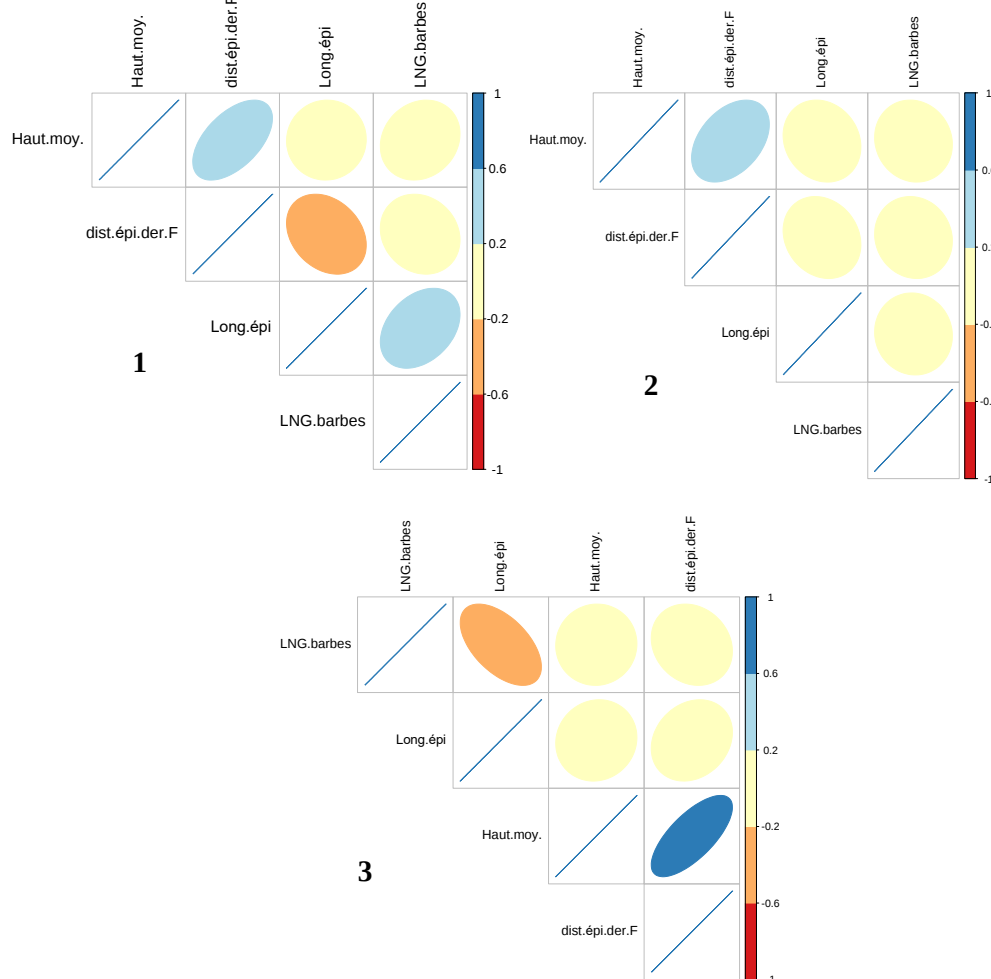


Figure 31 : Graphe de corrélation des paramètres morphologiques sur le site expérimental :
1 : Mauguio 2 : Tiffech 3 : Sidi Fredj.

Les résultats obtenus de la zone expérimentale de Tiffech (**Fig. 31.2**) ont montré qu'il existe une corrélation positive significative entre la hauteur de la tige et la distance épi-dernière feuille. L'étude des coefficients de corrélations entre les autres variables mesurées montre que la longueur des barbes, la longueur de l'épi et la distance feuille étandard-épi ne sont pas vraiment corrélées.

Le plot de corrélation de la zone expérimentale de Sidi-Fredj montre qu'il existe deux types de corrélation entre les paramètres morphologiques des 29 variétés (**Figure 31.3**) : une corrélation positive hautement significative entre la hauteur de la tige et la distance épi-feuille terminale et une corrélation négative significative entre la longueur des barbes et la longueur de l'épi.

2.3. Comparaison du comportement morphologique des génotypes

La comparaison du comportement des génotypes étudiés au niveau de chaque zone d'étude a montré une différence hautement significative (**Fig. 32**).

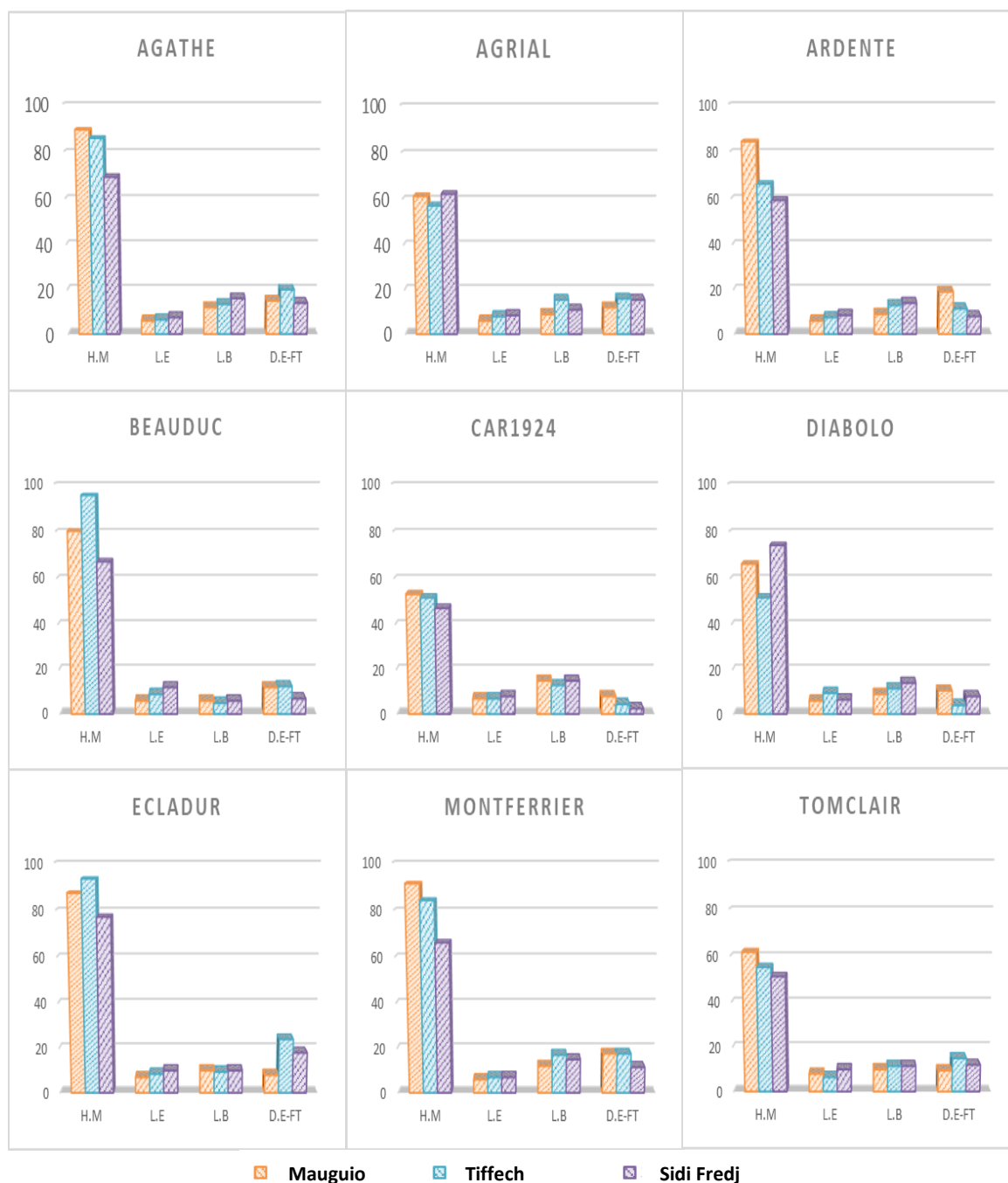


Figure 32 : Comparaison inter-variétale du comportement morphologique sous l'effet des conditions climatiques de chaque site expérimental

2.3.1. La hauteur moyenne de la tige :

Les variétés qui ont montrées une hauteur maximale dans les trois zones d'étude sont :

Mauguio: MONTFERRIER (91 cm), AGATHE (89 cm) et ECLADUR (87 cm); Tiffech: BEAUDUC (95 cm), ECLADUR (93 cm), AGATHE (85 cm) et MONTFERRIER (84 cm); Sidi Fredj : ECLADUR (77 cm) et DIABOLO (74 cm).

Par contre, les variétés les moins développées sont : KIEVLANKA, BRUMAIRE, ARMET et DAMOISOX, au niveau du site Sidi-Fredj.

2.3.2. La distance feuille étendard -épi :

Les variétés qui ont montré une distance feuille étendard-épi maximale sont : ECLADUR, AGATHE et MONTFERRIER (Tiffech); ARDENTE, MONTFERRIER et AGATHE (Mauguio) ; ECLADUR et AGRIAL (Sidi Fredj). Cependant, les variétés qui ont exhibées la distance épi-dernière feuille la plus courte ont été : CAR1924, KIEVLANKA, ARMET, DAMOISOX, TOMCLAIR800891 et DURGAMM (Sidi-Fredj)

2.3.3. La longueur d'épi :

Les variétés qui ont présenté un comportement positif face aux paramètres météorologiques des sites expérimentaux sont :

Sidi Fredj : BEAUDUC (12 cm), TOMCLAIR800891 (10 cm) et ECLADUR (10 cm) ; Tiffech : DIABOLO (9,5 cm), BEAUDUC (9 cm) et ARDENOIS918448 (9 cm) ; Mauguio : TOMCLAIR (8 cm) et MEGADUR (8 cm). Par contre, MONDUR, MONTFERRIER, NEPAL, ROMEO, TELEDUR, TOMCLAIR800891, BIODUR, cultivés à Mauguio, et JAGUAR800858, BRUMAIRE, DURENTAL, à Tiffech ont été les variétés les moins développées.

2.3.4. La longueur des barbes :

Les variétés qui ont eu une longueur des barbes remarquable sont : MONTFERRIER (17 cm) et AGRIAL (15,5 cm) à Tiffech ; CAR1924 (15 cm) à Mauguio ; ROMEO (17 cm), DURGAMM (17 cm) et AGATHE (16 cm) à Sidi-Fredj (17 cm). La longueur des barbes la plus faible a été enregistrée dans la variété de BEAUDUC : à Tiffech (5 cm) ; à Sidi-Fredj (6 cm) et à Mauguio (6 cm).

2.4. Discussion

Il apparaît que certaines variétés de blé ont répondu aux conditions climatiques des zones expérimentales en développant des tiges plus courtes. Cette adaptation permet de réduire la perte d'eau et de nutriments par la plante, tout en la protégeant davantage contre les dommages causés par le vent (**Blum, 1988**). Une tige plus courte favorise en effet une allocation accrue de l'énergie vers le développement des grains plutôt que vers la croissance en hauteur. De plus, le blé présentant une réduction de la longueur de la tige montre une meilleure résistance (**Bagga et al., 1970**).

Ces observations concordent avec nos résultats, où les conditions climatiques de Mauguio ont conduit à une augmentation de la hauteur moyenne des tiges et de la distance feuille étendard -épi, ce qui indique que les conditions climatiques précédant le stade d'épiaison n'ont pas été vraiment stressantes pour les variétés cultivées ; tandis qu'à Sidi-Fredj, cette hauteur était significativement réduite à cause de l'augmentation de la température moyenne surtout dans le stade de l'épiaison. Cela peut être considéré comme une forme d'adaptation pour esquiver les facteurs stressants de la zone d'étude.

Auriau (1978) a mis en évidence le rôle du col (pédoncule terminal) comme organe transitoire dans la translocation des assimilats vers l'épi, en établissant une corrélation positive entre la longueur du col de l'épi et le rendement. Les géotypes de blé présentant une plus grande distance entre la feuille-étendard et l'épi ont montré une consommation en eau plus élevée. Cependant, il convient de noter qu'une distance accrue peut accroître les besoins en eau d'irrigation. Selon nos résultats, la majorité des géotypes cultivés à Sidi-Fredj ont présenté une réduction de la distance feuille-étendard – épi par rapport aux autres zones étudiées.

Concernant l'adaptation de l'épi, certaines variétés de blé se sont adaptées au climat méditerranéen par le développement d'épis plus courts et plus épais. Cette adaptation permet de protéger les grains en cours de formation contre l'effet du rayonnement solaire et du vent, tout en limitant la perte d'eau par la plante. Selon **Jonard (1964)**, la longueur de l'épi constitue un caractère variétal très peu influencé par les variations environnementales. Toutefois, certaines variétés de blé se sont adaptées au climat par la formation d'épis plus courts. Cette adaptation contribue à réduire la perte d'eau et de nutriments, permettant ainsi à la plante de préserver ses ressources en période de sécheresse (**Pradhan et al., 2012**).

La longueur des barbes chez le blé peut accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau ainsi que la production de matière sèche durant la phase de maturation. Selon **Blottière (2003)** et **Nemmar (1980)**, la longueur des barbes contribue également à la limitation des pertes en eau. Ce paramètre morphologique semble être étroitement lié à la tolérance au déficit hydrique terminal, du moins chez le blé dur (**Salma, 2002**).

C'est ce que nous avons observé à Tiffech et à Sidi-Fredj, où la majorité des géotypes étudiés ont été fortement affectés en ce qui concerne la longueur des barbes. La diminution des précipitations et l'augmentation des températures au stade épiaison ont stimulé une augmentation significative de la longueur des barbes pour la plupart des géotypes cultivés à Sidi-Fredj. Ce phénomène peut être interprété comme un mécanisme adaptatif visant à minimiser les pertes en eau. Les barbes contribuent également au refroidissement des épis de blé durant le remplissage des grains en conditions chaudes (**Motzo & Giunta, 2002**).

Il existe quelques exceptions qu'il convient de mentionner ; les variétés ECLADUR et AGRIAL ont montré une adaptation positive présentée par le développement de la longueur de tige et de la distance feuille étendard - épi en comparaison avec les autres variétés cultivées à Sidi Fredj. En plus, leur longueur d'épi n'a pas été vraiment affectée négativement (ECLADUR parmi les plus longs épis dans les trois zones d'étude), outre le fait qu'ils possèdent des barbes réduites en longueur. L'ensemble de ces facteurs fait d'ECLADUR un géotype qui mérite d'être pris en considération pour sa capacité potentielle à développer des réponses adaptatives face aux stress environnementaux.

CHAPITRE II. EFFET DU STRESS HYDRIQUE SUR LA PHYSIOLOGIE DE QUELQUES GÉNOTYPES DE BLÉ DUR

Introduction

Au cours de la phase végétative, les plantes sont soumises à de multiples stress abiotiques et biotiques. Parmi ces contraintes, le stress hydrique représente l'un des facteurs les plus déterminants limitant la croissance, le développement et la productivité des plantes (**Seleiman et al., 2021 ; Rajanna et al., 2023**). Dans les régions arides et semi-arides, l'effet de la sécheresse sur le rendement et la qualité du blé excède de manière significative l'influence cumulée des autres facteurs de contrainte (**Langridge & Reynolds, 2021**).

Le stress hydrique induit chez les plantes des modifications morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires visant à atténuer les effets des contraintes abiotiques. Ces ajustements, associés à des altérations des processus métaboliques, se traduisent par une réduction significative du rendement en grains (**Zhao et al., 2024**).

La croissance, le développement et le rendement du blé sont fortement limités par la sécheresse, laquelle entraîne d'importantes pertes économiques à l'échelle mondiale (**Pena-Bautista et al., 2017**). Étant donné que les périodes de sécheresse devraient devenir plus fréquentes et plus sévères sous l'effet des changements climatiques accélérés, l'étude des réponses du blé à la sécheresse revêt une importance croissante (**Fang & Xiong, 2015**).

Les plantes peuvent ajuster leurs mécanismes physiologiques sous stress hydrique afin de s'adapter par le maintien d'une homéostasie métabolique. L'accumulation d'osmolytes et d'osmoprotecteurs influence à la fois le métabolisme primaire et secondaire (**Szablińska-Piernik et al., 2023**). Chez le blé, l'augmentation des concentrations de métabolites tels que les sucres solubles et les acides aminés est associée à la réponse à la sécheresse (**Fadoul et al., 2021**).

Les acides aminés libres constituent des substances osmotiques essentielles chez les plantes et jouent un rôle déterminant dans la résistance au stress hydrique (**Hammad & Ali, 2014**). Ainsi, la teneur en acides aminés peut être considérée comme un indicateur de la résistance des cultures au stress hydrique.

Sous l'effet de la sécheresse, des composés osmotiques tels que la proline peuvent être rapidement synthétisés par le métabolisme des acides aminés afin de réguler le potentiel osmotique cellulaire et de maintenir une croissance normale des cellules (**Ballantyne & Chamberlin, 1993**). Outre son rôle osmotique, la proline semble aussi avoir un rôle dans l'enroulement foliaire, constituant un mécanisme de limitation de la transpiration chez les céréales, qui serait lié à l'accumulation d'acide abscissique (ABA) au niveau des feuilles (**Lepoivre, 2003**).

Les sucres jouent un rôle central dans la croissance et le développement des plantes, en influençant l'ensemble des stades de leur cycle de vie (**Jeandet et al., 2022**). Le stress hydrique peut induire une accumulation de sucres solubles tels que le glucose, le fructose, le maltose et le saccharose (**Marček et al., 2019**). Ces sucres contribuent de manière déterminante au

maintien de l'homéostasie cellulaire des plantes, à l'augmentation de la résistance au stress et à la stabilisation des protéines (**Wang et al., 2022**).

La diminution du potentiel hydrique déclenche non seulement des mécanismes d'osmorégulation, mais induit également l'inhibition ou la synthèse de nouvelles protéines, contribuant ainsi à la protection de l'intégrité vitale de la cellule végétale (**Baker et al., 1988 ; Kermode & Bewley, 1989**).

L'objectif de ce travail est d'évaluer les différences d'effet de plusieurs régimes hydriques contraignants sur le comportement morpho-physiologique de génotypes de blé dur.

1. Matériel et méthodes

1.1. Matériel végétal

Le matériel biologique utilisé dans ce travail est le Blé dur *Triticum durum* Desf. Les génotypes proviennent de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) d'El Khroub, Constantine, Algérie. On a utilisé un ensemble de 30 variétés d'origine diverse classées dans le (**Tab. 10**)

Tableau 10 : Liste des variétés étudiées

Variétés ou Lignées	Symbole	Origine
Waha	V01	ICARDA (ITGC – Khroub 1976)
Bellaroi/4/Bcris/Bicum//llareta Inia/3/Dukem_12/...	V02	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Simeto/3/Sora/2*Plata_12//SRN_3/Nigris_4/5/Toska_26/...	V03	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Stj3//Bcr/Lks4/3/Ter-3/4/Mgn13/Aghrass2	V04	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Ouasloukos1/5/Azn1/4/BEZAIZSHF//SD19539/Waha/3/Gdr2	V05	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Ter1/3/Stj3//Bcr/Lks4/4/Aghrass1/3/Mrf1//Mrb16/Ru	V06	Sélection locale (ITGC – Khroub)
E90040/ MFOWL_13/ / LOTAIL_6/ 3/PROZANA/ARLIN...	V07	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Oss11/StjS5/ 5/Bicrederaa1/4/BEZAIZSHF//SD19539/Waha...	V08	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Langdon/Kucuk	V09	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Mohamed Ben Bachir/Chacan	V10	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Plata_7/ Ilbor_1 / / Somat_3 / 3/ Sora/ 2"Plata_12 / /Srn_3/...	V11	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Oss11/Stj5/5/Bicrederaa1/4/BezaizSHF//SD19539/Waha/3...	V12	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Bellaroi/ 4/ Bcris/ Bicum/ /11areta Inia/ 3/ Dukem_12/...	V13	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Hedba03/M 1084	V14	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Montpellier	V15	ITGC – France
Waha	V16	ICARDA (ITGC – Khroub 1976)
Cirta	V17	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Gta/Dur69...	V18	Sélection locale (ITGC – Khroub)
TOPDY_18/FOCHA_1//ALTAR84/3/AJAIA_12/...	V19	Sélection locale (ITGC – Khroub)
ARMENT/ /SRN_3/NIGRIS_4/3/CANEL0_9.1/4/TOSKA_26/.	V20	Sélection locale (ITGC – Khroub)
MERIDIANO/ 3/SOMAT_3/ PHAX_1 / /TILO_1/LOTUS_4/...	V21	Sélection locale (ITGC – Khroub)
GUAYACAN IN1A/ POMA_2 / /SNITAN/ 4/D86135/AC089/.	V22	Sélection locale (ITGC – Khroub)
GUANAY/HUALITA/10/PLATA_10/6/MQUE/4/USDA573/...	V23	Sélection locale (ITGC – Khroub)
STOTHALTAR84/ALD/3/THB/CEP7780//2*MUSK_4/...	V24	Sélection locale (ITGC – Khroub)
HAL1A_1//WARD/YAV79/3/RUDDY_2/4/DUKEM_1...	V25	Sélection locale (ITGC – Khroub)
SWAHEN_2/K1RKI_8/ /PROZANA_1 /4/ADAMAR 15...	V26	Sélection locale (ITGC – Khroub)
SILVER 14 / MOEWE/ / BISU_1/ PATKA_3/ 3/PORRON_4...	V27	Sélection locale (ITGC – Khroub)
GODRIN/GUTROS//DUKEM/3/THKNEE_11/4/DUKEM_1...	V28	Sélection locale (ITGC – Khroub)
CMH85.797/ /CADO/BOOMER_33/4/ARMENTHSRN_3/...	V29	Sélection locale (ITGC – Khroub)
GUAYACAN INIA/2*SNITAN	V30	Sélection locale (ITGC – Khroub)

1.2. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été conduite à l'université de Mohamed-Cherif Messaadia, Souk-Ahras.

Le semis est réalisé sous serre (conditions semi-contrôlées) dans des pots en plastique de 30 cm de diamètre. Les pots sont placés sur trois tables de 0,8m d'hauteur, à raison de dix grains par variété par pot selon le dispositif représenté dans la (Fig. 33)

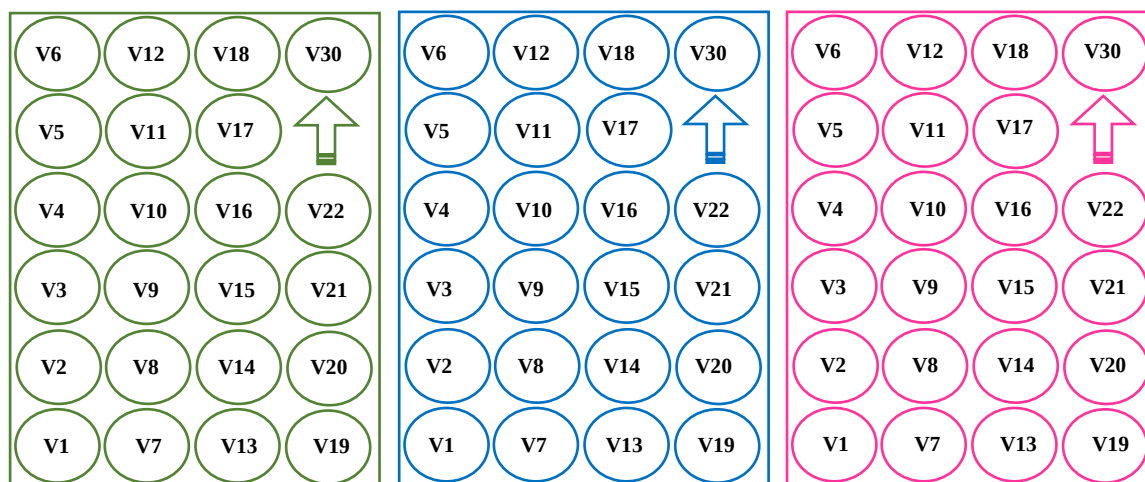


Figure 33 : Dispositif expérimental du semis **T** : témoin, **S1** : stress contrôlé, **S2** : stress intense

Les 90 pots (30 / traitement) ont été remplis d'un mélange composé de sable et de terreau (1 sable/2 terreau) avec une couche fine de gravier au fond des pots. Avant le semis, les pots ont été arrosés selon leur capacité au champ pour obtenir une humidité homogène.

Trois régimes hydriques ont été appliqués comme suit :

Le premier régime (T) : Sans stress hydrique, arrosé deux fois par semaine à raison de 600 ml par pot, appliqué du semis jusqu'au stade 5 feuilles.

Le deuxième régime (S1) : Stress hydrique contrôlé, arrosé deux fois par semaine à raison de 600 ml appliqué du semis jusqu'au stade 3 feuilles, suivis par un stress hydrique intense de 200 ml par pot jusqu'au stade 5 feuilles.

Le troisième régime (S2) : Stress hydrique intense prolongé, arrosé deux fois par semaine à raison de 250 ml par pot, appliqué du semis jusqu'au stade 5 feuilles.

1.3. Paramètres mesurés

Les paramètres morpho-physiologiques ont été mesurées au stade 5 feuilles

1.3.1. Teneur relative en eau (TRE)

Les feuilles sont coupées de la base et pesées pour déterminer leur poids frais (PF). Ensuite, elles sont mises dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée. Après 6 heures à l'obscurité, elles sont retirées des tubes à essai et séchées avec du papier buvard puis pesées pour obtenir leur poids turgide (PT). Ensuite, les feuilles sont placées dans une étuve à 85°C pendant 24 heures (Fig. 34). Enfin, les feuilles sont repesées pour obtenir leur poids sec (PS).

La TRE est obtenue par calcul à partir de la formule donnée par la méthode de **Barrs & Weatherly (1962)** :

$$TRE (\%) = (PF - PS) / (PT - PS) \times 100$$

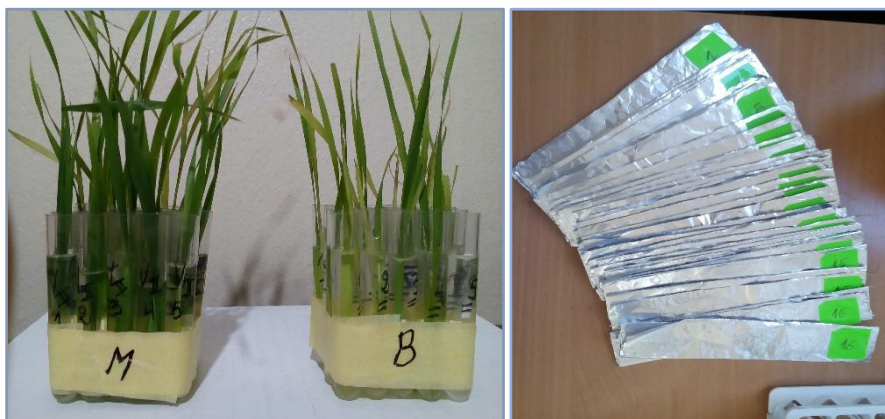


Figure 34 : Mesure de la teneur relative en eau

1.3.2. Surface foliaire (SF)

Trois feuilles étendards sont prélevées à la base. Ensuite, Les feuilles sont plaquées sur une feuille blanche utilisant une feuille transparente, puis elles sont photographiées avec une échelle de 1 cm (sans flash). Les photos sont ensuite insérées au logiciel **ImageJ** pour mesurer la surface foliaire (SF).

1.3.3. Poids spécifique foliaire (PSF)

Trois feuilles étendards sont prélevées à leur base. Ensuite, les feuilles sont séchées à 85°C pendant 48 heures et pesées pour obtenir le poids sec (PS). Le poids spécifique foliaire (PSF) est calculé à partir de la formule donnée par **Sarkar et al. (2003)** :

$$\text{PSF (mg/cm}^2\text{)} = \text{PS/SF}$$

1.3.4. Les sucres solubles

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

Réactif à l'anthrone : 0,2 gr d'anthrone + 100 ml d'acide sulfurique, et conservé dans un flacon sombre (doit être préparé 4 heures à l'avance) (**Fig. 35**)

L'extraction des sucres solubles est faite à froid, en mettant 100 mg de matière fraîche (prélevé dans le tiers médian de la feuille) dans des tubes à essai auxquels sont ajoutés 3 ml d'alcool (éthanol à 80%). Les tubes à essai sont bien fermés et placés à l'obscurité pendant 48h. La solution ensuite passe au bain-marie à 70°C pendant 30 minutes. Une fois l'alcool évaporé, on ajoute 20 ml d'eau distillée dans la totalité de l'extrait.

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

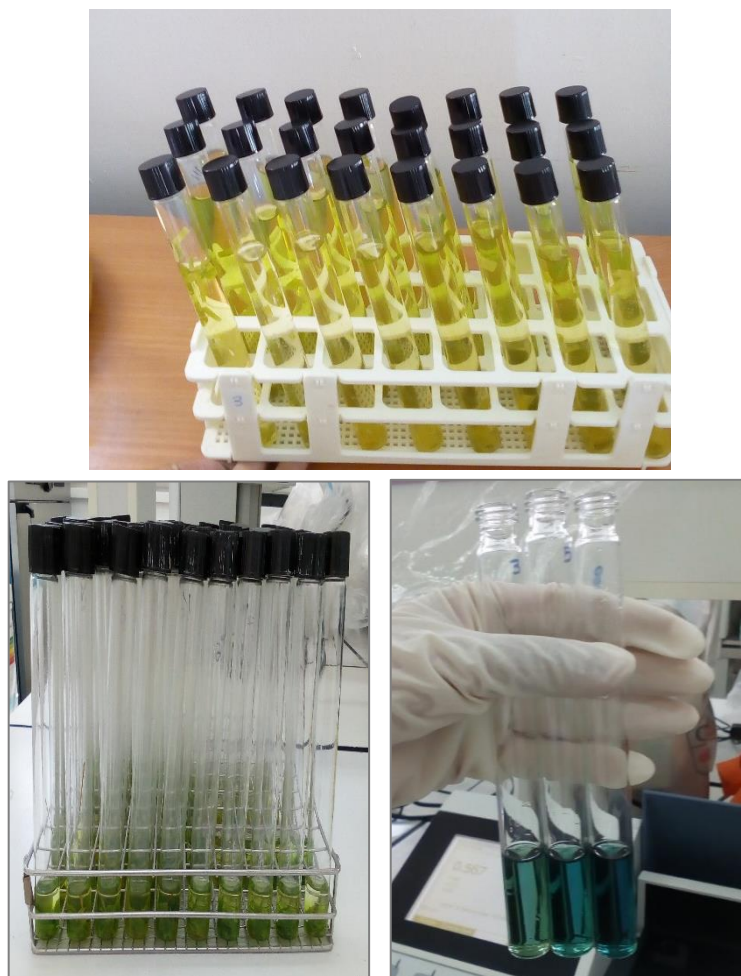


Figure 35 : Dosage des sucres solubles

Dans un tube à essai recouvert avec papier d'aluminium, 4 ml du réactif à l'anthrone sont ajoutés à 2 ml de la solution à analyser (extraits et étalons). Les tubes à essai sont maintenus pendant cette opération dans un bain de glace (réaction exothermique) ; Après agitation avec une tige de verre, ces tubes sont ensuite placés dans un bain-marie à 92°C pendant 8 min ; la solution vire alors légèrement au bleu vert. Pour l'arrêt de cette réaction, les tubes sont refroidis dans un bain de glace.

Après repos à l'obscurité pendant 30 minutes, la lecture est faite au spectrophotomètre (Longueur d'onde de 585 nm) réglé préalablement au zéro avec un blanc de gamme (2 ml d'éthanol à 80 % + 4 ml du réactif). Les valeurs obtenues sont reportées sur la gamme étalon.

1.3.5. L'accumulation de proline

La méthode utilisée pour doser la proline est celle de **Troll & Lindsley (1955)** modifiée par **Dreier & Goring (1974)** et ensuite par **Monneveux & Nemmar (1983)**.

100 mg de la matière végétale (tiers médian de la feuille) sont placés dans des tubes à essai. 2 ml de méthanol à 40 % sont ajoutés aux tubes. Le tout est chauffé au bain-marie à 85°C pendant

une heure. Les tubes sont recouverts de papier d'aluminium pendant le chauffage pour éviter la volatilisation de l'alcool.

Réactif : 120 ml d'eau distillée + 300 ml d'acide acétique + 80 ml d'acide orthophosphorique

Aux volumes de 1ml, prélevés des extraits et des tubes étalons, sont ajoutés 1ml d'acide acétique et 1ml de réactif + 25 mg de ninhydrine par tube (préparé d'avance pour faciliter la démarche). Le tout est porté à ébullition à 100°C pendant 30 minutes.

La solution vire au rouge, on refroidit (un quart d'heure) et on ajoute 5 ml de toluène : deux phases se séparent, la phase supérieure qui contient la proline est colorée en rouge et la phase inférieure sans proline reste transparente. Après avoir récupéré la phase supérieure, on ajoute du sulfate de sodium, à l'aide d'une spatule, pour éliminer l'eau qu'elle contient.

La lecture des densités optiques des échantillons (extraits et étalons) se fait à une longueur d'onde de 528 nm.

Le zéro du spectrophotomètre est réglé grâce au blanc de gamme, composé de 1ml de méthanol à 40 % + 1 ml d'acide acétique + 1ml du mélange modifié + 25 mg de ninhydrine. La quantification se fait d'après l'équation de la courbe d'étalonnage.

1.3.6. La teneur en protéines

Le dosage des protéines a été effectué selon la méthode **Bradford (1976)** qui consiste à réaliser une gamme d'étalonnage à partir d'une protéine standard, l'Albumine Sérum de Bœuf (BSA) titrant 1 mg/ml (1 mg BSA, 1 ml eau distillée).

Réactif de Bradford : 0,1g de BBC (Bleu brillant de Coomassie) + 50 ml d'éthanol à 95 %, puis le placer sur un agitateur pendant 2 heures. Rajouter ensuite 100 ml d'acide ortho phosphorique à 85 % et compléter à l'eau distillée jusqu'à 1 litre (le réactif doit être conservé dans un flacon sombre).

100 mg de la matière végétale est broyé dans un mortier avec 5 ml d'eau distillée, puis filtré et versé dans des tubes avec 5 autres contenants de l'eau distillée.

Dans des tubes à essai, on prélève 0,2 ml de l'extrait + 1.6 ml d'eau distillée, 5 minutes avant la lecture on ajoute 0,2 ml du réactif de Bradford. Le dosage se fait par lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde 595 nm après l'étalonnage de l'appareil par la solution témoin (1,8 ml d'eau distillée + 0,2 ml du réactif de Bradford).

La teneur en protéines des échantillons est déterminée à l'aide d'une courbe standard faite à partir de concentrations connues de BSA.

1.4. Analyse des données

La variation de comportement des génotypes a fait l'objet d'une descriptive comparative entre les variétés sous le même régime hydrique, et d'une analyse multivariée pour déterminer les différences entre l'effet des trois traitements hydriques sur le comportement physiologique des génotypes.

2. Résultats et discussion

2.1. Comparaison du comportement physiologique des génotypes

2.1.1. Teneur relative en eau (TRE)

Les génotypes qui maintiennent leur teneur relative en eau (TRE) élevée lors du stress hydrique sont les variétés qui ont un taux d'adaptation élevé (les plus tolérants et les plus productifs). L'analyse de la teneur relative en eau (TRE) des feuilles a révélé une forte variabilité entre les différentes variétés de Blé dur étudiées (**Fig. 36**).

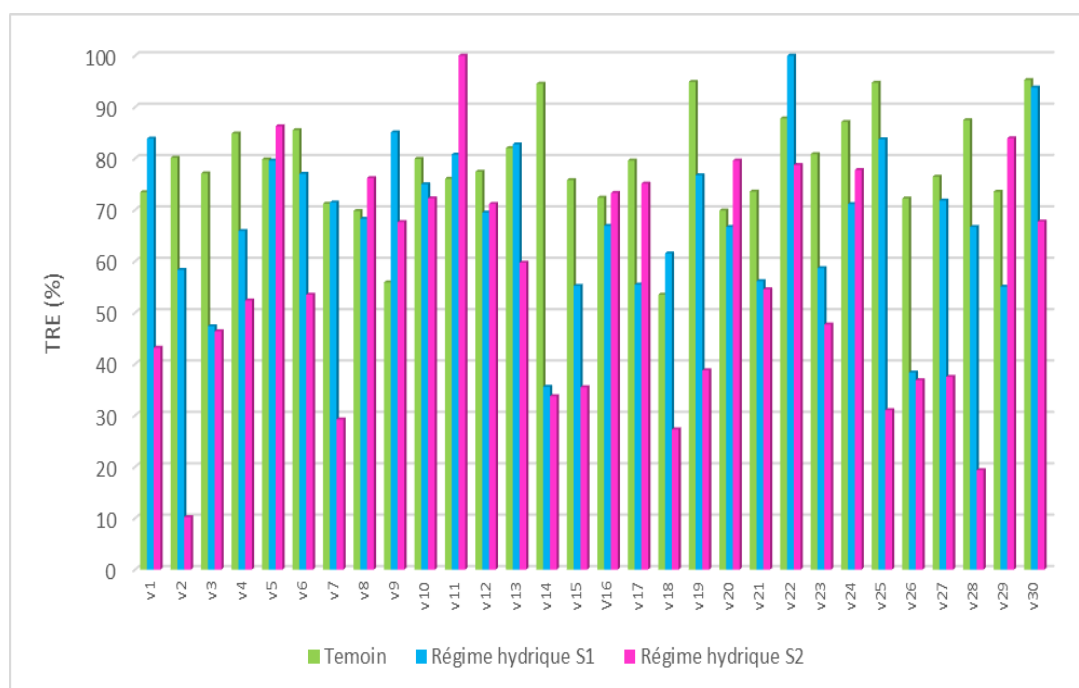


Figure 36 : Teneur relative en eau sous l'effet du stress hydrique

🚩 Régime hydrique S1

Certaines variétés, telles que v22, v30, v9, v1 et v25, se distinguent par une TRE élevée, indiquant une meilleure capacité de rétention hydrique et, par conséquent, une tolérance plus marquée au déficit en eau. À l'inverse, les variétés v14, v26, v3, v29 et v15 présentent une TRE réduite, suggérant une sensibilité accrue aux conditions de stress hydrique.

Par ailleurs, la variété v22 a montré une tolérance exceptionnelle au régime hydrique S1, avec une TRE maintenue à 100 %, ce qui témoigne d'un mécanisme de résistance particulièrement efficace.

D'autres génotypes, notamment v1, v9, v11, v13 et v18, ont également affiché une adaptation remarquable sous S1, en maintenant ou améliorant les valeurs de TRE par rapport à celles du témoin. En revanche, certaines variétés, telles que v14, v2 et v3, se sont révélées être les plus négativement affectées par le régime S1, enregistrant une diminution importante de la TRE.

🚩 Régime hydrique S2

Les variétés v11, v5, v29, v20, v22, v24 et v8 ont présenté une TRE élevée, traduisant une meilleure capacité de maintien de l'état hydrique en condition de stress. En revanche, les

variétés v2, v28, v18, v7, v25, v14, v15 et v26 ont montré une TRE diminuée, ce qui reflète une sensibilité plus importante au déficit hydrique.

La variété **v1** s'est distinguée par une tolérance exceptionnelle au régime S2, en conservant une TRE de 100 %, ce qui souligne un mécanisme de régulation particulièrement efficace. Par ailleurs, plusieurs génotypes, notamment v8, v9, v11, v16, v20 et v29, ont manifesté une adaptation notable au stress S2, maintenant une TRE relativement stable par rapport au témoin.

Toutefois, la majorité des variétés ont été fortement affectées négativement par le régime S2, en particulier v2, v25, v14, v15, v19, v23 et v28, qui ont enregistré les réductions les plus marquées de TRE.

2.1.2. Surface foliaire (SF)

La diminution de la surface de la feuille sous stress hydrique est considérée comme une réaction de résistance moyenne ou d'adaptation au manque d'eau. L'analyse de la surface foliaire (SF) a révélé une hétérogénéité notable entre les différentes variétés testées (**Fig. 37**)

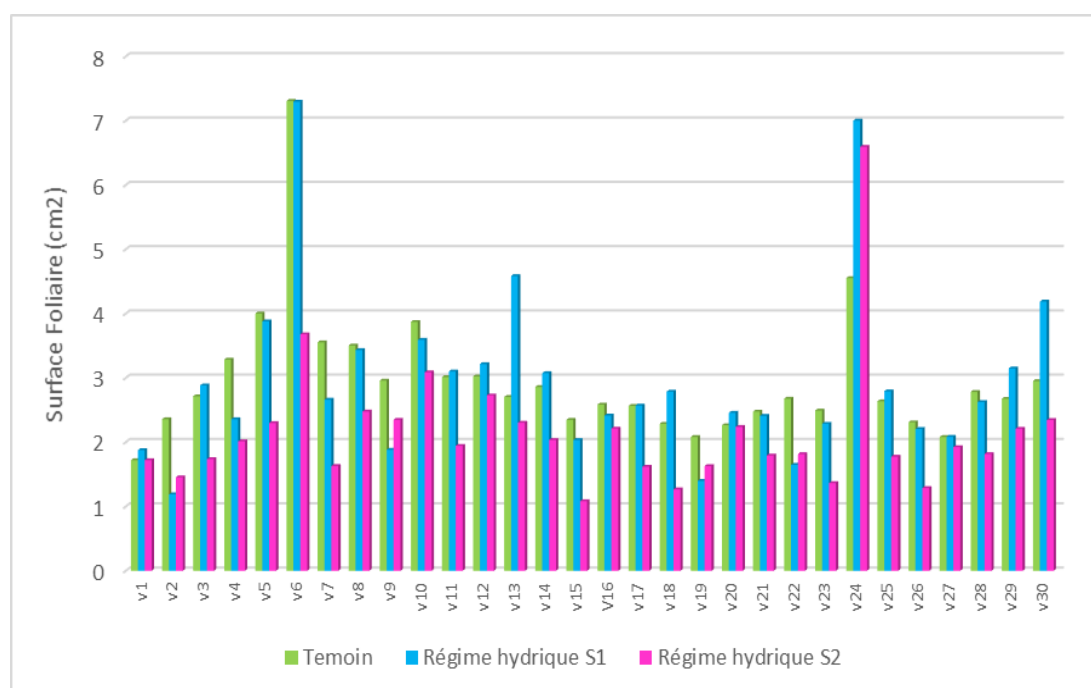


Figure 37 : Surface foliaire sous l'effet du stress hydrique

🚦 Régime hydrique S1

Les variétés v6, v24, v13 et v30 se distinguent par une surface foliaire élevée, ce qui constitue un avantage physiologique puisqu'une grande surface photosynthétique favorise l'accumulation de biomasse et améliore potentiellement la productivité. À l'inverse, un groupe de variétés comprenant v2, v19, v22 et v9 a présenté une réduction marquée de la surface foliaire, traduisant une sensibilité accrue au déficit hydrique.

En ce qui concerne le comportement sous le régime hydrique S1, certaines variétés, notamment v13, v30, v18, v29 et surtout v24, ont démontré une capacité d'adaptation remarquable, caractérisée par une augmentation ou un maintien de leur surface foliaire malgré la contrainte

hydrique. Cette aptitude leur confère un avantage compétitif dans des conditions de sécheresse modérée.

À l'opposé, les variétés v2 et v22 se sont révélées les plus affectées par le régime S1, avec une réduction significative de la surface foliaire, témoignant de leur vulnérabilité au stress hydrique. Certaines variétés comme v6, v8, v17 et v27 n'ont pratiquement pas été affectées par le régime hydrique S1, traduisant une stabilité morphologique face aux conditions limitantes.

Régime hydrique S2

L'étude de la surface foliaire (SF) sous le régime hydrique S2 a révélé une différenciation claire entre les variétés. Certaines, telles que v24, présente une surface foliaire élevée, traduisant une meilleure capacité photosynthétique en conditions défavorables. À l'opposé, d'autres variétés comme v15, v18, v26, v23 et v2 ont montré une réduction marquée de la SF, reflétant une sensibilité plus importante à ce régime hydrique.

Concernant l'adaptation, la variété v24 s'est distinguée par une réponse remarquable au régime hydrique S2, réussissant à maintenir, voire améliorer, sa surface foliaire malgré le stress appliqué.

La majorité des variétés ont cependant été fortement affectées par le régime hydrique S2, en particulier v6, v5, v7 et v26, ce qui témoigne d'une réduction significative de leur capacité de développement foliaire et donc de leur potentiel photosynthétique.

À l'inverse, certaines variétés comme v1, v20 et v27 se sont montrées stables, n'affichant pas de variations notables de surface foliaire entre les conditions témoins et stressées. Cette résilience morphologique constitue un indicateur positif de leur aptitude à tolérer les contraintes hydriques sévères.

Dans l'ensemble, ces résultats soulignent que si le régime S2 exerce une pression sélective importante, certaines variétés comme v24, v1 et v20 possèdent un potentiel d'adaptation particulièrement intéressant, ce qui en fait des candidats prometteurs pour des programmes de sélection orientés vers la tolérance à la sécheresse.

2.1.3. Poids spécifique foliaire (PSF)

Le poids spécifique foliaire (PSF) constitue un paramètre morpho-physiologique essentiel dans l'étude de l'adaptation des plantes aux conditions de déficit hydrique. L'évaluation du Poids Spécifique Foliaire (PSF) a révélé une variabilité importante entre les génotypes étudiés (**Fig. 38**)

Régime hydrique S1

Sous l'effet du régime hydrique S1, plusieurs variétés ont montré une aptitude remarquable d'adaptation, caractérisée par une augmentation significative du PSF. Il s'agit notamment de v2, v3 et v18 qui semblent compenser le déficit hydrique par un renforcement de la densité foliaire. Ce mécanisme peut constituer une stratégie adaptative permettant de maintenir l'intégrité physiologique et d'optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

À l'opposé, certaines variétés telles que v19, v20, v23 et v7 se sont révélées fortement affectées par le stress hydrique S1, avec une diminution notable de leur PSF. Cette sensibilité pourrait

limiter leur capacité de tolérance à la sécheresse et réduire leur productivité en conditions de déficit hydrique prolongé.

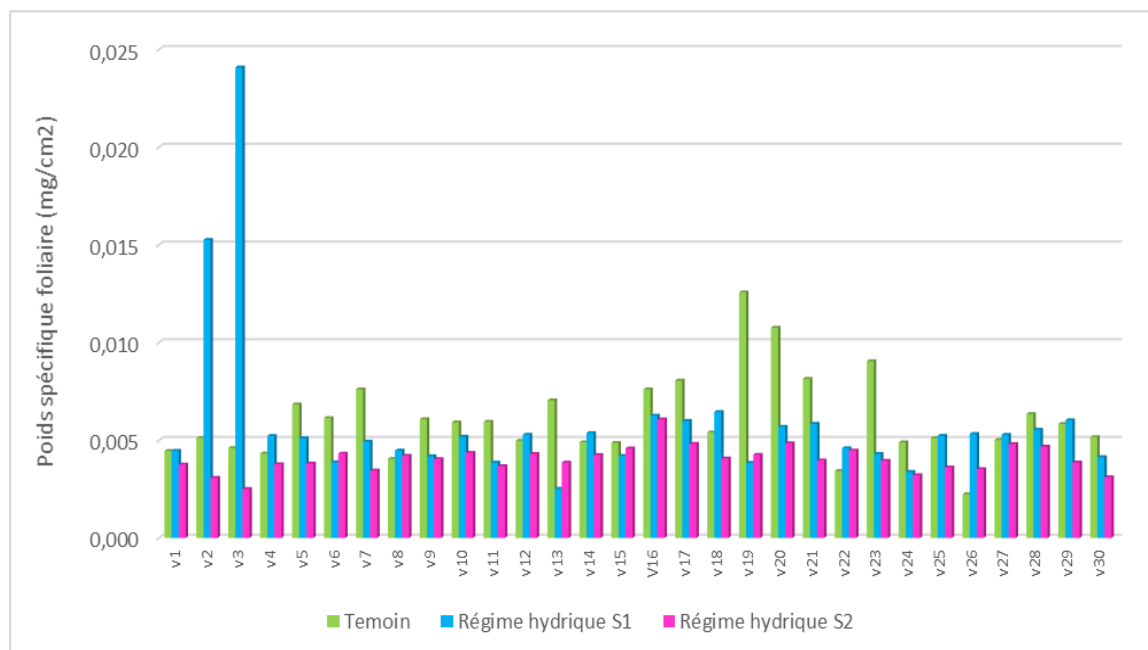


Figure 38 : Poids spécifique foliaire sous l'effet du stress hydrique

🚧 Régime hydrique S2

Dans le cadre du régime hydrique S2, deux variétés en particulier, v22 et v26, se sont distinguées par une adaptation remarquable, manifestée par une augmentation du PSF. Ce comportement suggère une capacité de résistance à la sécheresse par le biais d'un renforcement foliaire, permettant d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et la résilience physiologique.

Cependant, la majorité des variétés étudiées ont été affectées négativement par le régime hydrique S2, montrant une baisse significative de leur PSF. Cette diminution reflète une sensibilité accrue au déficit hydrique sévère, qui pourrait compromettre le rendement et la tolérance globale à la sécheresse. Seules quelques exceptions ont réussi à maintenir des valeurs stables ou à améliorer leur performance, ce qui confirme l'existence d'une forte variabilité génétique dans la réponse au stress hydrique.

2.1.4. Les sucres solubles

L'analyse de l'accumulation en sucres solubles chez les différentes variétés de blé dur révèle une hétérogénéité marquée dans leurs réponses physiologiques au stress hydrique (**Fig. 39**).

🚧 Régime hydrique S1

L'analyse de l'accumulation en sucres solubles chez les différentes variétés étudiées met en évidence des contrastes marqués. Certaines variétés, telles que v1, v22 et v19 se distinguent par une forte capacité d'accumulation en sucres solubles, ce qui peut constituer un avantage physiologique face aux contraintes hydriques. À l'inverse, les variétés v6, v26 et v29 présentent un taux réduit d'accumulation, traduisant une sensibilité plus marquée ou une moindre aptitude à mobiliser ce mécanisme de tolérance.

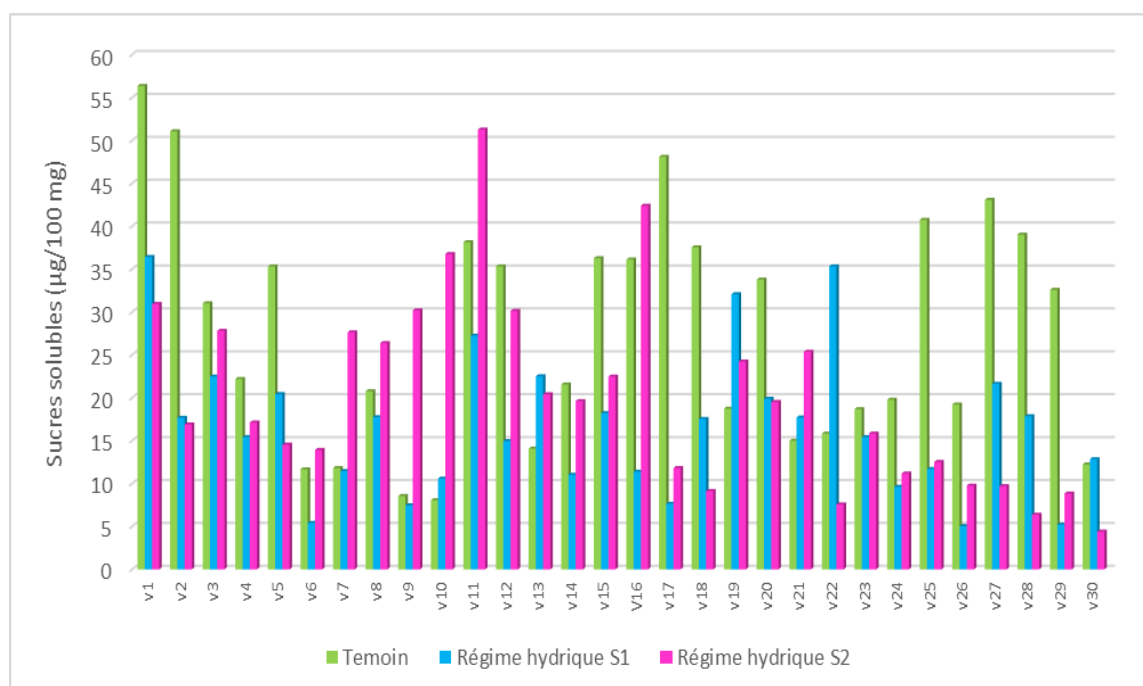


Figure 39 : Teneur en sucres solubles sous l'effet du stress hydrique

L'évaluation selon le régime hydrique S1 révèle également une différenciation notable. En effet, plusieurs génotypes, notamment v13, v19, v22 et v21, montrent une adaptation positive, caractérisée par une augmentation de l'accumulation en sucres solubles sous stress hydrique par rapport au témoin.

En revanche, certaines variétés, telles que v1, v2, v17 et v25, apparaissent comme les plus affectées par le régime hydrique S1, avec une diminution significative de l'accumulation en sucres solubles par rapport au témoin.

Régime hydrique S2

Certaines variétés, telles que v11, v16 et v10, se distinguent par une forte capacité d'accumulation, ce qui traduit une activation efficace des mécanismes osmotiques de tolérance au stress. À l'opposé, les génotypes v28, v30 et v22 présentent un taux réduit d'accumulation, traduisant une moindre efficacité de leur réponse physiologique.

Par ailleurs, plusieurs variétés, notamment v7, v8, v9, v10, v11 et v21, ont démontré une adaptation positive au régime S2, caractérisée par une augmentation de l'accumulation en sucres solubles sous stress par rapport au témoin. Cette réponse souligne leur capacité à maintenir une meilleure homéostasie cellulaire et à limiter les effets négatifs de la contrainte hydrique.

En revanche, certaines variétés comme v17, v18, v27, v28 et v29 se révèlent être les plus affectées par le régime hydrique S2, avec une diminution marquée de l'accumulation en sucres solubles. Ce comportement met en évidence leur vulnérabilité et suggère une absence ou une faible activation des mécanismes de protection liés aux sucres solubles.

2.1.5. L'accumulation de proline :

La proline (Acide aminés), un osmoprotecteur qui indique l'aptitude des génotypes à adapté aux différents stress environnementaux. L'accumulation de proline libre est beaucoup plus forte chez les variétés résistantes que chez les variétés sensibles (**Fig. 40**).

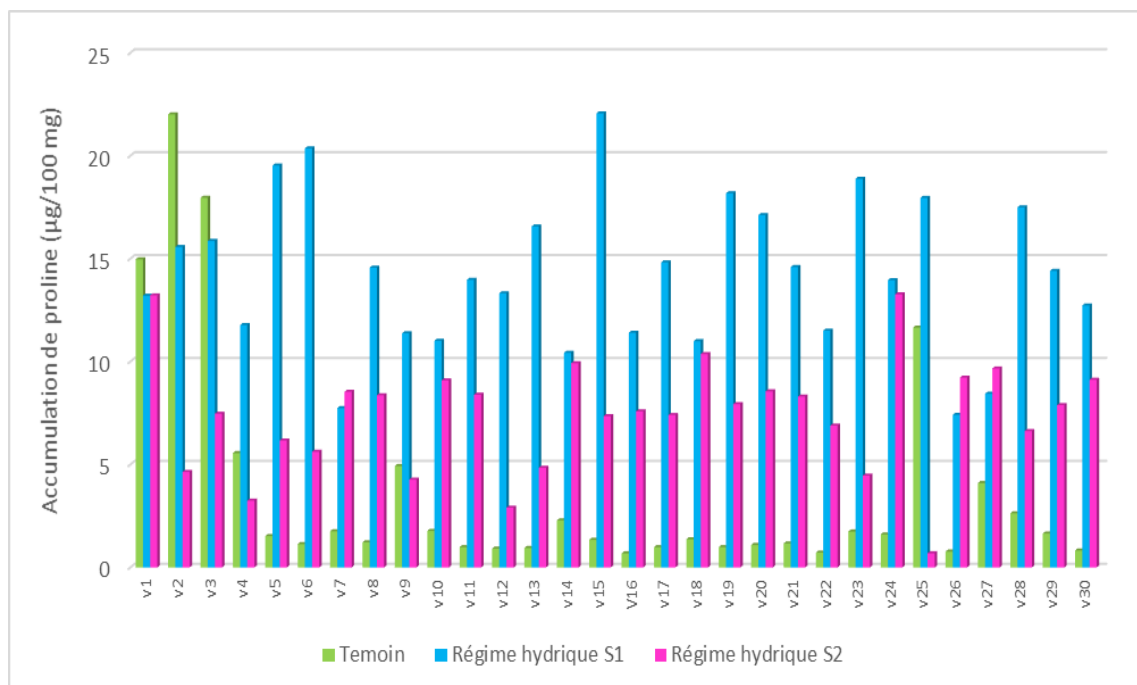


Figure 40 : Accumulation de proline sous l'effet du stress hydrique

La comparaison des résultats des deux régimes hydrique S1 et S2 avec le témoin T montre que S1 est le régime hydrique le plus stressant pour toutes les variétés sauf quelque exception (v1, v2 et v3). Le traitement avec le régime hydrique S1 a provoqué une accumulation de proline très remarquable par rapport à celle du régime hydrique S2

🚦 Régime hydrique S1

Les variétés v15, v6, v5, v23 et v19, se distinguent par un taux particulièrement élevé de proline, ce qui reflète leur capacité à activer efficacement des mécanismes de défense osmotique face au déficit hydrique. À l'opposé, des variétés comme v26, v7 et v27 présentent une diminution significative de la teneur en proline, traduisant une sensibilité accrue au stress hydrique.

De manière générale, la majorité des génotypes évalués ont démontré une aptitude d'adaptation remarquable, caractérisée par une accumulation de proline sous le régime hydrique S1 significativement supérieure à celle observée au témoin. Cette réponse adaptative souligne le rôle clé de la proline en tant qu'osmoprotecteur, contribuant au maintien de l'intégrité cellulaire et à l'amélioration de la tolérance des plantes face aux conditions de sécheresse. Quelques exceptions toutefois confirment la diversité génétique existante et mettent en évidence l'importance d'identifier les variétés les plus performantes pour la sélection.

🚦 Régime hydrique S2

L'évaluation de la teneur en proline chez les différentes variétés de blé dur a permis de distinguer plusieurs profils adaptatifs. Certaines variétés, telles que v24, v1, v18 et v14, se

caractérisent par un taux particulièrement élevé de proline, confirmant leur capacité à mobiliser ce métabolite osmorégulateur en réponse au stress hydrique. À l'inverse, des variétés comme v25, v12, v4, v9 et v23 présentent une teneur réduite en proline, ce qui suggère une aptitude limitée à activer ce mécanisme de tolérance.

En outre, plusieurs génotypes, notamment v25, v2, v4 et v9, n'ont pas montré d'accumulation significative de proline sous le régime hydrique S2, traduisant une variabilité génétique dans la réponse au stress. Cependant, la majorité des variétés testées ont été favorablement affectées par le régime hydrique S2, en présentant une accumulation accrue de proline, confirmant ainsi le rôle central de cet acide aminé dans l'adaptation physiologique au déficit hydrique.

2.1.6. La teneur en protéines

L'analyse de la teneur en protéines chez les différentes variétés de blé dur met en évidence une forte variabilité génétique face aux régimes hydriques appliqués (**Fig. 41**).

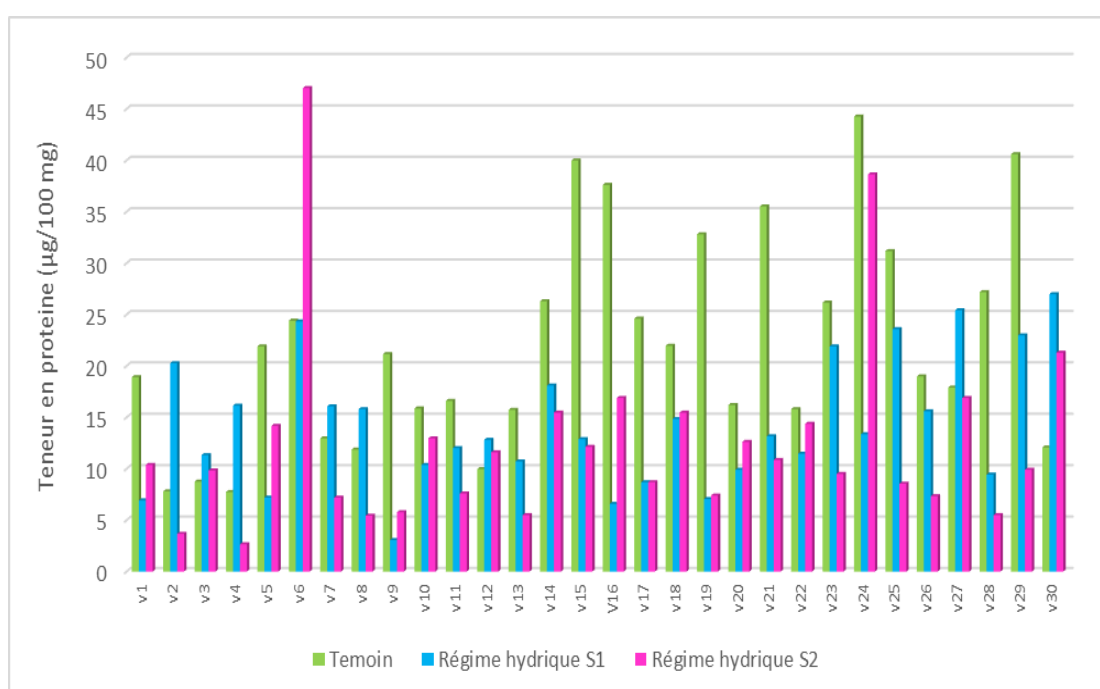


Figure 41 : Teneur en protéine sous l'effet du stress hydrique

🚦 Régime hydrique S1

Certaines variétés, telles que v30, v27, v6, v25, v29 et v23, présentent une teneur élevée en protéines, ce qui constitue un atout majeur pour la qualité technologique et nutritionnelle du grain. En revanche, d'autres variétés comme v9, v16, v1, v19 et v5 montrent une diminution notable de leur teneur en protéines, traduisant une plus grande sensibilité au stress hydrique.

Concernant la réponse spécifique au régime hydrique S1, plusieurs variétés, notamment v2, v4, v6, v12, v27 et v30, ont démontré une adaptation remarquable, en maintenant des niveaux protéiques relativement stables voire améliorés par rapport au témoin. À l'opposé, un groupe important de variétés, incluant v1, v5, v9, v15, v16, v17, v19, v21, v24 et v29, s'est révélé fortement affecté par S1, avec une baisse significative de la teneur en protéines.

🚦 Régime hydrique S2

Les variétés v6, v24, v30, v16 et v27, se caractérisent par une teneur élevée en protéines, traduisant un potentiel intéressant sur le plan technologique et nutritionnel. À l'inverse, des variétés comme v4, v2, v8, v13 et v28 montrent une diminution significative de leur teneur en protéines, indiquant une sensibilité plus marquée aux conditions de culture.

Sous l'effet du régime hydrique S2, certaines variétés, notamment v6, v12, v24, v30 et v22, ont démontré une capacité d'adaptation en maintenant un niveau protéique satisfaisant par rapport au témoin. En revanche, un ensemble important de génotypes, incluant v7, v8, v9, v11, v13, v15, v16, v17, v19, v21, v23, v25, v26, v28 et v29, s'est révélé fortement affecté par S2, avec une baisse notable de la teneur en protéines.

2.2. Comparaison entre les régimes hydriques

2.2.1. Les sucres solubles

La figure (Fig. 42) présente l'effet de trois régimes hydriques (témoin, stress 1 et stress 2) sur la teneur en sucres solubles ($\mu\text{g}/100\text{ mg}$) exprimée sous forme de diagrammes en boîte.

La concentration en sucres solubles est la plus élevée en milieu favorable avec une médiane de $27\text{ }\mu\text{g}/100\text{ mg}$ et une variabilité relativement importante, ce qui traduit un maintien de réserves glucidiques en conditions normales. Le régime stress S1 entraîne une diminution notable de la teneur en sucres solubles, la médiane chutant autour de $16\text{ }\mu\text{g}/100\text{ mg}$, avec une dispersion plus faible mais la présence de quelques valeurs aberrantes supérieures à $30\text{ }\mu\text{g}/100\text{ mg}$. Le régime stress S2 présente une médiane intermédiaire, mais se distingue par une très grande variabilité allant de valeurs proches de zéro jusqu'à plus de $50\text{ }\mu\text{g}/100\text{ mg}$, suggérant une réponse hétérogène selon les échantillons ou génotypes.



Figure 42 : Boxplot de la concentration en sucres solubles évalué chez 30 génotypes de blé soumis à trois régimes hydriques

2.2.2. La teneur en protéine

L'impact de trois régimes hydriques sur la teneur en protéines ($\mu\text{g}/100\text{ mg}$) est présenté sur la (Fig. 43). En condition témoin, la concentration en protéines présente une médiane de 21 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$, accompagnée d'une variabilité relativement importante (entre 8 et 40 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$) et de la présence d'une valeur extrême dépassant 40 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$.

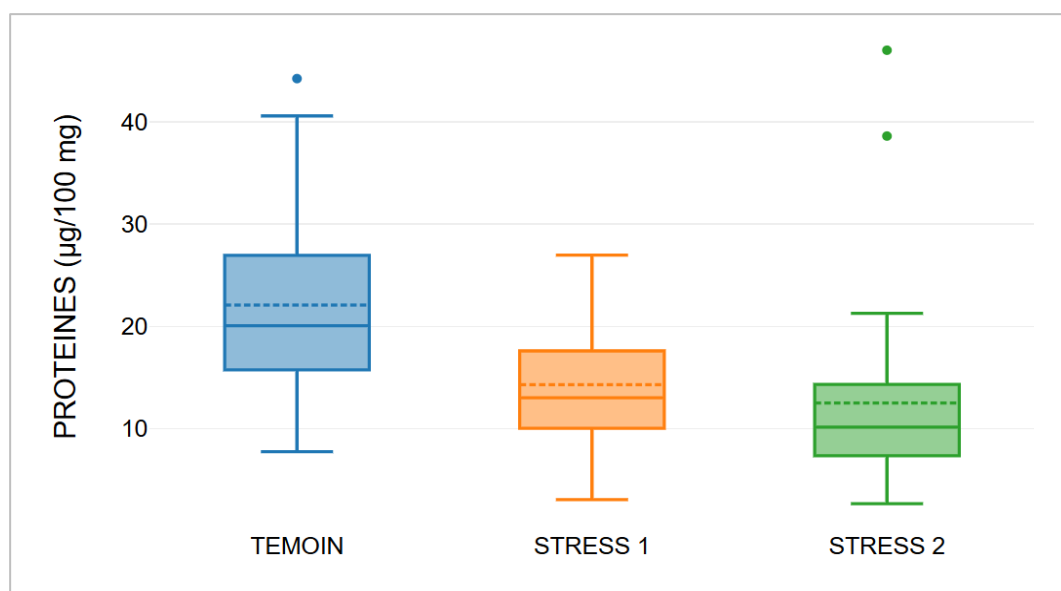


Figure 43 : Boxplot de la teneur de protéine évalué chez 30 génotypes de blé soumis à trois régimes hydriques

Sous le stress hydrique contrôlé, une diminution notable de la teneur en protéines est observée, avec une médiane réduite à environ 14 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$ et une dispersion plus restreinte que celle du témoin. Le régime stressant S2 induit la réduction la plus prononcée, caractérisée par une médiane proche de 11 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$ et une variabilité limitée, bien que quelques valeurs atypiques plus élevées (39–42 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$) persistent.

2.2.3. L'accumulation en proline

La figure 44 montre la différence de l'effet des trois régimes hydriques (témoin, stress 1 et stress 2) sur l'accumulation en proline ($\mu\text{g}/100\text{ mg}$). En condition témoin, la médiane est faible (1,5 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$), avec une dispersion réduite et quelques valeurs atypiques plus élevées. Sous stress 1, la teneur en proline augmente fortement, avec une médiane avoisinante 14 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$ et une distribution étendue (7 à 20+ $\mu\text{g}/100\text{ mg}$), traduisant une nette induction de cet osmolyte en réponse au déficit hydrique. Le régime hydrique stress 2 présente une médiane plus modérée (7 $\mu\text{g}/100\text{ mg}$), avec une variabilité intermédiaire, suggérant une accumulation de proline moins marquée que sous le régime stress 1.

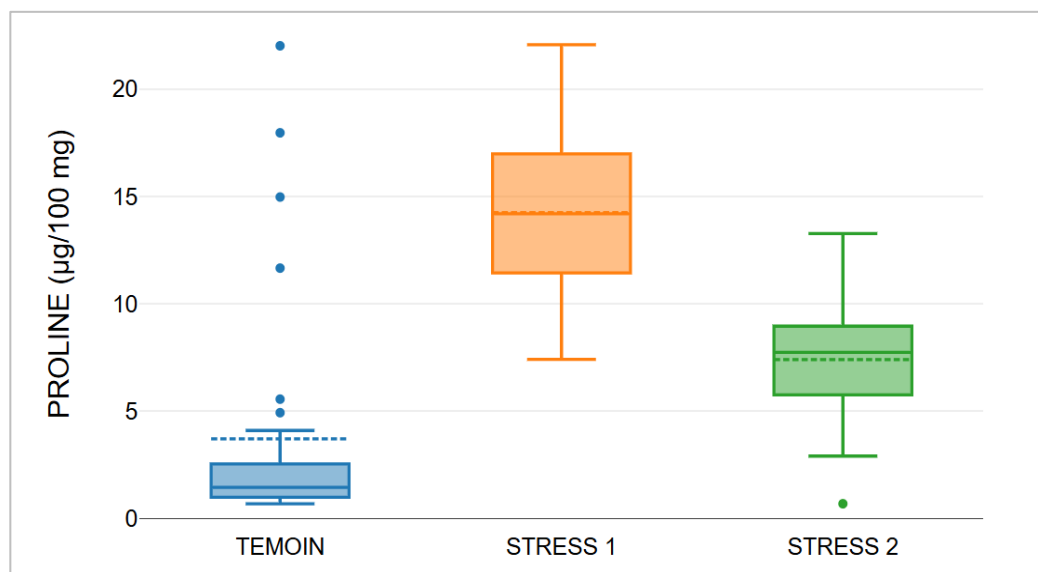


Figure 44 : Boxplot de l'accumulation en proline évalué chez 30 génotypes de blé soumis à trois régimes hydriques

2.3. Discussion

Aux stades de germination et de plantule, la sécheresse induit diverses modifications morphologique et physiologiques, provoquant la déshydratation du protoplasme végétal et des désordres métaboliques qui compromettent la croissance normale des plantes (**Lu et al., 2022**).

En conditions de sécheresse, les plantes peuvent tenter de s'adapter en modifiant leur structure morphologique ainsi que leurs fonctions physiologiques et biochimiques afin de maintenir le développement des organes. Cette adaptation se traduit notamment par une réduction de la surface foliaire et une intensification de l'activité racinaire (**Duan et al., 2017**).

L'analyse comparative de la teneur relative en eau (TRE) a permis de mettre en évidence des différences marquées de comportement entre les variétés de blé dur soumises aux deux régimes hydriques. Certaines variétés, telles que v2, v14, v26 et v28, se sont révélées être les plus sensibles, en présentant des réductions notables de TRE sous l'effet combiné des stress hydriques S1 et S2. Cette sensibilité traduit une faible capacité de maintien de l'équilibre hydrique en conditions de déficit, ce qui pourrait limiter leur adaptation dans des environnements soumis à une variabilité climatique accrue.

À l'inverse, plusieurs génotypes ont manifesté une réponse physiologique positive, avec une TRE sous stress significativement supérieure à celle mesurée au témoin. Sous le traitement des deux régimes hydriques S1 et S2, les génotypes v11, v9 et v5 se sont distingués par leur résilience et leur capacité d'adaptation face à des conditions plus sévères de stress.

Des études antérieures rapportent que la germination ainsi que la croissance des racines et des feuilles des génotypes de blé sont fortement affectées par le stress hydrique, l'ampleur de ces effets dépendant du niveau de tolérance à la sécheresse propre à chaque génotype (**Duan et al., 2017**).

Concernant la surface foliaire, la variété v24 a présenté un développement foliaire très remarquable par rapport au témoin, et ce, sous l'effet des deux régimes hydriques stressants. Cette réponse traduit non seulement une capacité d'adaptation élevée, mais également un mécanisme de compensation physiologique lui permettant de maintenir, voire d'améliorer, sa croissance malgré la contrainte hydrique. D'autre part, la variété v27 s'est distinguée par sa stabilité remarquable, puisqu'elle n'a montré aucune variation significative de ses paramètres morpho-physiologiques sous l'effet des deux régimes hydriques. Cette absence d'impact met en évidence une tolérance intrinsèque au stress, caractérisée par un équilibre entre conservation et maintien de la performance en condition limitante.

Ainsi, le génotype v24 traduit une adaptation active par stimulation de la croissance, tandis que v27 illustre une résilience stable fondée sur le maintien des performances, deux stratégies complémentaires et valorisables en sélection de variétés tolérantes à la sécheresse.

Un Poids Spécifique Foliaire élevé reflète généralement des feuilles plus épaisses et plus denses, dotées d'une surface foliaire réduite par unité de biomasse. Cette caractéristique présente plusieurs avantages en situation de stress hydrique.

L'évaluation du Poids Spécifique Foliaire sous les deux régimes hydriques a permis de mettre en évidence des différences marquées entre les génotypes étudiés. Un groupe important de variétés, notamment v19, v20, v23, v7, v13 et v21, s'est révélé être les plus affectés par les deux régimes hydriques S1 et S2, avec une diminution significative du PSF. Cette baisse traduit une sensibilité accrue au déficit hydrique, qui se traduit par une réduction de la densité foliaire et une moindre efficacité d'utilisation des ressources, compromettant ainsi la tolérance globale à la sécheresse.

À l'opposé, certaines variétés se sont démarquées par leur capacité d'adaptation remarquable, en particulier v22 et v26, qui ont réussi à maintenir, voire améliorer, leur PSF dans les deux conditions de stress hydrique. Cette stabilité témoigne d'un mécanisme de résilience physiologique leur permettant de préserver l'intégrité foliaire et de mieux supporter les contraintes de sécheresse.

La sécheresse peut également induire l'accumulation de sucres solubles (**Saeidia et al., 2017**). Ces composés préservent la structure des protéines fonctionnelles et structurales de la cellule en favorisant la stabilisation des cellules face à la perte d'eau (**Rodríguez-Calcerrada et al., 2011**). De plus, plusieurs osmolytes, dont le saccharose, le glucose et le fructose, peuvent servir de précurseurs métaboliques dans diverses voies biosynthétiques et agir comme molécules de signalisation régulant l'expression de nombreux gènes impliqués dans différents processus métaboliques (**Tran et al., 2007**).

Nos résultats ont montré que plusieurs variétés, notamment v10, v9, v13, v19 et v21, montrent une capacité d'adaptation remarquable aux deux régimes hydriques (S1 et S2) par rapport au témoin, ce qui confirme leur plasticité phénotypique et leur potentiel de stabilité face à des environnements contrastés.

Certaines variétés présentent des réponses différentielles selon le régime hydrique appliqué : par exemple, v11, v16 et v8 subissent un effet négatif sous S1 mais s'adaptent favorablement sous S2, tandis que v13 et v19 et v22 montrent une adaptation sous S1 mais une sensibilité

marquée sous S2. Ces observations confirment que la réponse en termes d'accumulation des sucres solubles est fortement dépendante du génotype, et qu'elle constitue un critère pertinent pour évaluer la tolérance au déficit hydrique.

En cas de déficit hydrique, les plantes assurent le maintien de la turgescence et du volume cellulaire par un ajustement osmotique reposant sur l'accumulation de solutés compatibles, tels que la proline, garantissant ainsi la continuité des fonctions métaboliques (**Tatar & Gevrek, 2008**). Ces métabolites contribuent à la protection des plantes en mobilisant diverses réponses physiologiques, telles que le renforcement de l'intégrité membranaire, la régulation de l'activité enzymatique et antioxydante, ainsi que le maintien des besoins hydriques (**Ahmad et al., 2020**).

L'application d'un stress hydrique 22 jours après le semis a entraîné une augmentation de certains métabolites, notamment des acides aminés, en particulier la proline, ainsi que de certains acides organiques (**Fadoul et al., 2021**).

L'accumulation de proline a constitué un marqueur central de tolérance, en accord avec de nombreux travaux montrant que la proline agit comme osmoprotecteur, stabilisateur membranaire et antioxydant. Dans notre étude, les variétés v16, v6, v5, v24, v18 et v14 se sont distinguées par une forte accumulation sous le traitement avec les deux régimes hydriques S1 et S2, ce qui traduit une capacité d'adaptation active. Les variétés v1, v2 et v3 ont montré une accumulation enlevée dans le témoin et une accumulation diminuée sous les deux traitements stressants ce qui explique leur capacité adaptative contre le déficit hydrique.

Sous traitement hydrique favorable, certaines variétés, telles que v24, v29, v15, v16, v21, v19 et v25, présentent une teneur élevée en protéines, ce qui suggère une bonne capacité de maintien de la qualité technologique.

Il est intéressant de noter que certaines variétés, notamment v27, v6 et v30, se distinguent par une adaptation remarquable aux deux régimes hydriques S1 et S2 par rapport au témoin. Cette double adaptation illustre leur capacité à préserver une teneur protéique relativement stable quelle que soit la condition hydrique, ce qui constitue un critère particulièrement recherché dans les programmes de sélection, alliant tolérance au stress et maintien de la valeur technologique.

L'étude des réponses de différentes variétés de blé aux deux régimes hydriques (S1 : stress contrôlé du stade 3 feuilles au stade 5 feuilles ; S2 : stress intense et prolongé du semis au stade 5 feuilles) a révélé une forte variabilité génétique, confirmant que la tolérance à la sécheresse est un caractère quantitatif, complexe et polygénique.

D'un point de vue physiologique, le stress hydrique exerce un effet différencié sur l'accumulation des sucres solubles. Le stress 1 réduit de manière relativement homogène les concentrations, tandis que le régime stress S2 engendre une réponse plus variable, pouvant traduire des mécanismes d'adaptation ou de tolérance divergents. Globalement, la condition témoin conserve les niveaux les plus élevés, confirmant l'importance des sucres solubles dans le maintien du métabolisme cellulaire en absence de contrainte.

Concernant la teneur en protéines, nos résultats suggèrent que le déficit hydrique induit par les traitements de stress a pour effet global de réduire la teneur en protéines solubles, comparativement à la condition témoin. La baisse est progressive en fonction de l'intensité du stress, S2 apparaissant comme le plus pénalisant. Toutefois, la présence d'individus ou de

génotypes présentant des teneurs élevées en protéines (v6 et v24) malgré le stress pourrait refléter des mécanismes de tolérance ou d'adaptation.

Selon les résultats obtenus, la proline s'accumule principalement en condition de stress hydrique, en particulier lors du stress 1, où elle atteint ses niveaux les plus élevés. Le stress 2, bien qu'inducteur de proline, montre une réponse plus hétérogène et globalement plus faible que le stress 1, ce qui pourrait refléter une différence d'intensité du stress ou une variabilité génétique de tolérance parmi les échantillons testés.

En général, les deux lignées v24 et 27 ont montré un comportement adaptatif remarquable. Le génotype v24 se distingue par un développement marqué traduisant un profil d'adaptation active, tandis que le génotype v27 apparaît non affecté par les contraintes hydriques, confirmant ainsi une résilience stable.

Nos résultats démontrent que la tolérance au stress hydrique ne repose pas sur un mécanisme unique, mais sur une combinaison de stratégies adaptatives propres à chaque génotype. Ils confirment également la nécessité d'intégrer la diversité génétique et les interactions génotype × environnement dans les programmes d'amélioration variétale visant la stabilité et la résilience du rendement.

CHAPITRE III. EFFET DES PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX SUR DEUX GÉNÉRATIONS DE BLÉ DUR

Introduction

L'importance des défis interconnectés entre la sécurité alimentaire et les changements climatiques, dans un contexte de croissance démographique continue, est aujourd'hui largement reconnue comme l'une des priorités majeures à l'échelle mondiale (EU, 2020).

Les tendances actuelles du changement climatique révèlent une modification à long terme des régimes de température et de précipitations, accompagnée d'un réchauffement global. Parmi ces contraintes, le déficit hydrique représente l'un des stress abiotiques majeurs auxquels les agriculteurs sont confrontés à l'échelle mondiale (Mansour *et al.*, 2020).

Le stress hydrique réduit le rendement du blé de 50 à 60 % en moyenne (Zhao *et al.*, 2020). Si cette tendance se poursuit, elle entraînera une baisse supplémentaire de la production mondiale de blé, compromettant ainsi la sécurité alimentaire et nutritionnelle future à l'échelle mondiale (Mansour *et al.*, 2020). Il peut aussi perturber divers processus physiologiques et biochimiques, notamment la photosynthèse, l'état hydrique de la plante et la régulation du stress oxydatif, ce qui entraîne un ralentissement de la croissance et une diminution des rendements agricoles (Bakry *et al.*, 2019 ; Sadak *et al.*, 2020).

Les réductions des caractères agronomiques et du rendement final en grain induites par la sécheresse dépendent de la sévérité et de la durée de la période de stress. Il est également important de souligner que les génotypes de blé exprimant une tolérance à la sécheresse dès le stade de germination tendent à conserver cette aptitude aux stades ultérieurs de développement (Khakwani *et al.*, 2011).

Les contraintes environnementales défavorables, telles que la sécheresse et le stress thermique, modifient de manière significative la teneur en protéines du blé, affectant à la fois leurs dimensions quantitative et qualitative (Li *et al.*, 2013 ; Sadak, 2022).

Le rapport amidon/protéines constitue un critère commercial majeur pour l'évaluation de la qualité des grains de blé (Jenner *et al.*, 1990). Le stress hydrique réduit la teneur en amidon des grains matures et modifie l'activité enzymatique, ce qui limite le transport des glucides depuis les organes sources et compromet leur accumulation dans les grains en développement (Yang *et al.*, 2004 ; Prathap *et al.*, 2019).

Il est également important de souligner que les conditions environnementales n'affectent pas toutes les variétés de la même manière. La diversité génétique existante parmi les génotypes de blé dur se traduit par des comportements contrastés face aux stress climatiques.

La qualité du grain est soumise à l'interaction génotype $\times$ environnement, ce qui impose la sélection de génotypes prometteurs afin de développer des variétés conformes aux exigences du marché (Migliorini *et al.*, 2016 ; Hernández-Espinosa *et al.*, 2018).

Dans cette perspective, les informations relatives à la variabilité génétique, à l'héritabilité, au progrès génétique et aux corrélations constituent des paramètres essentiels, largement utilisés

comme prérequis pour orienter judicieusement le choix des parents dans la conception de programmes de sélection (Tuhina-Khatun *et al.*, 2007).

L'héritabilité et le progrès génétique permettent de prédire la réponse des générations suivantes et d'estimer l'ampleur du gain génétique attendu par sélection (Yadav *et al.*, 2015), tandis que l'étude des corrélations entre différents caractères facilite la décision d'opter pour une sélection directe ou indirecte (Neyhart *et al.*, 2019).

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des conditions climatiques sur les composants qualitatifs de différents génotypes de Blé dur, ainsi que la possibilité du passage de ces critères aux futures lignées.

1. Matériel et méthodes

1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans ce travail est le blé dur *Triticum durum* Desf. Les 13 génotypes/lignées proviennent de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) d'El Khroub, Constantine, Algérie (Tab. 11).

Tableau 11 : Liste du matériel végétal

Variétés ou Lignées	Origine
Bellaroi/4/Bcris/Bicum//Ilaeta Inia/3/Dukem_12/...	Sélection locale (ITGC – Khroub)
E90040/ MFOWL_13/ / LOTAIL_6/ 3/PROZANA/ARLIN...	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Oss11/StjS5/ 5/Bicrederaa1/4/BEZAIZSHF/ /SD19539/Waha...	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Langdon/Kucuk	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Mohamed Ben Bachir/Chacan	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Bellaroi/ 4/ Bcris/ Bicum/ /11aeta Inia/ 3/ Dukem_12/...	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Hedba03/M 1084	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Waha R2	ICARDA (ITGC – Khroub 1976)
Cirta	Sélection locale (ITGC – Khroub)
Gta/Dur69...	Sélection locale (ITGC – Khroub)
STOTHALTAR84/ALD/3/THB/CEP7780//2*MUSK_4/...	Sélection locale (ITGC – Khroub)
SILVER 14 / MOEWE/ / BISU_1/ PATKA_3/ 3/PORRON_4...	Sélection locale (ITGC – Khroub)
CMH85.797/ /CADO/BOOMER_33/4/ARMENTHSRN_3/...	Sélection locale (ITGC – Khroub)

1.2. Site expérimental

L'analyse de la qualité technologique des variétés de blé dur ont été effectuées au niveau du laboratoire de suivi de la production du groupe Amor Benamor, El-Fedjoudj, Guelma (Fig. 45). Les Moulins Amor Benamor sont certifiées selon la norme internationale ISO 22000, relative à la sécurité alimentaire.

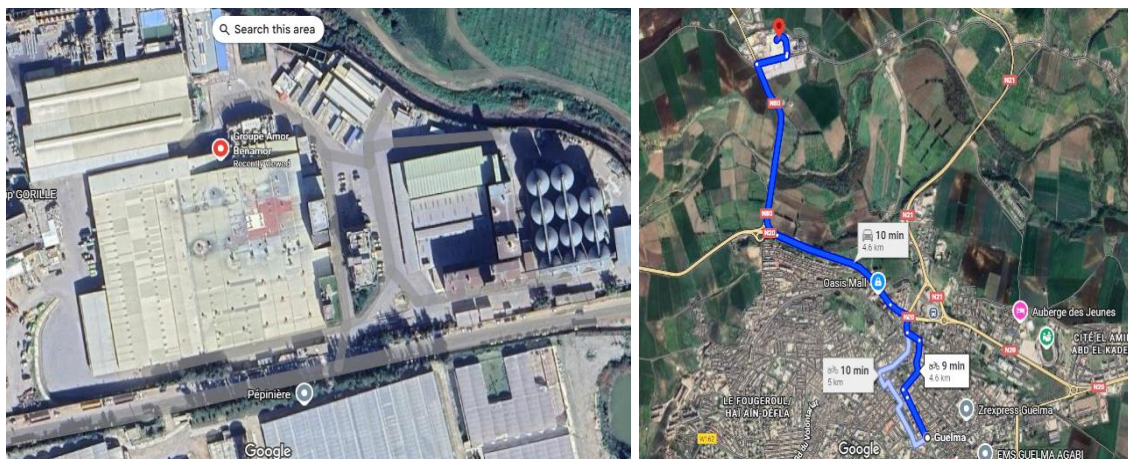


Figure 45 : Moulins du groupe Amor Benamor, El-Fedjoudj, Guelma.

1.3. Paramètres mesurés

1.3.1. Teneur en protéines

La spectrométrie dans le proche infrarouge est une méthode indirecte qui repose sur l'interaction entre un constituant chimiquement défini et le rayonnement proche infrarouge. Le principe de la méthode repose sur la mesure de la réflectance d'un rayonnement émis à une longueur d'onde donnée dans le visible ou l'infra-rouge. Les différentes liaisons chimiques du matériel étudié (type O-H, N-H ou C-H) absorbent à des longueurs d'onde spécifiques égales à leur fréquence de vibration et passent ainsi d'un état fondamental à un état excité. L'ensemble de ces fréquences (ou longueurs d'onde) d'absorption constituent le spectre d'absorption (**Delwiche, 1998**).

Le spectrophotomètre qu'on a utilisé pour la mesure de la teneur en protéine est *Infraneo* (Chopin Technologies), un analyseur infrarouge pour tout type de grains entiers et produits pulvérulents (**Fig. 46**).



Figure 46 : Spectrophotomètre *Infraneo*

1.3.2. Teneur en gluten

Le gluten est le composant fonctionnel des protéines. Ses propriétés déterminent les caractéristiques de la pâte et influencent la qualité du produit final. La qualité et la quantité de gluten affectent l'élasticité, le développement, la rétention gazeuse de la pâte, et donc la qualité finale de cuisson du produit.

La méthode Gluten Index de Perten Instruments est le test international standardisé pour la détermination de la teneur du gluten dans la farine, le blé tendre, le blé dur et la semoule. La mesure de la teneur en gluten se fait selon les étapes suivantes :

- Broyage de l'échantillon de blé (**Fig. 47.a**)
- 10g de farine complète ou de farine sont pesés et placés dans la chambre de lavage du *Glutomatic* (**Fig. 47.b**), équipée d'un tamis en polyester de 88 microns.
- 4,8 ml de solution saline sont ajoutés à l'échantillon de farine ou de semoule.
- La farine (ou la semoule) et la solution saline sont mélangées pendant 20 secondes afin de former une pâte.
- À la fin de la phase de mélange, le lavage démarre automatiquement et se poursuit pendant cinq minutes. Pour la semoule de blé, après deux minutes, l'échantillon est transféré dans une chambre équipée d'un tamis grossier de 840 microns, permettant l'élimination des particules de son.
- Le gluten humide non divisé est transféré dans la cassette de tamis spéciale et, exactement 30 secondes après la fin du lavage, il est centrifugé pendant une minute à 6000 ± 5 tr/min dans la *Centrifugeuse 2010* (**Fig. 47.c**).
- La fraction ayant traversé les tamis est récupérée à l'aide d'une spatule et pesée. La fraction retenue à l'intérieur du tamis est collectée puis ajoutée à la balance. Le poids total du gluten humide est ainsi déterminé.
- Le gluten humide total est séché à une température minimale de 150 °C pendant quatre minutes dans le *Glutork 2020* (**Fig. 47.d**). Après séchage, le gluten est de nouveau pesé sur la balance (TGS).

$$\text{Gluten Index (GI)} = (\text{Gluten humide intérieur filière} / \text{Gluten Humide Total}) \times 100$$

$$\text{Teneur en Gluten Humide (TGH)} = \text{Gluten Humide Total (g)} \times 10$$

$$\text{Teneur en Gluten Sec (TGS)} = \text{Poids de Gluten Sec (g)} \times 10$$



Figure 47 : Matériel requis pour l'analyse de la teneur en gluten

1.3.3. Teneur en amidon

L'amidon a un rôle important dans la panification puisqu'il assure la dilution du gluten, fixe l'eau et constitue une source de sucres fermentescibles (**Feillet, 2000**). L'amidon constitue le glucide le plus consommé dans le monde. C'est grâce à leur richesse en amidon que les céréales sont une source d'énergie. Par son pouvoir fixateur d'eau et sa capacité à former des liaisons non-covalentes (liaisons hydrogènes) avec les protéines, l'amidon contribue de manière active à la formation de la pâte.

On a déterminé la teneur en amidon des génotypes de blé avec le spectrophotomètre *Infraneo*

1.3.4. Humidité

L'humidité influence directement les propriétés de mouture, la texture de la farine et la fonctionnalité des protéines, notamment dans la formation du gluten. D'un point de vue commerciale, des niveaux d'humidité incorrects dans les grains stockés peuvent avoir des conséquences catastrophiques, allant de la prolifération des moisissures à la perte totale du produit, ce qui a un impact à la fois sur la qualité et sur les résultats.

Le taux de l'humidité des grains de blé dur a été déterminé par spectrophotométrie.

1.3.5. Indice de jaune

Elle consiste à apprécier la couleur de la semoule de blé dur par un colorimètre (Konica Minolta, CR- 400) (**Fig. 48**). L'intérêt de la mesure est surtout commercial.

Les résultats sont exprimés dans le système par la luminosité (L), l'indice de brun (a) et l'indice de jaune (b), dans les conditions retenues par la commission international de l'éclairément (CIE).

$$\text{Indice de Brun (a)} = 100 - L^*.$$

$$\text{Indice de jaune} = b^*$$

Les indices de couleur donnent une valeur chiffrée pour caractériser la clarté et le jaune des pâtes fabriquées à partir du blé dur. La mesure se fait avec un chroma mètre qui fournit les paramètres suivants :

La luminosité L*: cet indice varie de 0 (noir parfait) à 100 (blanc parfait).

L'indice de jaune b*: la valeur 0 correspond à une couleur neutre entre le jaune et le bleu. Les valeurs positives correspondent à du jaune et les valeurs négatives à du bleu. Plus l'indice est élevé en valeur absolue, plus la couleur est intense.



Figure 48: Chromamètre Konica Minolta, CR- 400

1.3.6. Taux de germination

Le taux de germination constitue un indicateur fondamental de la qualité physiologique des semences. C'est le nombre de graines germées au cours d'un temps déterminé (g) sur le nombre total de graines mises à germer (N.g) (Mazliak, 1982).

$$G = (g / N.g) * 100$$

G : pourcentage de germination

g : le nombre de graines germées

N.g : le nombre de graines mises à germer

1.3.7. Poids de mille grains

Le poids de mille grains (PMG) est un paramètre morphologique et agronomique de première importance dans l'évaluation de la qualité et du rendement des céréales. C'est un indicateur du rendement technologique qui reflète la taille et le degré de remplissage des grains, caractéristiques directement influencées par les conditions génétiques et environnementales,

notamment la disponibilité en eau, la fertilité du sol et la température au cours du remplissage du grain.

Le principe de la méthode repose sur le comptage automatique ou manuel de nombre de grains entiers contenus dans une prise d'essai de masse connue (ITCF, 2001).

1.4. Analyse de données

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour identifier les paramètres de rendement qui ont caractérisé la distribution de chaque génération de blé. Ainsi qu'une étude comparative pour voir la différence de la composition technologique de chaque génotype dans les deux générations.

2. Résultats et discussion

2.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) (Fig. 49) a été utilisée pour visualiser et comparer les relations entre les différents paramètres de qualité et leur effet sur la distribution des génotypes. Ce qui permet de déduire s'il y a une différence importante entre les deux générations (G1 et G2), et quelle sont les variables qui contribuent le plus à expliquer cette différence.

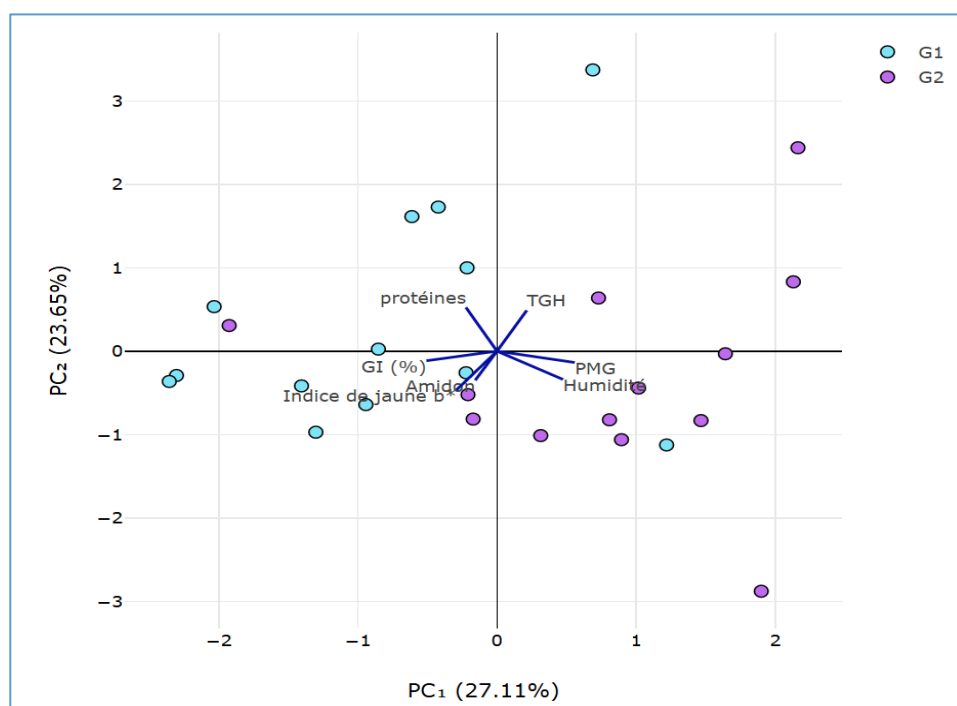


Figure 49 : Analyse en composantes principales

Les deux dimensions PC1 et PC2 expliquent 50% de la variance totale. Le poids de mille grains (PMG) et l'humidité présentent une corrélation positive, suggérant qu'ils évoluent de manière synchronisée et pourraient partager des bases physiologiques communes. En revanche, la teneur en protéines se distingue par une dynamique différente, indiquant une variabilité indépendante de ces paramètres. Par ailleurs, l'indice de jaune et l'amidon apparaissent regroupés, traduisant une possible corrélation entre ces deux composantes. Le taux de gluten humide (TGH) est corrélé négativement par rapport à la teneur en amidon et à l'indice de jaune.

L'analyse révèle une répartition différenciée des deux générations étudiées. Les génotypes de G1 se regroupent en association étroite avec l'indice de gluten (GI), l'amidon et l'indice de jaune (b*), ce qui suggère que cette génération est plus fortement caractérisée par ces attributs liés à la qualité technologique. À l'inverse, les génotypes de G2 se dispersent principalement en relation avec le poids de mille grains (PMG), l'humidité et la teneur en gluten humide (TGH), indiquant une orientation vers des paramètres associés à la biomasse et à la capacité de rétention d'eau. Bien que certains génotypes des deux groupes présentent un chevauchement partiel, la tendance générale met en évidence une séparation partielle entre G1 et G2, traduisant l'existence de différences notables dans leur profil de qualité technologique.

2.2. Comparaison de la qualité technologique des deux générations

L'objectif de cette comparaison est de voir si les paramètres de qualité varient d'une génération à l'autre, et s'il existe un effet environnement affectant la composition technologique des génotypes.

2.2.1. Teneur en protéine

La teneur en protéines est un paramètre central de la qualité technologique du blé dur.

Les résultats (**Fig. 50**) révèlent une moyenne de 13,22 % en G1, contre 12,49 % en G2, ce qui traduit une légère diminution intergénérationnelle. En G1, les génotypes les plus riches en protéines étaient V5, V6 et V3, avec une valeur maximale de 15,2 %, tandis que les plus faibles concernaient V8, V12 et V9 (minimum 10,1 %). En G2, les teneurs maximales concernaient V3, V4 et V6 (13,7 %), et les plus faibles V13, V12 et V11 (11 %).

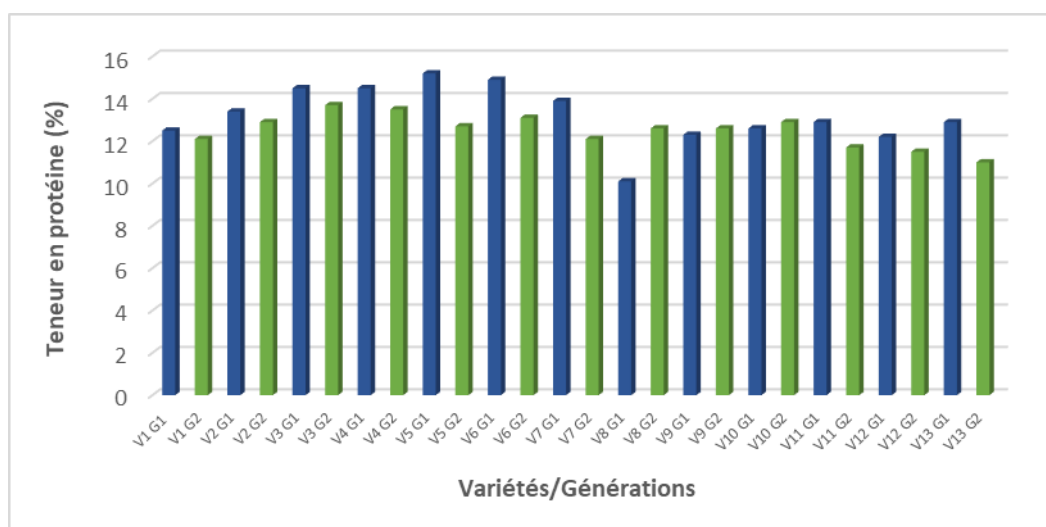


Figure 50 : Comparaison de la teneur en protéine des deux générations

2.2.2. Teneur en gluten

Le gluten, sous ses deux formes, reflète la force panifiable et la qualité technologique. Pour le gluten humide (TGH), G2 présente une moyenne légèrement supérieure (25,72 %) comparée à G1 (24,42 %). Toutefois, la valeur maximale est enregistrée en G1 (34 % contre 29,5 % en G2), indiquant une plus grande amplitude de variation en première génération (**Fig. 51**). Pour l'indice de gluten (GI), G1 domine avec une moyenne de 70,46 (max. 99,59) contre 63,88 en G2 (max. 98,41).

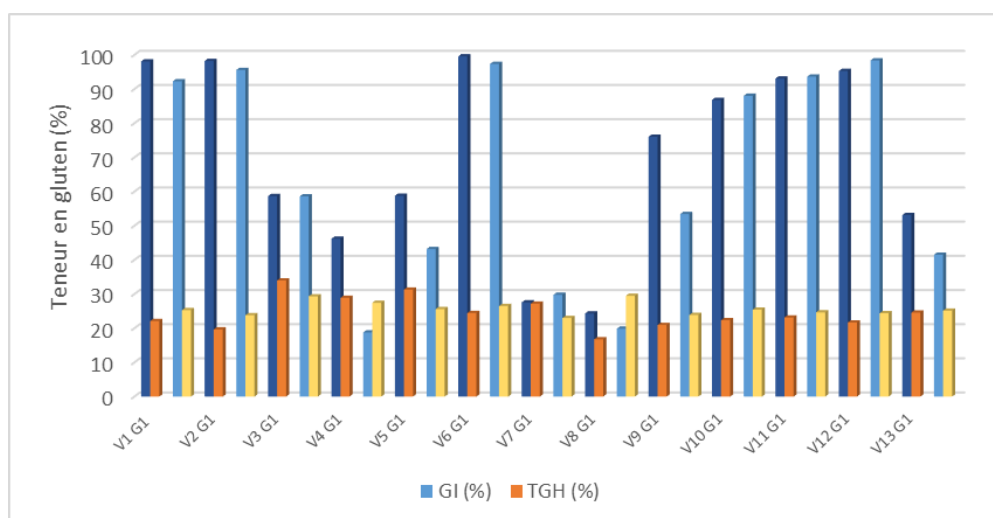


Figure 51 : Comparaison de la teneur en Gluten des deux générations

2.2.3. Teneur en amidon

La teneur en amidon, facteur majeur du rendement industriel, varie entre les générations (**Fig. 52**). En G1, la moyenne est de 55,12 % avec un maximum de 61 % et un minimum de 51,7 %. En G2, elle s'élève à 58,35 %, avec un intervalle plus réduit (56,9–59,4 %). Ces données révèlent une amélioration en G2, traduisant de meilleures conditions de remplissage des grains, avec une variabilité génétique plus contenue.

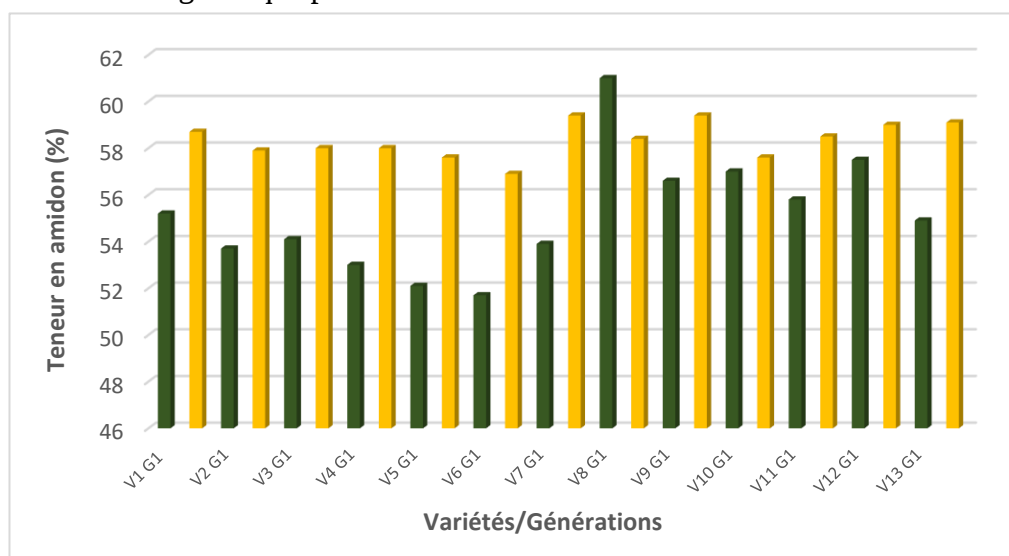


Figure 52 : Comparaison de la teneur en Amidon des deux générations

2.2.4. Humidité

L'humidité moyenne des grains est légèrement plus élevée en G2 (11,67 %) qu'en G1 (10,94 %) (**Fig. 53**). Les valeurs maximales atteignent 12,2 % en G2 et 11,7 % en G1, tandis que les minimales sont respectivement de 11,5 % et 10,6 %. Cette différence suggère une meilleure rétention hydrique des grains en G2, probablement en lien avec des conditions environnementales plus humides.

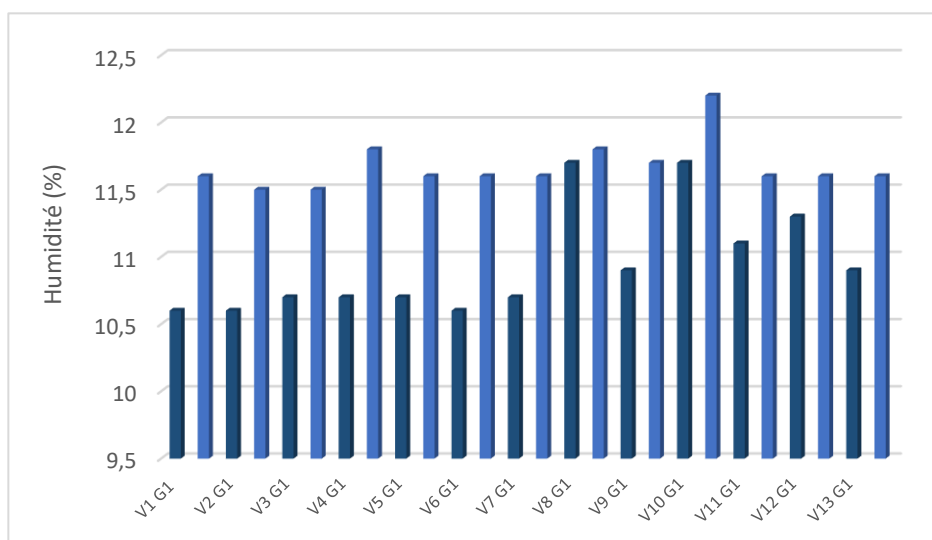


Figure 53 : Comparaison du taux d'humidité des deux générations

2.2.5. Indice de jaune

L'indice de jaune, reflet de la teneur en pigments caroténoïdes, reste relativement stable entre générations (18,93 en G1 contre 18,58 en G2). Les extrêmes observés (17,07–20,04 en G1 et 16,91–19,84 en G2) traduisent une variabilité génotypique, mais sans tendance claire intergénérationnelle (à l'exception de V8, V3 et V6) (**Fig. 54**). La stabilité de ce caractère souligne son importance pour la qualité technologique, moins influencée par les conditions climatiques.

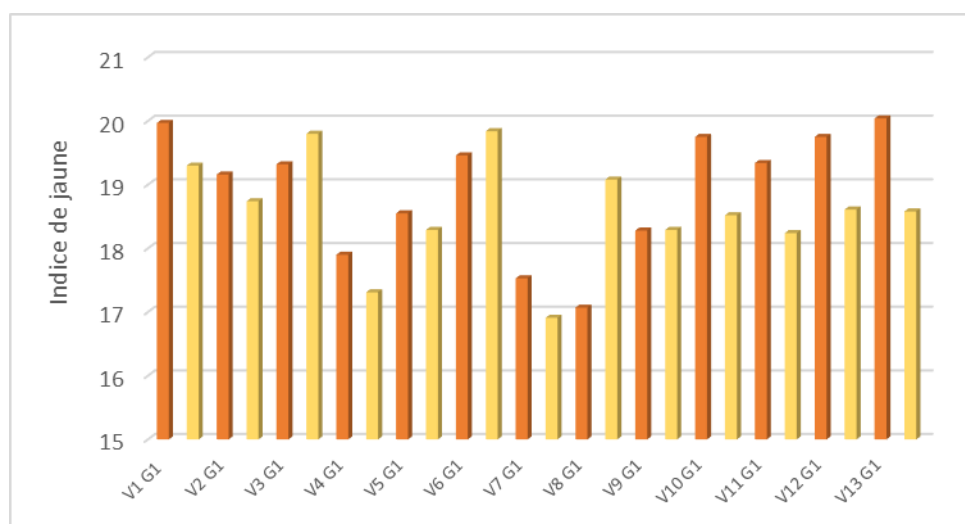


Figure 54 : Comparaison de l'indice de jaune des deux générations

2.2.6. Taux de germination

Le taux de germination révèle une différence nette entre générations. En G1, la moyenne est de 94,62 %, avec des génotypes faibles tels que V10 (70 %) et d'autres autour de 90 %, alors que huit génotypes sur treize atteignent 100 % (**Fig. 55**). En revanche, en G2, tous les génotypes atteignent 100 %, traduisant une amélioration significative de la viabilité des semences. Ce

résultat témoigne d'une meilleure interaction entre le matériel génétique et les conditions climatiques rencontrées en G2.

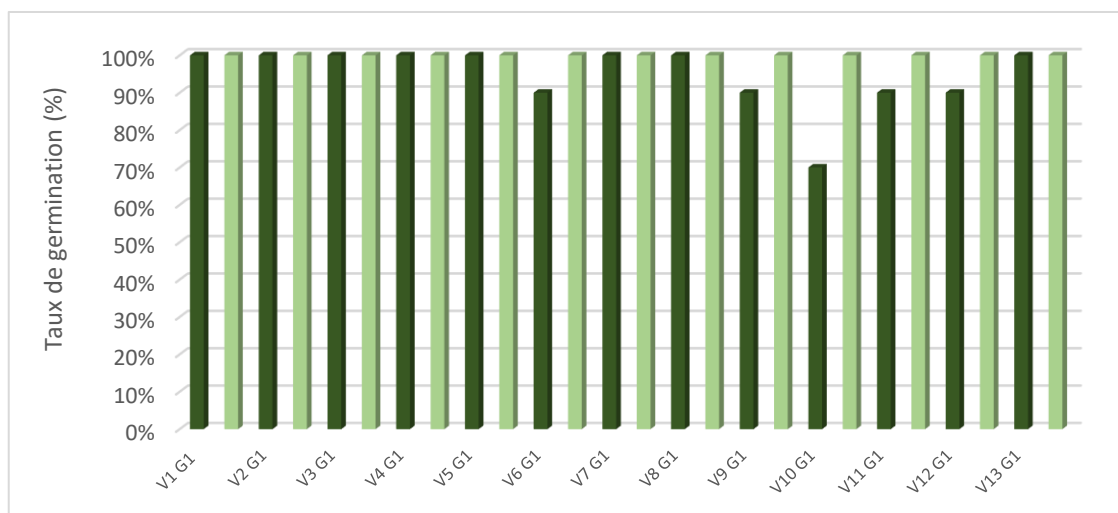


Figure 55 : Comparaison du taux de germination des deux générations

2.2.7. Poids de mille grains

Le PMG illustre une forte progression en G2 (51,69 g) comparé à G1 (37,55 g) (**Fig. 56**). En G1, les valeurs variaient de 29,9 à 44,8 g, avec des génotypes performants (V8, V9, V3) et d'autres plus faibles (V1, V2, V13). En G2, l'intervalle était plus élevé mais homogène (45,9 à 57,4 g), avec des performances maximales observées chez V7, V3 et V11. Ces résultats confirment l'importance des conditions environnementales dans le remplissage du grain, ainsi que le potentiel génétique exprimé en G2.

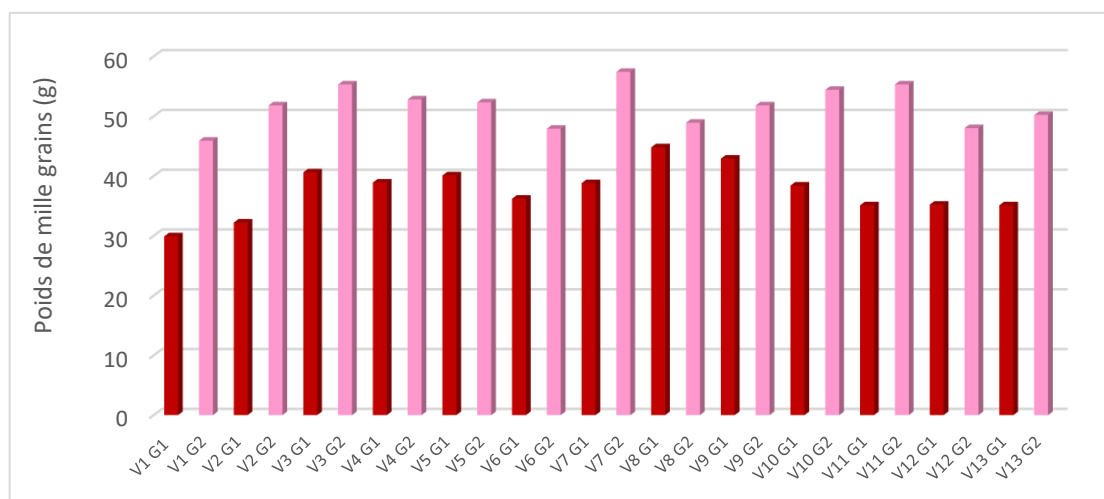


Figure 56 : Comparaison du poids de mille grains des deux générations

2.3. Discussion

Il est d'une importance majeure pour les sélectionneurs de blé de connaître les héritabilités des caractères agronomiques et technologiques, afin d'améliorer efficacement le rendement et la qualité (**Baker et al., 1971**). Toutefois, ces caractères sont fortement influencés à la fois par le

génotype et par l'environnement, et ce en raison de leur nature polygénique (**Gaines et al., 1996 ; Novoselović et al., 2004**).

L'héritabilité au sens large est définie comme le rapport entre la variance génotypique et la variance phénotypique. Dans ce type d'héritabilité, il est admis que les effets du génotype et de l'environnement contribuent conjointement à la formation du phénotype. Ainsi, l'héritabilité résulte à la fois des caractéristiques de la population et des conditions environnementales, plutôt que d'un caractère intrinsèquement dépendant du génotype. (**Falconer, 1985**).

Compte tenu de l'influence déterminante des conditions climatiques sur l'expression phénotypique des caractéristiques qualitatives du blé, il apparaît indispensable d'analyser en profondeur la manière dont ces facteurs environnementaux interagissent avec les génotypes.

L'analyse en composantes principales (ACP) met en évidence une différenciation claire entre les deux générations de blé sur le plan de leurs attributs technologiques. Les génotypes de la génération G1 se caractérisent par une association plus marquée avec les paramètres liés à la qualité boulangère et visuelle, tels que l'indice de gluten, la teneur en amidon et la coloration des grains, alors que les génotypes de la génération G2 apparaissent davantage corrélés aux paramètres liés au poids, à l'humidité et à la teneur en gluten humide.

La diversité de la qualité technologique de blé dur est déterminée principalement par la force de gluten qui, à son tour, dépend de la qualité et de la quantité de protéines de réserve (**Dexter & Matsuo 1977**).

Un gluten fort confère une plus grande fermeté et une stabilité des pâtes après la cuisson, tandis que les pâtes faites avec gluten faible tendent à se détériorer rapidement et deviennent molles en cas de surcuisson (**Payne, 1987**).

La mesure du gluten humide permet d'estimer la proportion totale de gluten présente dans le grain, un indicateur essentiel du potentiel panifiable. En revanche, l'indice de gluten reflète la qualité fonctionnelle du gluten, c'est-à-dire sa force et son élasticité, déterminantes pour la transformation industrielle (pain, pâtes, semoule).

Ainsi, un blé peut présenter une forte teneur en gluten mais un indice faible, ce qui traduit une mauvaise qualité technologique. Inversement, une teneur modérée en gluten peut être compensée par un indice élevé, garantissant de bonnes aptitudes boulangères. La complémentarité de ces deux mesures est donc fondamentale pour orienter la sélection et la valorisation des génotypes.

Nos résultats révèlent une interaction génotype × environnement marquée, mais également l'existence de génotypes à performance stable et répétée (V3 et V4 pour le gluten humide ; V6 et V2 pour l'indice de gluten), qui constituent des candidats prometteurs pour les programmes d'amélioration de la qualité technologique du blé dur. Ces résultats suggèrent que si G2 favorise une teneur plus homogène en gluten humide, G1 exprime mieux la qualité boulangère via un indice de gluten supérieur

Les protéines du grain, constituées des protéines de gluten (gluténines et gliadines) et des protéines non gluténiques (albumines et globulines), représentent un déterminant majeur de la physiologie et de la qualité du blé (**Goesaert et al., 2005 ; Liu et al., 2022**).

Les résultats obtenus montrent que la performance des génotypes varie selon les environnements, traduisant une interaction génotype $\times$ environnement significative pour ce caractère. Dans une perspective de sélection, les génotypes V3, V6 et V5, performants dans les deux environnements, apparaissent comme les candidats les plus prometteurs pour maintenir une teneur élevée en protéines.

Cela peut être expliqué par le fait que la variation de la teneur en protéines s'explique à parts presque égales par les influences de l'environnement, de la fumure azotée et de la variété. D'après **Häner & Barbant (2016)**, le choix variétal explique 33 % de la variabilité de la teneur en protéines ; il constitue, ainsi, le facteur le plus facile à maîtriser pour influencer la teneur en protéines du blé dur.

Ces différences montrent une variabilité génétique mais également une sensibilité aux conditions environnementales, la baisse en **G2** suggérant des conditions climatiques moins favorables à l'accumulation protéique.

L'amidon représente 65 à 70 % de la masse sèche des grains de céréales et se compose de polymères de glucose, à savoir l'amylose linéaire et l'amylopectine ramifiée (**Kumar et al., 2018 ; Fan et al., 2024**).

Le déficit hydrique réduit significativement la teneur en amidon, modifie la composition de ses constituants et affecte le rapport amylose/amylopectine chez le blé tendre (**Ullah et al., 2023**). Les effets du stress hydrique sur les constituants de l'amidon varient en fonction des stades de développement concernés et de l'intensité du stress subi.

L'étude de la teneur en amidon a mis en évidence une différence homogène entre les deux générations de blé dur (à l'exception de la variété V8 tous les génotypes de la deuxième génération ont montré une réaction favorable aux conditions climatiques). Ces résultats mettent en évidence la dépendance significative du pouvoir accumulatif de l'amidon aux conditions climatiques.

Le poids de mille grains est un critère généralement peu maîtrisable car il est fortement lié aux effets de l'environnement, au moment de la formation et du remplissage du grain. Un manque d'eau après la floraison combinée aux températures élevées (conditions fréquentées en Algérie) entraîne une diminution du poids de 1000 grains par altération de la vitesse et/ou de la durée de remplissage, ce qui se traduit par l'échaudage des grains (**Zouaoui , 1993 ; Chaker, 2003**) . Il constitue un indicateur direct de la productivité potentielle et de la densité des grains, souvent corrélé au rendement final.

La comparaison entre les deux générations étudiées révèle une augmentation substantielle du PMG en G2 par rapport à G1. Ce résultat met en évidence l'importance des conditions environnementales dans le remplissage du grain et suggère que les génotypes étudiés expriment mieux leur potentiel productif dans les conditions rencontrées en G2.

Etant donné que l'indice de jaune s'agit d'un caractère à forte héritabilité et indépendant des conditions environnementales et des pratiques culturales (**Parker et al., 1998 ; Elouafi et al., 2001**), de tels résultats prometteurs seront très utiles afin d'exploiter efficacement et plus particulièrement les populations locales de blé dur dans les programmes d'amélioration de la qualité du blé dur. Dans l'ensemble des résultats, l'indice de jaune se distingue par une

variabilité modérée entre génotypes et une constance intergénérationnelle, confirmant son caractère relativement stable et fortement déterminé par le génotype. Ce paramètre constitue donc un critère fiable dans les programmes de sélection visant à améliorer la qualité visuelle des produits transformés issus du blé dur.

Le seul génotype qui a présenté un comportement différent presque dans tous les paramètres majeurs de sélection commerciale (protéine, le taux de gluten humide et l'indice de jaune) est V8, Cela met en évidence le rôle déterminant de la composition génétique dans l'analyse de l'interaction génotype $\times$ environnement et dans les processus de sélection.

En conclusion, Les génotypes de G1 apparaissent mieux adaptés aux objectifs de transformation (pâtes, semoule, panification de qualité), tandis que ceux de G2 présentent un intérêt particulier pour l'amélioration de la productivité et du rendement. Ainsi, le choix des génotypes par les sélectionneurs doit être guidé par les objectifs spécifiques du programme de sélection.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

À l'échelle mondiale, de nombreuses synthèses montrent que chaque degré de réchauffement se traduit, en moyenne, par une baisse des rendements de blé ; ces effets sont amplifiés lorsqu'un stress hydrique et un stress thermique coïncident, comme c'est fréquent en Méditerranée.

En Algérie, il est estimé que les chutes de pluie vont diminuer d'environ 20 % et les températures vont augmenter de 3°C supplémentaires en 2050 à cause du réchauffement climatique. Il serait donc souhaitable à l'avenir d'accorder une plus grande importance à l'interaction Blé-Environnement pour mieux mettre en évidence le vrai potentiel d'adaptation de chaque variété et trouver des génotypes ayant une stabilité de comportement avec leur milieu de culture.

Ainsi, comprendre l'effet des conditions climatiques sur les marqueurs morpho physiologiques et la qualité du blé dur, tout en intégrant la variabilité génétique, apparaît comme une nécessité. Cette approche permettra non seulement de mieux comprendre l'impact du déficit environnemental sur la production céréalière, mais aussi de développer des solutions adaptées pour prévenir les pertes et garantir une production durable de blé dur dans les années à venir.

Par exemple, la réduction de la taille des tiges peut apparaître comme une réponse adaptative permettant de limiter la perte en eau et d'orienter davantage d'énergie vers le remplissage des grains. De même, l'augmentation de la longueur des barbes dans certaines conditions de stress hydrique est un mécanisme qui favorise la photosynthèse et limite les pertes en eau pendant la phase de maturation.

Notre étude a porté sur le comportement de 29 variétés de blé dur (*Triticum durum*. Desf), cultivées dans trois zones agro-morphologiquement différentes sous climat méditerranéen. Nous avons essayé de déterminer l'effet des conditions climatiques sur les performances de ces variétés à travers l'évolution de leurs caractères morphologiques : la hauteur moyenne de la tige, la distance feuille étendard-épi, la longueur de l'épi et la longueur des barbes.

Les résultats obtenus confirment que les génotypes de blé dur déploient diverses stratégies morphologiques d'adaptation en réponse aux conditions climatiques contrastées des zones étudiées. La réduction de la hauteur des tiges et de la distance feuille étendard-épi observée à Sidi-Fredj traduit une réponse adaptative visant à limiter la perte en eau et à orienter davantage les assimilats vers le remplissage des grains.

De même, l'augmentation de la longueur des barbes en conditions de stress terminal reflète un mécanisme de tolérance permettant à la fois de réduire l'évapotranspiration et de contribuer au refroidissement des épis lors des phases de forte chaleur. Ces ajustements morphologiques, bien que variables selon les génotypes, soulignent le rôle déterminant de la plasticité phénotypique dans la résilience face au déficit hydrique.

L'exemple du génotype ECLADUR, combinant une stabilité de la longueur d'épi avec une plasticité des traits liés à la tige et à la distance feuille-épi, illustre le potentiel de certains matériels génétiques à développer des réponses adaptatives efficaces, constituant ainsi des

candidats privilégiés pour les programmes de sélection en environnements méditerranéens soumis à des contraintes abiotiques.

Le stress environnemental, hydrique en particulier, n'affecte pas uniquement la morphologie du blé dur, mais perturbe également ses processus physiologiques essentiels, notamment l'accumulation de proline, de sucres solubles et de certaines protéines de défense.

La proline agit comme stabilisateur cellulaire, tandis que les sucres contribuent au maintien de l'équilibre osmotique et à la protection des membranes. Les protéines montrent une réponse plus contrastée : certaines sont dégradées pour fournir des acides aminés précurseurs de la proline, alors que d'autres, spécifiques de défense, s'accumulent.

Pour mieux comprendre le mécanisme de cet effet, un dispositif expérimental sous serre a été mis en place. On a testé l'effet de deux régimes hydriques : un stress hydrique contrôlé (stade 3 feuilles – stade 5 feuilles), et un stress hydrique intense prolongé (semis - stade 5 feuilles) ; appliqués du semis au stade 5 feuilles de 30 variétés de blé dur.

Les résultats montrent que la tolérance à la sécheresse repose sur une combinaison de mécanismes distincts : adaptation active, comme illustrée par le génotype v24 qui compense la contrainte par une stimulation de la croissance et une accumulation accrue d'osmolytes, et résilience stable, incarnée par le génotype v27, capable de maintenir ses performances sans altération notable.

La proline et les sucres solubles apparaissent comme des marqueurs physiologiques majeurs de l'adaptation, traduisant à la fois la plasticité et la stabilité des génotypes face au déficit hydrique. Enfin, la différenciation des réponses entre génotypes confirme le caractère polygénique et complexe de la tolérance à la sécheresse, soulignant l'importance d'intégrer la diversité génétique et l'interaction génotype $\times$ environnement dans les programmes de sélection visant à développer des variétés résilientes, capables d'allier stabilité du rendement et maintien de la qualité technologique.

La qualité technologique du blé est principalement déterminée par sa teneur en protéines, en gluten et en amidon, qui influencent directement la fonctionnalité de la farine et les propriétés d'utilisation finale. Dans un contexte de sécurité alimentaire mondiale, il est tout aussi crucial de maintenir une qualité technologique élevée que d'atteindre de bons rendements.

Or, les stress environnementaux tels que le déficit hydrique et thermique entraînent souvent une réduction de la concentration en protéines et une altération de la teneur en amidon, diminuant ainsi la qualité technologique et nutritionnelle des grains. Cela constitue un double défi pour les sélectionneurs : développer des génotypes de blé capables de tolérer les conditions climatiques stressantes, tout en préservant la qualité.

Le troisième dispositif expérimental qu'on a établi été pour voir l'effet des conditions climatiques sur deux générations de treize variétés de blé. L'analyse des paramètres de la qualité technologique a montré qu'il existe une différence entre les deux générations avec une diminution de la teneur de quelques paramètres (protéines), et l'augmentation d'autres paramètres (teneur en amidon, poids de mille grains), ce qui confirme que le facteur environnemental influence l'expression des critères de qualité. Ces marqueurs peuvent ensuite être intégrés aux critères de sélection afin d'accélérer la création de cultivars résilients.

CONCLUSION GENERALE

Les géotypes de la première génération (G1) se caractérisent par une supériorité sur les paramètres liés à la qualité de transformation, notamment la force et la fonctionnalité du gluten, tandis que ceux de la deuxième génération (G2) manifestent une aptitude accrue à l'expression du potentiel productif et du rendement. Ces résultats soulignent la nécessité pour les programmes de sélection d'intégrer simultanément les objectifs de qualité et de productivité, en orientant le choix variétal selon les priorités stratégiques fixées, afin d'optimiser la valorisation du blé dur dans des contextes agro climatiques contrastés.

Les systèmes alimentaires du futur devront combiner la résilience face aux stress environnementaux et la capacité d'une production suffisante d'aliments diversifiés et nutritifs. Cette double exigence, entre l'adaptation environnementale et la stabilité, constitue un enjeu majeur pour l'agriculture mondiale et plus particulièrement pour les zones vulnérables telles que le bassin méditerranéen.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Aase, J.K. et Pikul Jr, J.L. (2000). Water use in a modified summer fallow system on semiarid northern Great Plains. *Agric. Water Manage.* 43 : 345–357.
- Abdel-Aal, E.S.M., Salama, D.A., Hucl, P., Sosulski, F.W. et Cao, W. (1996). Electrophoretic characterization of spring spelt wheat gliadins. *J. Agric. Food Chem.* 44: 2117–2123.
- Abdelkhalik, S.A.M. (2019) Assessment of some genetic parameters for yield and its components in four bread wheat crosses using six parameter model. Egypt. *J. Plant Breed* 23: 719-736.
- Abecassis, J., Cuq, B., Boggini, G. et Namoune, H. (2012). Other traditional durum-derived products. In *Durum Wheat Chemistry and Technology*, 2nd ed.; Sissons, M., Abecassis, J., Marchylo, B., Carcea, M., Eds.; AACC International Inc.: St. Paul, MN, USA; 10: 177–199.
- Aburri, N. S. (2022). Effects of a New Biostimulant on Vegetational Indexes, Yield and Quality in Common Wheat .University of Padova.
- Ahmad, F., Singh, A. et Kamal, A. (2020). Osmoprotective role of sugar in mitigating abiotic stress in plants. In *Protective Chemical Agents in the Amelioration of Plant Abiotic Stress. Biochemical and Molecular Perspectives*. Wiley: Hoboken, NJ, USA 53–70.
- Ahmad, M., Akram, Z., Munir, M. et Rauf, M. (2006). Physio-morphic response of wheat genotypes under rainfed conditions. *Pak. J. Bot.* 38: 1697-1702.
- Aktaş, H. (2016). drought tolerance indices of selected landraces and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes derived from synthetic wheats. *Appl. Ecol. Env. Res.* 14: 177–189.
- Ali Dib, T., Monneveux, P. et Araus, J.L. (1992). Adaptation à la sécheresse et notion d'idéotype chez le blé dur. II. Caractères physiologiques d'adaptation. *Agronomie* 12 : 381-393
- Ali, M., Hussain, M., Khan, M., Ali, Z., Zulkiffal, M. et Anwar, J. (2010). Source-sink relationship between photosynthetic organs and grain yield attributes during grain filling stage in spring wheat (*Triticum aestivum*). *Int. J. Agric. Biol.* 12: 509–515.
- Ali, O.A.M. (2019). Wheat Responses and Tolerance to Drought Stress. *Springer Nature Singapore Pte Ltd.* 2019 129-138
- Al-Issa, T.A. et Samarah, N.H. (2006). Tillage practices in wheat production under rainfed conditions in Jordan: An economic comparison. *World Journal of Agricultural Science* 2: 322–325.
- Al-Karaki, G.N. (2012). Phenological development-yield relationships in durum wheat cultivars under late-season high-temperature stress in a semiarid environment. *International Scholarly Research Notices, Agron.* 2012, 456856, 7 pages.
- Amanuel, M., Gebre, D. et Debele, T. (2018). Performance of bread wheat genotypes under different environment in lowland irrigated areas of Afar Region, Ethiopia. *African J. Agric. Res.* 13: 927-933

- Ammar, K., Kronstad, W.E. et Morris, C.F. (2000). Breadmaking quality of selected durum wheat genotypes and its relationship with high molecular weight glutenin subunit allele variation and gluten polymeric composition. *Cereal Chem.* 77: 230.
- Anantha, M.S., Patel, D., Quintana, M., et al. (2016). Trait combinations that improve rice yield under drought : Sahbhagi Dhan and new drought-tolerant varieties in South Asia. *Crop Science* 56: 408–421.
- Anastasi, U., Corinzia, S.A., Cosentino, S.L. et Scordia, D. (2019). Performances of Durum Wheat Varieties under Conventional and No-Chemical Input Management Systems in a Semiarid Mediterranean Environment. *Agronomy* 9: 788.
- Anjum, S., Xie, X.Y., Wang, L.C., Saleem, M., Man, C. et Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Afr. J. Agric. Res.* 6 : 2026–2032.
- Annicchiarico, P., Bellah, F. et Chiari, T. (2005). Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. *Crop Sci.* 45: 1741-1749.
- Antonietta, M., Dana, M. et Juan, J.G. (2024). Delayed senescence and crop performance under stress: always a functional couple? *J. Exp. Bot.* 75: 4244–4257
- AR6 (the Sixth Assessment Report). (2021). Climate Change: The Physical Science Basis.
- ARVALIS. (2024). Choix variétal en blé dur : tenir compte de la qualité technologique et sanitaire.
- Asif, M. et Kamran, A. (2011). Plant breeding for water-limited environments. *Crop science* 51 : 2911.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D. et Reynolds, M.P. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change* 5(2): 143.
- Auriau, P. (1978). Sélection pour le rendement en fonction du climat chez le blé. *An. El. Harrach* 8(2) : pp.5-14.
- Baenziger, P.S., Russell, W.K., Graef, G.L. et Campbell, B.T. (2006). Improving lives: 50 years of crop breeding, genetics and cytology (C-1). *Crop Sci.* 46: 2230-2244.
- Bagga, A.K., Ruwal, K.N. et Asana, R.D. (1970). Comparison of some Indian and semi-dwarf Mexican wheat to unirrigated cultivation. *Indian J. agric. Sci.* 40: 421- 427 .
- Bahlouli, F., Bouzerzour H., Benmahammed A. et Hassous K.L. (2005). Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Pakistan Journal of Agronomy* 4: 360-365.
- Baker, J., Steele, C. et Dure III, L. (1988). Sequence and characterization of 6 Lea proteins and their genes from cotton. *Plant Mol. Biol.* 11: 277-291.
- Baker, R.J., Tipples, H.K. et Campbell, A.B. (1971). Heritabilities of an correlations among wheat quality traits. *Can. J. Plant Sci.* 51: 441-448.

- Bakhshi, A.K. et Bains G.S. (1987). Study of the physicochemical, rheological, baking and noodle quality of improved durum wheat and bread wheat cultivars. *J. Food Sci. Tech India* 24: 217.
- Bakry, B., Sadak, M.S., El-Karamany, M.F. et Tawfik, M.M. (2019). Sustainable production of two wheat cultivars under water stress conditions. *Plant Archives* 19: 2307-2315
- Ballantyne, J.S. & Chamberlin, M.E. (1993). Cellular and Molecular Physiology of Cell Volume Regulation. *CRC Press* 12p.
- Barnabás, B., Jäger, K. et Fehér, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment* 31: 11–38.
- BASF. (2025). Leader mondial de l'industrie chimique, BASF France division Agro.
- Bavei, V., Vaezi, B., Abdipour, M., Kamali, M. et Roustaii M. (2011). Screening of tolerant spring barleys for terminal heat stress: different importance of yield components in barleys with different ro type. *International Journal of Plant Breeding and Genetics* 5: 175–193.
- Belderok, B., Mesdag, J. et Donner, D.A. (2000). Bread-Making Quality of Wheat: A Century of Breeding in Europe. Kluwer Academic Publisher; Dordrecht, The Netherlands: pp. 30–31.
- Benbelkacem, A. et Kellou, K. (2000). Evaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) cultivées en Algérie. In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges* . Zaragoza : CIHEAM, p. 105-110.
- Benbelkacem, A., Sadli F. et Brinis L. (1995). La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie. In : Di Fonzo N. (ed.), Kaan F. (ed.), Nachit M. (ed.). *Durum wheat quality in the Mediterranean region* . Zaragoza : CIHEAM, p. 61-65.
- Benini, M., Blasi, E., Detti, P. et Fosci, L. (2023). Solving crop planning and rotation problems in a sustainable agriculture perspective. *Comput. Oper. Res.* 1:159.
- Benlarbi, M., Monneveux, P., Grignac, P. (1991). Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum Durum* Desf.). *Agronomie* 10 : 305 - 313.
- Benlaribi, M. et Monneveux, P. (1988). Etude comparée du comportement en situation de déficit hydrique de deux variétés algériennes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) adaptées à la sécheresse. *C. R. Acad. Agri. France* 74 : 73-83.
- Benmahammed, A., Djekoun, A., Bouzerzour, H. et Hassous, K. (2005). Genotype x year interaction of barley (*Hordeum* spp.) grain yield and its relationship with plant height, earliness and climate factors under semi-arid growth conditions. *Dirasat*. 32: 239-247
- Bensari, M., Calmés, J. et Viala, G. (1990). Répartition du carbone fixé par photosynthèse entre l'amidon et le saccharose dans la feuille de Soja. Influence d'un déficit hydrique. *Plant Physiol. Biochem.* 28 : 113-121
- Berllinger Y, Bensaoud A, Larher F (1991). Physiological significance of proline accumulation, a trait of use to breeding for stress tolerance. In: Acevedo, E., Conesa, A.P., Monneveux, P. and

- Srivastava, J.P. (Eds). Physiology Breeding of winter cereals for stressed Mediterranean environments. Montpellier, France, 55:449-458.
- Berry, P. et Berry, S. (2015). Understanding the genetic control of lodging-associated plant characters in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica* 205: 671-689.
- Bewley, J.D. et Larsen, K.M.(1980). Cessation of protein synthesis in water-stressed pea roots and maize mesocotyls without loss of polyribosomes. Effects of lethal and non-lethal water stress. *Journal of Experimental Botany* 31: 1245–1256.
- Bilgrami, S.S., Fakheri, B.A., Razavi, K., Mahdinezhad, N., Tavakol, E., Ramandi, H.D., Ghaderian, M. et Shariati, J.V. (2018). Evaluation of agro-morphological traits related to grain yield of Iranian wheat genotypes in drought-stress and normal irrigation conditions. *Aust. J. Crop Sci.* 12: 738-748
- Blomstedt C.K., Gianello R.D., Gaff D.F., Hamill J.D. & Neale A.D. (1998a) Differential gene expression in desiccation-tolerant and desiccation-sensitive tissue of the resurrection grass *Sporobolus stapfianus*. *Australian Journal of Plant Physiology* 25, 937–946
- Blottière, M.J. (2003). Cahier du centre de l'Algérie IX. Les productions algériennes. Chapitre Premier. Les productions agricoles.1. Les céréales. Publications du comité national métropolitain du centenaire de l'Algérie, Algérie, 95 p.
- Blum, A. (1988). Plante breeding for stress environments. *CRC Press. Eds.* 223
- Blumenthal, C.S., Bekes, F., Gras, P.W., Barlow, E.W.R. et Wrigley, C.W. (1995). Identification of wheat genotypes tolerant to the effects of heat stress on grain quality. *Cereal Chem.* 72(6) : 539-544.
- Boenisch, M.J. et Schäfer, W. (2011). *Fusarium graminearum* forms mycotoxin producing infection structures on wheat. *BMC Plant Biol.* 11:110
- B euf, F. (1932). Contribution à l'étude du bl  dans le milieu nord-africain (Tunisie).
- Bonjean, A.P., Angus, W.J. et van Ginkel, M. (2016). The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding; Lavoisier: Paris, France; Vol 3.
- Bordes, J., Branlard, G., Oury, F. X., Charmet, G. et Balfourier, F. (2008). Agronomic characteristics, grain quality and flour rheology of 372 bread wheats in a worldwide core collection. *Journal of Cereal Science* 48 : 569–579.
- Borghi, B., Corbellini, M., Ciaffi, M., Lafiandra, D., De Stefanis, E., Sgrulletta, D., Boggini, G. et Di Ponzio, N. (1995a). Effects of heat shock during grain filling on grain quality of bread and durum wheats. *Aust. J. Agric. Res.* 46: 1365-80.
- Borghi, B., Giordani, G., Corbellini, M., Vaccino, P., Guermandi, M. et Toderi, G., (1995b). Influence of crop rotation and fertiliser treatments on wheat bread-making quality. *Eur. J. Agron.* 4(1) : 37-45.
- Borrelli, G.M., Troccoli, A., Di Fonzo, N. et Fares, C. (1999). Durum Wheat Lipoyxygenase Activity and Other Quality Parameters that Affect Pasta Color. *Cereal Chem.* 76: 335–340.

- Botwright Acuna, T.L., He, X. et Wade, L.J. 2012. Temporal variation in root penetration ability of wheat genotypes through thin wax layers in contrasting water regimes and in the field. *Field Crops Research* 138: 1–10.
- Bowerman, A.F., Byrt, C.S., Roy, S.J., Whitney, S.M., Mortimer, J.C., Ankeny, R.A., Gilliam, M., Zhang, D., Millar, A.A., Rebetzke, G.J., Pogson, B.J. (2023). Potential abiotic stress targets for modern genetic manipulation. *Plant Cell*. 35(1):139-161.
- Bozzini, A. (1988). Origin, distribution, and production of durum wheat in the world. Dans Fabriani G. et C. Lintas (éd). *Durum Chemistry and Technology*. AACC (Minnesota), États-Unis. p. 1-16.
- Brabant, C. & Häner L.L. (2016). Influence de la fumure azotée et de son fractionnement sur la qualité boulangère du blé. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2): 88–97
- Bravo-Peña, F. et Yoder, L. (2024). Agrobiodiversity and smallholder resilience: A scoping review. *Journal of Environmental Management* 351 : 119882.
- Bray, E. et Ziegler, P. (1989). Biosynthesis and degradation of starch in higher plants. *Plant Physiol. And plant mol. Bio.* 40: 95-117.
- Breshears, D.D., Fontaine, J.B., Ruthrof, K.X., Field, J.P., Feng, X., Burger, J.R., Law, D.J., Kala, J. et Hardy, G.E.S.J. (2021). Underappreciated plant vulnerabilities to heat waves. *New Phytologist* 231: 32–39.
- Campalans, A., Messeguer, R., Goday, A. et Pagès, M. (1999). Plant responses to drought, from ABA signal transduction events to the action of the induced proteins. *Plant Physiology and Biochemistry* 37(5): 327-340
- Campbell, S.A. et Close, T.J. (1997) Dehydrins: genes, proteins, and association with phenotypic traits. *New Phytol* 137: 61–74
- Campos-Avelar, I., Montoya-Martínez, A. C., Villa-Rodríguez, E. D., Valenzuela-Ruiz, V., Ayala Zepeda, M., Parra-Cota, F. I., et al. (2023). The mitigation of phytopathogens in wheat under current and future climate change scenarios: next-generation microbial inoculants. *Sustainability* 15:15250.
- Carboni, G. (2011). Evaluation of Conservation Tillage and Rotation with Legumes as Adaptation and Mitigation Strategies of Climate Change on Durum Wheat in Sardinia. Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Sassari, Sassari, Italy.
- Casal, J.J. et Balasubramanian, S. (2019). Thermomorphogenesis. *Annu. Rev. Plant Biol.* 70: 321-346.
- Cattivelli, L., Delogu, G., Terzi, V. et Stanca, A.M. (2002). Progress in barley breeding. *Genetic Improvement of Field Crops*. G.A. Slafer (Eds.) Marcel Dekker, New York, pp. 95-181.
- Ceccarelli, S. et Grandos, S. (1992). Sélection environnement et environnemental sensivity in barley. *Euphytica* 57 : 157-167.
- Chadouli, A. et Mohamed, D.H. (2015). L'irrigation d'appoint du blé. El Harrach, Algeria : Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chaker, A. (2003). Etude de l'effet des stress thermiques (chaleur et froid) sur quelques paramètres physiologiques et biochimiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire. Magistère. Univ. Annaba.
- Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. et Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 4: 287–291.
- Chandra, K., Prasad, R., Thakur, P., Madhukar, K. et Prasad, L.C. (2017). Heat tolerance in wheat-a key strategy to combat climate change through molecular markers. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6(3): 662-675
- Chávez, V.G., Camacho, C.M.A., Figueroa, L.P., Fuentes, D.G., Félix, F.J.L. et Villa, A.B.A. (2015). Baroyeca Oro C2013 : nueva variedad de trigo duro para su cultivo en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6 : 421-425.
- Chen, D., Richardson, T., Chai, S., McIntyre, C.L., Rae, A.L. et Xue, G.P. (2016). Drought-Up-Regulated TaNAC69-1 is a Transcriptional Repressor of TaSHY2 and TaIAA7, and Enhances Root Length and Biomass in Wheat. *Plant and Cell Physiology* 57(10): 2076–2090
- Chen, L., Hao, L., Condon, A.G. et Hu, Y.G. (2014). Exogenous GA3 application can compensate the morphogenetic effects of the GA-responsive dwarfing gene Rht12 in bread wheat. *Plos one* (9) e86431.
- Chen, L., Phillips, A.L., Condon, A.G., Parry, M.A. et Hu, Y.G. (2013). GA-responsive dwarfing gene Rht12 affects the developmental and agronomic traits in common bread wheat. *Plos one* (8) e62285.
- Chen, M., Sun, L., Wu, H., Chen, J., Ma, Y., Zhang, X., Du, L., et al. (2014). Durable field resistance to wheat yellow mosaic virus in transgenic wheat containing the antisense virus polymerase gene. *Plant Biotechnol. J.* 12: 447-456
- Chen, X.M. (2005). Epidemiology and control of stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) on wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology* 27(3): 314–337.
- Christopher, M., Chenu, K., Jennings, R., Fletcher, S., Butler, D. et Borrell, A. (2018). QTL for stay-green traits in wheat in well-watered and water-limited environments. *Field Crops Res.* 217: 32–44
- Chuan, L., He, P., Jin, J., Li, S., Grant, C., Xu, X. et al. (2013). Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China. *Field Crops Res.* 146:96–104.
- Ciaffi, M., Tozzi, L., Borghi, B., Corbellini, M. et Lafiandra, D. (1995). Effect of heat shock during grain filling on gluten protein composition of bread wheat. *J. Cereal Sci.* (in press).
- Clarke, F.R., Clarke, J.M., DePauw, R.M., Fernandez, M.R., Fox, S., Gilbert, J., Humphreys, G., Knox, R.E., McCaig, T.N., Procnier, D., Sissons, M. et Somers, D. (2005). Strategic approach to mitigating weather induced defects of wheat quality. *Euphytica* 143:285–290
- Clarke, J.M., Clarke, F.R. et Pozniak, C.J. (2010). Forty-six years of genetic improvement in *Canadian durum* wheat cultivars. *Can. J. Plant Sci.* 90: 791–801.

- Claude, M. et Nicolas, B. (2009). La stimulation des défenses naturelles des plantes : Un vaccin végétal. *Perspectives Agricoles* 355 : 36- 37.
- Close, T.J. (1996) Dehydrins: emergence of a biochemical role of a family of plant dehydration proteins. *Physiol Plant* 97: 795–803
- Cooper, J.K., Ibrahim, A.M.H., Rudd, J., Hays, D., Malla, S. et Baker, J. (2013). Increasing hard winter wheat yield potential via synthetic hexaploid wheat: II. Heritability and combining ability of yield and its components. *Crop Sci.* 53: 67-73
- Copeland, L.O. et McDonald, M.B. (2001). Principles of Seed Science and Technology. *Springer Nature*.
- Corbineau, F. (1995). Le contrôle de la germination des semences par l'environnement, La vie des Sciences.
- Cossani, C.M. et Reynolds M. P. (2012) Physiological traits for improving heat tolerance in wheat. *Plant Physiology* 160: 1710-1718
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M. et al. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Clim. Change* 8: 972–980.
- D'Egidio, M.G., Mariani, B.M. et Novaro, P. (1993). Influence of raw material characteristics and drying technologies on pasta cooking quality: A review of our results. *Ital. Food Beverage Technol.* 1: 29–32.
- Daoura, B.G., Chen, L. et Hu, Y.G. (2013). Agronomic traits affected by dwarfing gene'Rht-5'in common wheat ('Triticum aestivum'L.). *Australian Journal of Crop Science* 7: 1270-1276.
- Datta, J., Mondal, T., Banerjee, A. et Mondal, N. (2011). Assessment of drought tolerance of selected wheat cultivars under laboratory condition. *J. Agri. Technol.* 7 : 383–393.
- Day, A. et Intalap, S. (1970). Some effects of soil moisture stress on the growth of wheat (*Triticum aestivum* L. em Thell.) . *Agronomy Journal* 62: 27-29.
- Day, L., Augustin, M.A., Batey, I.L. et Wrigley, C.W. (2006). Wheat-Gluten Uses and Industry Needs. *Trends Food Sci. Technol.* 17: 82–90.
- Deepika, M., & Anil, G. (1999). Transcript levels of genes encoding various glycolytic and fermentation enzymes change in response to abiotic stress. *Plant Sci*, 146, 41-51.
- Déjardin, A., Sokolov, L. et Kleczkowski, L. (1999). Sugar/osmoticum levels modulate differential abscisic acid-independent expression of two stress-responsive sucrose synthase genes in *Arabidopsis*. *Biochemical Journal* 344 : 503-509.
- Derbal, N. (2015). Etude de la variation spatiotemporelle de certaines caractéristiques technologiques de quelques variétés de blé dur cultivées en Algérie. Doctorat dissertation, Université de Annaba, Algérie. 89 pp.
- DeWitt, N., Guedira, M., Lauer, E., Sarinelli, M., Tyagi, P. et Fu, D.L. (2020). Sequence-based mapping identifies a candidate transcription repressor underlying awn suppression at the B1 locus in wheat. *New Phytol.* 225: 326–339.

- Dexter, A.R. et Bird, N.R.A. (2001). Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research* 57: 203-212.
- Dexter, J.E. & Matsuo, R.R. (1977) Spaghetti-making quality of developing durum wheats. *Canadian Journal of Plant Science* 57: 7–16.
- Di Fonzo, N., Campanile, R.G., Stoppelli, M.C., Spano, G., Rascio, A., Russo, M., Trono, D., Padalino, L., Laus, M., De Vita, P., Troccoli, A., Flagella, Z., Shewry, P.R. et Lawlor D. (2000). Resistance to abiotic stresses in durum wheat: Which ideotype?. Zaragoza : CIHEAM, p : 215-225 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 40)
- Dias, A.S. et Lidon, F.C. (2009). Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat, under heat stress after anthesis. *Journal of Agronomy and Crop Science* 195(2): 137-147
- Dick, J.W. (1988). Evaluation of durum wheat for bread. Atti Simposio "Il grano duro per la panificazione". CESOET Ed., p. 175. Troina (EN), Italy.
- Djermoun, A. (2009). Etude sur La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie*. Université of Chlef, Algérie. 1: 45-53.
- Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B. et Roger-Estrade, J. (2006). L'agronomie aujourd'hui. *Quae, Versailles Cedex* : 114-118.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants : definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Hortic.* 196: 3–14.
- Duan, H., Zhu, Y., Li, J., Ding, W., Wang, H., Jiang, L. et Zhou, Y. (2017). Effects of drought stress on growth and development of wheat seedlings. *Int. J. Agric. Biol.* 19: 1119–1124.
- Dubos, P, Courtois .H, Pannetier .B, Wilhelm .F. K, Zaikin .A. D, Schön .G; (2001). Josephson critical current in a long mesoscopic SNS junction. *Physical Review B*, 63(6), 064502.
- Dziki, D. et Laskowski, J. (2005). Wheat kernel physical properties and milling process. *Acta Agrophysica* 6: 59–71.
- Eade, E.A. (2013). Association mapping for yield, yield components and drought tolerance-related traits in spring wheat grown under rainfed and irrigated conditions [Colorado State University].
- Elbaum, R., Zaltzman, L., Burgert, I., et Fratzl, P. (2007). The role of wheat awns in the seed dispersal unit. *Science* 316: 884–886.
- Elouafi, I. (2003). Quantitative Trait Loci (QTL) determination of grain quality traits in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). Ph.D. thesis. Cordoba University, Cordoba, 186p.
- EPAR (Evan School Policy Analysis and Research). (2016). Wheat Value Chain : Ethiopia.
- EU. European Union (2020) Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Fadoul, H.E., Martínez Rivas, F.J., Neumann, K., Balazadeh, S., Fernie, A.R. et Alseekh, S. (2021). Comparative molecular and metabolic profiling of two contrasting wheat cultivars under drought stress. *Int. J. Mol. Sci.* 22: 13287.
- Falconer, D.S. (1985). *Introductions to Quantitative Genetics*. Longman, London.
- Fang, Y. et Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cell. Mol. Life Sci.* 72:673–689.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. et Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Sustainable agriculture* 153-188.
- Farooq, M.U., Cheema, A.A., Ishaq, I. et Zhu, J. (2018). Correlation and genetic component studies for peduncle length affecting grain yield in wheat. *Int. J. Adv. Appl. Sci.* 5: 67-75
- Fathi, M., Mohebbi, M. et Koocheki, A. (2016). Introducing *Prunus cerasus* gum exudates: Chemical structure, molecular weight, and rheological properties. *Food Hydrocoll.* 61 : 946–955.
- Feillet, P. (2000). *Le grain de blé : composition et utilisation* : Editions Quae. ISB, 2012. Industrie de la semoulerie de blé dur. P233.
- Feldman, M. (2001). Origin of Cultivated Wheat. Dans Bonjean A.P. et W.J. Angus (éd.) *The World Wheat Book: a history of wheat breeding*. Intercept Limited, Andover, Angleterre p 3-58.
- Fellah, A., Bemahammed, A., Djekoune, A. et Bouzerzour, H. (2002). Sélection pour améliorer la tolérance au stress abiotique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Actes de l'IAV Hassan II* 22 : 161-170
- Felsche, E., Böhnisch, A., Poschlod, B. et Ludwig, R. (2024). European hot and dry summers are projected to become more frequent and expand northwards. *Communications Earth and Environment* 5:410.
- Ferreira, L.A.R, Silva, S. R. et Kölln, O. T. (2021). Wheat yield and nitrogen utilization efficiency affected by urea coated with NBPT urease inhibitor and environmental conditions in Brazilian Rhodic Oxisols. *Int. J. Plant Prod.* 16: 313–328.
- Ferrise, R., Moriondo, M. et Bindi, M. (2011). Probabilistic assessments of climate change impacts on durum wheat in the Mediterranean region. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11: 1293–1302.
- Fiala, V., Boutin, J.P., Barry, P. et Derridj, S. (1993). Les métabolites de surface foliaire (phylloplan) : présence et rôle dans les relations plante-insecte. *Acta Botanica Gallica*, 140(2): 207-216.
- Figliolia, A., Benedetti, A., Izza, C., Indiati, R., Rea, E., Alianiello, F., Canali, S., Biondi, F.A., Pierandrei, F. et Moretti R. (1994). Effects of fertilization with humic acid on soils and plant metabolism: A multidisciplinary approach. *Proceedings of the 6th International Meeting of the International Humic Substances Society*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, pp. 579–584

- Finlay, K. et Wilkinson, G. (1963) The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Crop Pasture Sci.* 14 : 742-754
- Fischer, R.A. et Maurer, R. (1976). Crop temperature modification and yield potential in a dwarf spring wheat. *Crop Science* 16: 855–859.
- Fischer, R.A., Villareal, R.C. et Klatt, A.R. (1985). Physiological limitations to producing wheat in semi-tropical and tropical environments and possible criteria. *Wheats for More Tropical Environments*, CIMMYT. 209–230.
- Fischer, T., Gonzalez, F.G. et Miralles, D.J. (2024). Breeding for increased grains/m² in wheat crops through targeting critical period duration: a review. *Field Crops Research* 316: 109497.
- Flohr, B.M., Hunt, J.R., Kirkegaard, J.A. et Evans, J.R. (2017). Water and temperature stress define the optimal flowering period for wheat in south-eastern Australia. *Field Crops Research* 209: 108-119
- Fones, H. et Gurr, S. (2015). The impact of Septoria tritici Blotch disease on wheat: An EU perspective. *Fungal Genetics and Biology* 79: 3–7.
- Frantová, N., Rábek, M., Elzner, P., Středa, T., Jovanović, I., Holková, L., Martinek, P., Smutná, P. et Prášil, I.T. (2022). Different Drought Tolerance Strategy of Wheat Varieties in Spike Architecture. *Agronomy*, 12: 2328.
- Frey, K.J. (1981) Plant breeding II. *Iowa Univ Press* 497 p
- Fu Jiu, C., Dao Qi, Y. et Quing Sheng, W. (1995). Physiological effects of humic acid on drought resistance of wheat (in Chinese), *Yingyong Shengtai Xuebao* 6: 363–367.
- Fu, B., Wang, K., Dupuis, B., Taylor, D. et Nam, S. (2017). Kernel vitreousness and protein content: Relationship, interaction and synergistic effects on durum wheat quality. *J. Cereal Sci.* 78: 2–9.
- Gaines, C.S., Finney, P.L. et Raubenthaler, G. (1996). Milling and baking qualities of some wheat developed for Eastern or North-western Regions of the United States and grown at both locations. *Cereal Chem.* 73: 521-525.
- Gallais, A. (1977) Amélioration des populations, méthodes de sélection et création de variétés. I. Synthèse sur les problèmes généraux et sur les bases théoriques pour la sélection récurrente intrapopulation. *Ann. Amélior. Plant* 27: 281-329
- Gao, F.M., Wen, W.E., Liu, J.D., Rasheed, A., Yin, G.H. et Xia, X.C. (2015). Genome-wide linkage mapping of QTL for yield components, plant height and yield-related physiological traits in the Chinese wheat cross Zhou 8425B/Chinese Spring. *Front. Plant Sci.* 6:1099.
- Garatuza-Payan, J., Argentel-Martinez, L., Yépez, E.A. et Arredondo, T. (2018). Initial response of phenology and yield components of wheat (*Triticum durum* L., CIRNO C2008) under experimental warming field conditions in the Yaqui Valley. *Peer J.* 6: e5064.
- Gavrilyuk, M.M. (2016). Priority for short-stemmed high-intensity varieties of winter wheat.
- Gendreau, S. (2022). Blés : un tour d'eau après floraison reste encore efficace. *Perspectives Agricoles*.

- Gent, M.P. et Kiyomoto, R.K. (1997). Physiological and agronomic consequences of Rht genes in wheat. *Journal of crop production* 1: 27-46.
- Gerber, J.S., Ray, D.K., Makowski, D., et al. (2024). Global spatially explicit yield gap time trends reveal regions at risk of future crop yield stagnation. *Nature Food* 5: 125–135.
- Ghiti, I. (2020). Le grain du blé : qualité technologique. Mémoire de Master. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Université des Frères Mentouri Constantine 1.
- Gill, S., Loprinzi, C.L., Sargent, D.J., Thomé, S.D., Alberts, S.R., Haller, D.G., Benedetti, J., Francini, G., Shepherd, L.E. et Francois Seitz, J. (2004). Pooled analysis of fluorouracil-based adjuvant therapy for stage II and III colon cancer: who benefits and by how much? *J. Clin. Oncol.* 22: 1797-1806
- Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W.S., Courtin, C.M., Gebruers, K. et Delcour, J.A. (2005). Wheat flour constituents: How they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in Food Science & Technology* 16: 12-30
- Gol, L., Tomé, F. et Von Korff, M. (2017). Floral transitions in wheat and barley: interactions between photoperiod, abiotic stresses, and nutrient status. *Journal of Experimental Botany* 68 : 1399–1410.
- Griffiths, S., Simmonds, J., Leverington, M., Wang, Y., Fish, L., Sayers, L., Alibert, L., Orford, S., Wingen, L. et Snape, J. (2012). Meta-QTL analysis of the genetic control of crop height in elite European winter wheat germplasm. *Mol. Breed.* **29**: 159–171.
- Grignac, P. (1981). Comparaison de variétés anciennes et modernes de blé tendre à divers niveaux d'intensification dans un environnement méditerranéen. *C.R. Acad. Agric. de France* 67 : 1434-1453.
- Guo, R., Shi, L. X., Jiao, Y., Li, M. X., Zhong, X. L., Gu, F. X., Liu, Q., Xia, X. et Li, H. R. (2018). Metabolic responses to drought stress in the tissues of drought-tolerant and drought-sensitive wheat genotype seedlings. *AoB Plants* **10**: 1–13.
- Gupta, P.K., Balyan, H.S., Sharma, S. et Kumar, R. (2020). Genetics of yield, abiotic stress tolerance and biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theor. Appl. Genet.* 133(5): 1569-1602.
- Hadibi, A., Chekired-Bouras, F.Z. et Mouhouche, B. (2009). "Analyse de la mise en œuvre du plan national de développement agricole dans la première tranche du périmètre de la Mitidja Ouest" in *Économie d'eau en systèmes irrigués au Maghreb*, Proceedings of the fourth regional workshop, 26-28 May 2008, Mostaganem (Algeria).
- Halmer, P. (2008). Seed Technology and Seed Enhancement. *Acta Hortic.* 771 : 17–26.
- Hamli, S., Kadi, K., Bekhouche, I., Harnane, I., Addad, D., Abdelmalek, A. et Harrat, N. (2020). Involvement of Abiotic Stress Tolerance Mechanisms in Biotic Stress Tolerance in Durum Wheat. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 12(2): 738–54.
- Hammad, A.R. & Ali, A.M. (2014). Physiological and biochemical studies on drought tolerance of wheat plants by application of amino acids and yeast extract. *Ann. Agric. Sci.* 59(1): 133-145.

- Hansen, J., Sato, M., et Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(37): E2415-E2423.
- Hanson, H., Borlaug, N.E. et Anderson, R.G. (1982). Wheat in the third world. *Boulder: Westview Press*.
- Hare, P.D. et Cress, W.A. (1997). Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regul.* 21: 79-102
- Hazmoune, T. (2000). Erosion of durum wheat varieties grown in Algeria. *Perspectives* 40: 291-294.
- He, Y., Fang, J., Xu, W. et Shi, P. (2022). Substantial increase of compound droughts and heatwaves in wheat growing seasons worldwide. *International Journal of Climatology* 42(10) : 5038–5054.
- Hedden, P. (2003). The genes of the Green Revolution. *Trends Genet.* **19**: 5–9
- Hede, A.R., Skovmand, B., Reynolds, M.P., Crossa, J., Vilhelmsen, A.L. et Stølen, O. (1999) Evaluating genetic diversity for heat tolerance traits in Mexican wheat landraces. *Genetic Resource Crop Evolution* 46: 37-45
- Henning, F.A., Mertz, L.M., Jacob, E.A., Jr., Dorneles, R.M., Fiss, G. et Dejalma, P.Z. (2010). Composição química e mobilização de reservas em sementes de soja de alto e baixo vigor. *Bragantia* 69(3): 727-733.
- Hernández-Espinosa, N., Mondal, S., Autrique, E., Gonzalez-Santoyo, H., Cross, J., Huerta-Espino, J., Singh, R.P. et Guzmán, C. (2018). Milling, processing and end-use quality traits of CIMMYT spring bread wheat germ- plasm under drought and heat stress. *Field Crops Res.* 215:104–112
- Hickey, L.T., Hafeez, A.N., Robinson, H., Jackson, S.A., Leal-Bertioli, S.C.M., Tester, M., Gao, C., Godwin, I.D., Hayes, B.J. et Wulff, B.B.H. (2019). Breeding crops to feed 10 billion. *Nat. Biotechnol.* 37(7): 744-754.
- Hodgkin, T. et Hegarty, TW. (1978). Genetically determined variation in seed germination and field emergence of Brassica oleracea. *Annals of Applied Biology* 88 : 407–413.
- Hopkins, W.G. (2003). Physiologie végétale. *De Boeck Supérieur*, 532p
- Hovmøller, M.S., Yahyaoui, A.H., Milus, E.A. et Justesen, A.F. (2008), Rapid global spread of two aggressive strains of a wheat rust fungus. *Molecular Ecology* 17: 3818-3826.
- Howarth, C. Ashraf, J., M. et Harris, P.J.C. (2005). Genetic improvements of tolerance to high temperature. *Abiotic Stresses: Plant Resistance Through Breeding and Molecular Approaches*, Howarth Press, New York, NY, USA.
- Hsiao, T.C., O'toole, J.C., Yambao, E.B. et Turner, N.C. (1984). Influence of osmotic adjustment on leaf rolling and tissue death in rice. *Plant Physiol.*
- Huang, X., et Han, B. (2014). Natural variations and genome-wide association studies in crop plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 65:531–551.

- Huerta-Espino, J., Singh, R. P., Germán, S., McCallum, B.D., Park, R.F., Chen, W.Q., Goyeau, H. et al. (2011). Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Euphytica* 179: 143–160.
- Hussain, N., Abid, M. et Raza, I. (2004). Response of wheat (*Triticum aestivum*) to phosphorus in the presence of Farmyard manure. *Indus J. Plant Sci.* 3 : 298-302
- I.S.T.A. International rules for seed testing. (2015). Basserdorf, Switzerland: International Seed Testing Association.
- I.T.C.F. Institut Techniques des céréales et des fourrages. (2001). Contrôle de la qualité des céréales et des protéagineux. *Lavoisier*, France : 286.
- I.T.G.C. (2015). L'irrigation d'appoint du blé.
- Ibrahim, A.U. (2019). Genetic variability, Correlation and Path analysis for Yield and yield components in F6 generation of Wheat (*Triticum aestivum* Em. Thell.). *IOSR J. Agric. Vet. Sci.* 12: 17-23
- Ingram, J. et Bartlq, D. (1996). The molecular basis of dehydration tolerance in plants. *Plant Physiol. And plant mol. Biolo.* 47: 377-403.
- Ismail, A.M. et Horie, T. (2017) Genomics, Physiology, and Molecular Breeding Approaches for Improving Salt Tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 68 : 405-434
- ITGC (2011). La culture intensive du blé.
- IWGSC, (2014). Génome de référence du blé tendre (*Triticum aestivum*)
- Jankovics, T., Komáromi, J., Fábán, A., Jäger, K., Vida, G. et Kiss, L. (2015). New insights into the life cycle of the wheat powdery mildew: direct observation of ascospore infection in *Blumeria graminis f. sp. tritici*. *Phytopathology* 105: 797-804
- Javed, H.M., Naeem, A., Shaukat, S., Makhdoom, M., Ghafoor, I., Shahzadi, N., Hussain, F., Tipu, A.L.K., Imran, M., Rehman, A., Majeed, T. et Akber, A.R. (2024). Exploring the Relationship Between Plant Height and Yield-Contributing Attributes of Wheat in Drought Conditions. *Biol. Clin. Sci. Res. J.* 854.
- Jeandet, P., Formela-Luboińska, M., Labudda, M. et Morkunas, I. (2022). The role of sugars in plant responses to stress and their regulatory function during development. *Int. J. Mol. Sci.* 23: 5161.
- Jenner, C.F., Ugalde, T.D. et Aspinall, D. (1990). The physiology of starch and protein deposition in the endosperm of wheat. *Functional Plant Biology* 18: 211-226
- Jiménez González, A.T. (1995). Milling process of durum wheat. In *Durum Wheat Quality in the Mediterranean Region*; Di Fonzo, N., Kaan, F., Nachit, M., Eds.; *CIHEAM*: Zaragoza, Spain; pp. 43–51.
- Johansson, E., Branlard, G., Cuniberti, M., Flagella, Z., Hüskén, A., Nurit, E., Peña, R.J., Sissons, M. et Vazquez, D. (2020). Wheat Quality For Improving Processing And Human Health. *Springer International Publishing, Cham.* 171-204.

- Johnson, R.R. et Moss, D.N. (1976). Effect of water stress on 14 CO_2 fixation and translocation in wheat during grain filling. *Crop Sci.* 16: 697–701.
- Jonard, P. (1964). Etude comparative de la croissance de deux variétés de blé tendre. *Ann. Amélior. Plant.* 14 (2).
- Joseph, T. et Morrisson, M. (2006). Nanotechnology in Agriculture and Food.
- Josephides, C.M. (1982). Studies on gluten strength and quality in *Triticum turgidum* L, var. durian, Se. D. Thesis, North Dakota State University, Fargo, ND.
- Juliana, P., Poland, J., Huerta-Espino, J., Shrestha, S., Crossa, J., Crespo-Herrera, L., Toledo, F.H., Govindan, V., Mondal, S., Kumar, U., et al. (2019). Improving grain yield, stress resilience and quality of bread wheat using large-scale genomics. *Nat. Genet.* 51:1530–1539.
- Jung, J.H., Domijan, M., Klose, C., Biswas, S., Ezer, D., Gao, M., Khattak, A.K., Box, M.S., Charoensawan, V., Cortijo, S. et al. (2016). Phytochromes function as thermosensors in *Arabidopsis*. *Science* 354: 886-889
- Kauffman, G.L., Kneivel, D.P. et Watschke, T.L. (2007). Effects of a biostimulant on the heat tolerance associated with photosynthetic capacity, membrane thermostability, and polyphenol production of perennial ryegrass. *Crop Sci.* 47 : 261-267
- Kendal, E. (2019). Comparing durum wheat cultivars by genotype $\times$ yield $\times$ trait and genotype $\times$ trait biplot method, Turkey. *Chil. j. agric. res.* 79(4).
- Kermode, A.R. & Bewley, J.D. (1989). Developing Seeds of *Ricinus communis* L., When Detached and Maintained in an Atmosphere of High Relative Humidity, Switch to a Germinative Mode without the Requirement for Complete Desiccation. *Plant Physiol.* 90(2): 702-7.
- Khakwani, A.A., Dennett, M.D. et Munir, M. (2011). Drought tolerance screening of wheat varieties by inducing water stress conditions. *S.J.S.T.* 33: 135–142.
- Khaldoun, A., CherY, J. et Monneveux, P. (1990). Etudes des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez l'orge. *Agronomie* 10 : 369 - 379.
- Kiani, P.S., Grieu, P., Maury, P., Hewezi, T., Gentzbittel, L. et Sarrafi, A. (2007). Genetic variability for physiological traits under drought conditions and differential expression of water stress-associated genes in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Theor. Appl. Genet.* 114: 193-207
- Kibret, M., Devkota, K. P., Ben Bakrim, W., Ezzariai, A., Terefe, H., Karouach, F. et al. (2024). Plant growth promoting rhizobacteria mitigate drought and salinity stresses, and improve the physiological and agronomic performances in crops: a systematic review. *Cab Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.* 19.
- Kirkman, M.A., Shewry, P.R. et Mifflin, B.J. (1982). The effect of nitrogen nutrition on the lysine content and protein composition of barley seeds. *J Sci Food Agric.* 33:115–127.
- Kocheva, K., Nenova, V., Karceva, T., Petrov, P., Georgiev, G., Börner, A. et Landjeva, S. (2014). Changes in water status, membrane stability and antioxidant capacity of wheat seedlings

carrying different Rht-B1 dwarfing alleles under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* 200: 83-91.

Korkhova, M., Drobitko, A., Panfilova, A. et Smirnova, I. (2022b). The role of winter wheat plant height in the formation of grain yield depending on varietal characteristics and weather conditions. *Scientific Horizons* 25(11): 41-50.

Korkhova, M., et Mykolaichuk, V. (2022a). Influence of weather conditions on the duration of interphysical periods and yield of durum winter wheat. *Scientific Horizons* 25(2): 36-46.

Kristensen, K., Schelde, K. et Olesen, J.E. (2011). Winter wheat yield response to climate variability in Denmark. *J. Agric. Sci.* 149 : 33-47

Kumar, A., Raman, A., Yadav, S., et al. 2021. Genetic gain for rice yield in rainfed environments in India. *Field Crops Research* 260: 107977.

Kumar, N., Kulwal, P. L., Balyan, H. S. et Gupta, P. K. (2007). QTL mapping for yield and yield contributing traits in two mapping populations of bread wheat. *Mol. Breed.* 19: 163–177.

Kumar, R., Mukherjee, S. et Ayele, B.T. Molecular aspects of sucrose transport and its metabolism to starch during seed development in wheat: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 36 (2018), pp. 954-967

Langridge & Reynolds. (2021). Breeding for drought and heat tolerance in wheat. *Theoretical and applied genetics*.

Larkindale, J. et Knight, M. R. (2002) Protection against heat stress-induced oxidative damage in *Arabidopsis* involves calcium, abscisic acid, ethylene, and salicylic acid. *Plant Physiology* 128: 682-695

Laurent, H. et Sané, P. (2007). Transfert d'eau et d'énergie. *Bioclimatologie Concept et application*. 246.

Lazaridi, E., Kapazoglou, A., Gerakari, M., Kleftogianni, K., Passa, K., Sarri, E., Papasotiropoulos, V., Tani, E. et Bebeli, P.J. (2024). Crop Landraces and Indigenous Varieties: A Valuable Source of Genes for Plant Breeding. *Plants* 13: 758.

Le Lamer, O. et Rousselin, X. (2011). The durum wheat market. In *Studies of France AgriMer*; Bova, F., Ed.; France AgriMer: Montreuil-sous-Bois CEDEX, France,; pp. 1–46.

Lepoivre, P. (2003). Phytopathologie: Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. *De Boeck Supérieur* 27-28.

Lewis, S., Faricelli, M.E., Appendino, M.L., Valárik, M. et Dubcovsky, J. (2008). The chromosome region including the earliness per se locus Eps-Am1 affects the duration of early developmental phases and spikelet number in diploid wheat. *J. Exp. Bot.* 59: 3595-3607

Lexhaller, B., Colgrave, M.L. et Scherf, K.A. (2019). Characterization and Relative Quantitation of Wheat, Rye, and Barley Gluten Protein Types by Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry. *Front. Plant Sci.* 10:1530.

- Li, F.M., Yan, X., Li, F.R., et Guo, A.H. (2001). Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semiarid environment. *Agric. Water Manage.* 47: 25–35.
- Li, X.J., Wang, H.G., Li, H.B., Zhang, L.Y., Teng, N.J. et Lin, Q.Q. (2006). Awns play a dominant role in carbohydrate production during the grain-filling stages in wheat (*Triticum aestivum*). *Physiol. Plantarum* 127: 701–709.
- Li, Y., Gao, J., Zhang, R., Song, G., Zhang, S. et Li, W. (2020). Identification of new QTL for yield-related traits in Chinese landrace and elite wheat varieties through a genome-wide linkage mapping. *Euphytica* 216(8):1–14.
- Li, Y.F., Wu, Y., Hernandez-Espinosa, N. et Pena R.J. (2013). Heat and drought stress on durum wheat: responses of genotypes, yield, and quality parameters. *J. Cer. Sci.* 57: 398–404
- Liller, C.B., Walla, A., Boer, M.P., Hedley, P., Macaulay, M. et Effgen, S. (2017). Fine mapping of a major QTL for awn length in barley using a multiparent mapping population. *Theor. Appl. Genet.* 130: 269–281.
- Limbalkar, O.M., Meena, V.K., Singh, M. et Sunilkumar, V.P. (2018). Genetic Improvement of Wheat for Biotic and Abiotic Stress Tolerance. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 7(12): 1962-1971.
- Liscano, J. F., Wilson, C. E., Norman-Jr, R.J. et Slaton, N. A. (2000). Zinc Availability to Rice from Seven Granular Fertilizers. *AAES Res. Bull.* 963: 1-31.
- Liu, C., Khodaei, M., Lopes, M.S., Sansaloni, C., Dreisigacker, S., Sukumaran, S. et Reynolds, M. (2019). Multi-environment QTL analysis using an updated genetic map of a widely distributed Seri× Babax spring wheat population. *Mol. Breed.* 39 : 1-15.
- Liu, D.T., Zhang, X., Jiang, W., Li, M., Wu, X.J., Gao, D.R., Bie, T.D. et Lu C.B. (2022). Influence of high-molecular-weight glutenin subunit deletions at the Glu-A1 and Glu-D1 loci on protein body development, protein components and dough properties of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Integrative Agriculture* 21:1867-1876
- Liu, T., Shi, X., Wang, J., Song, J., Xiao, E. et Wang, Y. (2021). Mapping and characterization of QTLs for awn morphology using crosses between “Double-Awn” wheat 4045 and awnless wheat Zhiluowumai. *Plants* 10: 2588.
- Lollato, R.P., Jaenisch, B.R. et Silva, S. R. (2021). Genotype-specific nitrogen uptake dynamics and fertilizer management explain contrasting wheat protein concentration. *Crop Sci.* 61: 2048–2066.
- Lopes, M.S., El-Basyoni, I., Baenziger, P.S., Singh, S., Royo, C., Ozbek, K., Aktas, H., Ozer, E., Ozdemir, F. et Manickavelu, A. (2015). Exploiting Genetic Diversity from Landraces in Wheat Breeding for Adaptation to Climate Change. *J. Exp. Bot.* 66: 3477–3486.
- Lu, Y., Liu, H., Chen, Y., Zhang, L., Kudus, K. et Song, J. (2022). Effects of drought and salt stress on seed germination of ephemeral plants in desert of northwest China. *Front. Ecol. Evol.* 10: 1026095.

- Luo, F., Deng, X., Liu, Y. et Yan, Y. (2018). Identification of phosphorylation proteins in response to water deficit during wheat flag leaf and grain development. *Bot. Stud.* 59 : 1-17
- Lupini, A., Preiti, G., Badagliacca, G., Abenavoli, M.R., Sunseri, F., Monti, M. et Bacchi, M. (2021). Nitrogen use efficiency in durum wheat under different nitrogen and water regimes in the mediterranean basin. *Front. Plant Sci.* 11: 607226.
- Lutts, S., Kinet, J.M. et Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Ann. Bot.* 78: 389-398.
- Lyapunova, O.A. (2017). Intraspecific Classification of Durum Wheat: New Botanical Varieties and Forms. *Russian Journal of Genetics: Applied Research* 7(7): 757–762
- Ma, J., Tu, Y., Zhu, J., Luo, W., Liu, H., Li, C., Li, S., Liu, J., Ding, P. et Habib, A. (2020). Flag leaf size and posture of bread wheat: genetic dissection, QTL validation and their relationships with yield-related traits. *Theor. Appl. Genet.* 133: 297-315
- Ma, Y., Szostkiewicz, I., Korte, A., Moes, D., Yang, Y., Christmann, A. et Grill, E. (2009). Regulators of PP2C phosphatase activity function as abscisic acid sensors. *Science* 324(5930):1064-8.
- Madhava Rao, K.V., Raghavendra, A.S. et Janardhan Reddy, K. (2006). Physiology and molecular biology of stress tolerance in plants. Netherlands: *Springer*.
- Mahpara, S., Hussain, S.T., Iqbal, J., Noorka, I.R. et Salman, S. (2018). Analysis of generation means for some metric plant traits in two wheat (*Triticum aestivum* L.) hybrids. *Pure Appl. Biol.* 7: 93-102
- Mahpara, S., Rehmani, M.I.A., Hussain, S., Iqbal, J., Qureshi, M.K., Shehzad, M.A. et Dar, J.S. (2017). Heterosis for some physio-morphological plant traits in spring wheat crosses. *Pure Appl. Biol.* 6: 1103-1110
- Mahpara, S., Zainab, A., Ullah, R., Kausar, S., Bilal, M. et Latif, M.I. (2022). The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *PLoS ONE* 7: e0262937.
- Maignan, V., Bernay, B., Géliot, P. et Avice, J.C. (2020). Biostimulant effects of glutacetine® and its derived formulations mixed with n fertilizer on post-heading n uptake and remobilization, seed yield, and grain quality in winter wheat. *Front. Plant Sci.* 11: 607615.
- Maignan, V., Géliot, P. et Avice, J.C. (2021). Glutacetine® biostimulant applied on wheat under contrasting field conditions improves grain number leading to better yield, upgrades n-related traits and changes grain ionome. *Plants* 10:456.
- Mäkinen, H., Kaseva, J., Trnka, M., Balek, J., Kersebaum, K., Nendel, C., Gobin, A., Olesen, J., Bindi, M. et Ferrise, R. (2018). Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field Crops Res.* 222: 209–217.
- Malik, K.A. et Azam, F. (1985). Effect of humic acid on wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling growth. *Environ. Exp. Bot.* 25: 245–252.

- Mandato, S., de Vries, H. et Mayer, C. (2015). Potential innovations for the traditional durum wheat food sector. In Proceedings of the 29th EFFOST International Conference, Athens, Greece, 10–12 November.
- Manhou, K., Taghouti, M., Moussadek, R., Elyacoubi, H., Bennani, S., Zouahri, A., Ghanimi, A., Sanad, H., Oueld Lhaj, M., Hmouni, D. et Dakak, H. (2025). Performance, Agro-Morphological, and Quality Traits of Durum Wheat (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum* Desf.) Germplasm: A Case Study in Jemâa Shaïm, Morocco. *Plants* 14(10): 1508.
- Mansour, H.A., El, S., Mohamed, S. et Lightfoot, D. A. (2020). Molecular studies for drought tolerance in some Egyptian wheat genotypes under different irrigation systems. *Open Agriculture* 5(1): 280–290.
- Mao, H., Jian, C., Cheng, X., Chen, B., Mei, F., Li, F., Zhang, Y., Li, S., Du, L., Li, T., et al. (2022a). The wheat ABA receptor gene TaPYL1-1B contributes to drought tolerance and grain yield by increasing wateruse efficiency. *Plant Biotechnol. J.* 20:846–861.
- Mao, H., Jiang, C., Tang, C., Nie, X., Du, L., Liu, Y., Cheng, P., Wu, Y., Liu, H., Kang, Z. et Wang, X. (2023). Wheat adaptation to environmental stresses under climate change: Molecular basis and genetic improvement. *Molecular Plant* 16(10): 1564-1589.
- Marček, T., Hamow, K.A., Végh, B., Janda, T. et Darko, E. (2019). Metabolic response to drought in six winter wheat genotypes. *PLoS ONE* 14: e0212411.
- Marcos Filho, J. (2015). Fisiologia de sementes de plantas cultivadas (2a ed.). Londrina: ABRATES.
- Martínez-Moreno, F., Ammar, K. et Solís, I. (2022). Global Changes in Cultivated Area and Breeding Activities of Durum Wheat from 1800 to Date: A Historical Review. *Agronomy* 12(5): 1135.
- Masoudi, B., Mardi, M., Hervan, E.M., Bihamta, M.R., Naghavi, M.R. et Nakhoda, B. (2019). Study of QTLs linked to awn length and their relationships with chloroplasts under control and saline environments in bread wheat. *Genes Genom* 41 : 223–231.
- Maurel, C. et Chrispeels, M. J. (2001). Aquaporins: a molecular entry into plant water relations. *Plant Physiology* 125(1): 135–138.
- Mazliak, P. (1982). Physiologie végétale Tome II croissance et développement. 177-179.
- Mazouz, L. (2006). Etude de la contribution des paramètres phénomorphologiques dans l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Dsf.) dans l'étagé bioclimatique semi-aride. Magister dissertation. Dept. Agr. Fac. Sci. UHL, Batna, Algeria
- Mega, R., Abe, F., Kim, S.K., Tsuboi, Y., Tanaka, K., Kobayashi, H., et al. (2019). Tuning water use efficiency and drought tolerance in wheat using abscisic acid receptors. *Nat Plants*. 5(2):153–9
- Mei, F., Chen, B., Du, L., Li, S., Zhu, D., Chen, N., Zhang, Y., Li, F., Wang, Z., Cheng, X., et al. (2022). A gain-of-function allele of a DREB transcription factor gene ameliorates drought tolerance in wheat. *Plant Cell* 34: 4472–4494.

- Mekhlouf, A. (2009). Study of the genetic variability of durum wheat (*Triticum durum*, Desf) for cold tolerance. *Doctoral thesis. Institut National Agronomique El-Harrach Alger*. 81p.
- Michaletti, A., Naghavi, M. R., Toorchi, M., Zolla, L. et Rinalducci, S. (2018). Metabolomics and proteomics reveal drought-stress responses of leaf tissues from spring-wheat. *Scientific Reports* 81: 1–18.
- Mickelbart, M.V., Hasegawa, P.M. et Bailey-Serres, J. (2015). Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to crop yield stability. *Nat. Rev. Genet.* 16(4): 237-51.
- Miège, É. (1950). Les principales espèces et variétés de Blé cultivées en Afrique du Nord. In: *Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*, 30^e année, bulletin n°327-328, Janvier-février. pp. 16-38.
- Migliorini, P., Spagnolo, S., Torri, L., Arnoulet, M., Lazzerini, G. et Ceccarelli, S. (2016). Agronomic and quality characteristics of old, modern and mixture wheat varieties and landraces for organic bread chain in diverse environments of northern Italy. *Eur J Agron.* 79:131–141
- Mo, F., Sun, M. et Yan Liu, X. (2016). Phenological responses of spring wheat and maize to changes in crop management and rising temperatures from 1992 to 2013 across the Loess Plateau. *Field Crop Res* (196): 337-347.
- Mohamed, C. (2012). "How to reconcile climate change and agricultural development in Algeria", *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement* [Online], 14-15.
- Monneveux, P. et Belhassen, E. (1996). The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant Growth Regulation* 20: 85 - 92.
- Moriondo, M., Giannakopoulos, C. et Bindi, M. (2011). Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic change* 104(3-4): 679-701.
- Moriondo, M., Giannakopoulos, C. et Bindi, M. (2011). Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Clim. Change* 104: 679-701.
- Motzo, R., et Giunta, F. (2002). Awnedness affects grain yield and kernel weight in near-isogenic lines of durum wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 53: 1285–1293.
- Nabors, M. (2008). Réponse des plantes aux hormones et aux stimuli environnementaux. *Biologie végétale. Structure, fonctionnement, écologie et biotechnologie*. Ed. Pearson Education. France. 247p.
- Nagarajan, S. (2006). Quality characteristics of Indian wheat. In *Future of Flour*; Popper, L., Schäfer, W., Freund, W., Eds.; *AgriMedia GmbH*: Clenze, Germany; pp. 79–86.
- Nehe, A., Akin, B., Sanal, T., Evlice, A.K., Ünsal, R., Dinçer, N., Demir, L., Geren, H., Sevim, I. et Orhan, Ş. (2019). Genotype x environment interaction and genetic gain for grain yield and grain quality traits in Turkish spring wheat released between 1964 and 2010. *PLoS One* 14: e0219432
- Nemati, F., Ghanati, F., Ahmadi Gavlighi, H. et Sharifi, M. (2018). Comparison of sucrose metabolism in wheat seedlings during drought stress and subsequent recovery. *Biologia Plantarum* 62: 595–599.

- Nemmar, M. (1980). Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) : Étude de l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique. Thèse D.A.A. ENSA. Montpellier, 65 p.
- Neyhart, J.L., Lorenz, A.J. et Smith, K.P. (2019). Multi-Trait Improvement by Predicting Genetic Correlations in Breeding Crosses. *G3 Genes Genomes Genet.* 9: 3153–3165.
- Novoselovic, D., Baric, M., Drezner, G., Gunjaca, J. et Lalic, A. (2004). Quantitative Inheritance of some wheat plant traits. *Gen. and Molecular Biol.* 27(1): 92-98
- Ochagavía, H., Prieto, P., Zikhali, M., Griffiths, S. et Slafer, G.A. (2019). Earliness per se by temperature interaction on wheat development. *Sci. Rep.* 9: 2584
- Ojha, A. et Ojha, B.R. (2020). Assessment of Morpho-Physiological, Yield and Yield Attributing Traits Related to Post Anthesis Drought in Wheat Genotypes Under Rainfed Condition in Rampur, Chitwan. *Int. J. Appl. Sci. Biotechnol.* 8: 323-335
- Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Samuel, C., Fatai, A., Magaji, U., Kareem, I., Kamarudin, Z. S., Muhammad, I. et Kolapo, K. (2019). Drought resistance in rice from conventional to molecular breeding: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**(14): 3519.
- Orlov. (1923) The géographique centre of origin and the area of cultivation of durum wheat. *Bulletin of Applied Botany Genetics and Pant. Breeding* 13: 369–459.
- Østerberg, J.T., Xiang, W., Olsen, L.I., Edenbrandt, A.K., Vedel, S.E., Christiansen, A., Landes, X., Andersen, M.M., Pagh, P., Sandøe, P., et al. (2017). Accelerating the domestication of new crops: feasibility and approaches. *Trends Plant Sci.* 22:373–384.
- Ozen, H. (1986). Effect on bread quality of addition of durum clear flour to bread flour (In Turkish). Se. D. Thesis. University of Ankara, Turkey.
- Pang, Y., Liu, C., Wang, D., St Amand, P., Bernardo, A., Li, W., He, F., Li, L., Wang, L., Yuan, X., et al. (2020). High-resolution genome-wide association study identifies genomic regions and candidate genes for important agronomic traits in wheat. *Mol. Plant* 13:1311–1327.
- Pantha, S., Kilian, B., Özkan, H., Zeibig, F. et Frei, M. (2024). Physiological and Biochemical Changes Induced by Drought Stress during the Stem Elongation and Anthesis Stages in the *Triticum* Genus. *Environ. Exp. Bot.* 228: 106047.
- Parent, B., Bonneau, J., Maphosa, L., Kovalchuk, A., Langridge, P. et Fleury, D. (2017). Quantifying Wheat Sensitivities to Environmental Constraints to Dissect Genotype × Environment Interactions in the Field. *Plant Physiology* 174(3): 1669–1682
- Parker, G.D., Chalmers, K.J., Rathjen, A.J. et Langridge, P. (1998). Mapping loci associated with flour color in wheat. *Theor. Appl. Genet.* 97: 238-245.
- Pataco, I.M., Mourinho, M.P., Oliveira, K., Santos, C., Pelica, J., Pais, I.P., Ramalho, J.C., Leitão, A.E., Campos, P.S., Lidon, F.C., Reboredo, F.H. et Pessoa, M. F. (2015). Durum wheat (*Triticum durum*) biofortification in iron and definition of quality parameters for the industrial production of pasta – A review. *Emir. J. Food Agric.* 27: 242–249.

- Patil, R.M., Tamhankar, S.A., Oak, M.D., Raut, A.L., Honrao, B.K. et Rao, V.S. (2013). Mapping of QTL for agronomic traits and kernel characters in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Euphytica* 190: 117–29.
- Payne, P.I., Nightingale, M.A., Krattiger, A.F. et Holt, L.M. (1987). The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties. *J. Sci. Food Agric.* 40: 51-65.
- Pecquet, C. et Laurere, M. (2003). New allergens in hydrolysates of wheat proteins, *Revue française d'allergologie et d'immunologie Clinique*, Volume 43, p21-23.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L. et Hakala, K. (2011). Crop responses to temperature and precipitation according to long-term multi-location trials at high-latitude conditions. *J. Agric. Sci.* 149: 49-62
- Peña, R.J. & Pfeiffer, W.H. (2005). Breeding methodologies and strategies for durum wheat quality improvement. In *Durum Wheat Breeding: Current Approaches and Future Strategies. Food Products Press, New York* 2: 663–702.
- Pena-Bautista, R.J., Hernandez-Espinosa, N., Jones, J.M., Guzman, C. et Braun, H.J. (2017). Wheat-based foods. Their global and regional importance in the food supply, nutrition and health. *Cereal Food World* 62(5): 231–249.
- Perry, D.A. (1980). The concept of seed vigour and its relevance to seed production techniques. In: Hebblethwaite PD, ed. *Seed production*. London : Butterworths, 585–591.
- Piccolo, A., Nardi, S. et Concheri, G. (1992). Structural characteristics of humic substances as regulated to nitrate uptake and growth regulation in plant systems. *Soil Biol. Biochem.* 24: 373–380.
- Pietro-Souza, W., Bonfim-Silva, E.M., Schlichting, A.F. et Silva, M.C. (2013). Desenvolvimento inicial de trigo sob doses de nitrogênio em Latossolo Vermelho de Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17(6) : 575-580.
- Posch, B. C., Hammer, J., Atkin, O. K., Bramley, H., Ruan, Y. L., Trethowan, R. et Coast, O. (2022). Wheat photosystem II heat tolerance responds dynamically to short-and long-term warming. *Journal of Experimental Botany* 73: 3268–3282.
- Prasad, P.V.V., Bheemanahalli, R. et Jagadish, S.V.K. (2017). Field crops and the fear of heat stress: Opportunities, challenges and future directions. *Field Crops Research* 200: 114-121
- Prathap, V., Ali, K., Singh, A., Vishwakarma, C., Krishnan, V., Chinnusamy, V. et Tyagi, A. (2019). Starch accumulation in rice grains subjected to drought during grain filling stage. *Plant Physiology and Biochemistry* 142: 440-451
- Prieto, P., Ochagavía, H., Savin, R., Griffiths, S. et Slafer, G.A. (2018). Physiological determinants of fertile floret survival in wheat as affected by earliness per se genes under field conditions. *Eur. J. Agron.* 99: 206-213
- PROFERT. (2018). Notice technique des céréales.

- Qayyum, A., Inamullah et Jan, S.A. (2025). QTL mapping for stay-green and peduncle length in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Intl. J. Agric. Biol.* 34:340108.
- Qiu, D., Hu, W., Zhou, Y., Xiao, J., Hu, R., Wei, Q., Zhang, Y., Feng, J., Sun, F., Sun, J., et al. (2021). TaASR1-D confers abiotic stress resistance by affecting ROS accumulation and ABA signalling in transgenic wheat. *Plant Biotechnol. J.* 19:1588–1601.
- Qiu, Y., Amirkhani, M., Mayton, H., Chen, Z. et Taylor, A.G. (2020). Biostimulant Seed Coating Treatments to Improve Cover Crop Germination and Seedling Growth. *Agronomy* 10: 154.
- Quick, J.S. et Crawford, R.D. (1983). Bread baking potential of new durum wheat cultivars. Proc. 6th Int. Wheat Genetics Symp. p. 851. Kyoto, Japan.
- Rajanna, G.A., Suman, A. et Venkatesh, P. (2023). Mitigating drought stress effects in arid and semi-arid agro-ecosystems through bioirrigation strategies-A review. *Sustainability* 15: 3542.
- Ramanjulu, S. et Bartels, D. (2002). Drought- and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. *Plant, Cell & Environment* 25, 141–151.
- Rao, V.K., Mulvaney, S.J., Dexter, J.E., Edwards, N.M. et Peressini D. (2001). Stress-relaxation properties of mixograph semolina-water doughs from durum wheat cultivars of variable strength in relation to mixing characteristics, bread- and pasta-making performance. *J. Cereal Sci.* 34: 215.
- Ray, D.K., Gerber, J.S., MacDonald, G.K. et West. P.C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat. Commun.* 6.
- Razouk, R. (2018). Irrigation déficitaire régulée. *Agriculture du Maghreb* 113 : 66-67.
- Rebetzke, G.J., Ellis, M.H., Bonnett, D.G., Mickelson, B., Condon, A.G. et Richards, R.A. (2012). Height reduction and agronomic performance for selected gibberellin-responsive dwarfing genes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research* 126: 87-96.
- Rebetzke, G.J., Ellis, M.H., Bonnett, D.G., Condon, A.G., Falk, D. et Richards, R.A. (2011). The Rht13 dwarfing gene reduces peduncle length and plant height to increase grain number and yield of wheat. *Field Crops Res.* 124:323–331
- Rebetzke, G.J., Rattey, A.R., Farquhar, G.D., Richards, R.A. et Condon, A.G. (2013) Genomic regions for canopy temperature and their genetic association with stomatal conductance and grain yield in wheat. *Functional Plant Biology* 40: 14-33.
- Reyer, P., Leuzinger, S., Rammig, A., Wolf, A., Bartholomeus, R.P., Bonfante, A., de Lorenzi, F., Dury, M., Gloning, P. et Abou Jaoudé, R. (2013). A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global Change Biol.* 19 : 75-89
- Rezaei, E.E., Siebert, S., Hüging, H., Hüging, H. et Ewert, F. (2018). Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change. *Sci Rep* 8: 489.
- Ricards, R.A. (1983). Manipulation of area and its effects on grain yield in drought wheat. *Agric. Res.* 34: 23 - 31.

- Rizwan, M., Aman, M. K., Haider, M. J., Hafiz; Saqib, M. et Malik, A. (2024). Wheat under pressure: assessing the influence of climate change on Pakistan's agricultural landscape. Authorea.
- Rodríguez-Calcerrada, J., Shahin, O., Carmen del Rey, M. et Rambal, S. (2011). Opposite changes in leaf dark respiration and soluble sugars with drought in two Mediterranean oaks. *Funct. Plant Biol.* 38: 1004–1015.
- Roelfs, A. P. (1992). Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management. *Cimmyt*.
- Rosa, M., Prado, C., Podazza, G., Hilal, M. et Interdonato, R. (2009). Soluble sugars - Metabolism, sensing and abiotic stress. *Plant signaling and behaviour* 4(5): 388-393.
- Rozova, M.A. et Pocornyak, V.P. (2014). Durum wheat cultivation and breeding in the Altai Russian region. In : Porceddu E. (ed.), Damania A.B. (ed.), Qualset C.O. (ed.). Proceedings of the International Symposium on Genetics and breeding of durum wheat. Bari : CIHEAM, p. 345-349 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 110)
- Sadak, M. (2022). Nitric oxide and hydrogen peroxide as signaling molecules for better growth and yield of wheat plant exposed to water deficiency. *Egyptian Journal of Chemistry* 65: 209-223
- Sadak, M.S., El-Enany, M., Bakry, B., Abdallah, M. et El-Bassiou. H.M.S. (2020). Signal molecules improving growth, yield and biochemical aspects of wheat cultivars under water stress. *Asian Journal of Plant Sciences* 19: 35-53
- Saeidia, M., Moradib, F. et Abdolic, M. (2017). Impact of drought stress on yield, photosynthesis rate, and sugar alcohols contents in wheat after anthesis in semiarid region of Iran. *Arid Land Res. Manag.* 31(2): 204–218.
- Sangoi, L., Berns, A.C., Almeida, M.L., Zanin, C.G. et Schweitzer, C. (2007). Características agronômicas de cultivares de trigo em resposta à época da adubação nitrogenada de cobertura. *Ciência Rural* 37(6): 1564-1580.
- Sangoi, L., Ernani, P.R. et Silva, P.R.F. (2007). Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillage system in a soil with high organic matter content. *R. Bras. Ci. Solo.* 31: 507-517.
- Sarda, X., Vansuyt, G., Tousse, D., Cassedelbart, F. et Lamaze, T. (1992). Les signaux racinaires de la régulation stomatique. In " tolérance a la sécheresse des céréales en zones méditerranéennes ". Ed. INRA. Paris. 1993 .75 - 79.
- Sayar, R., Bchini, H., Mosbahi, M. et Ezzine, M. (2010). Effects of salt and drought stresses on germination, emergence and seedling growth of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *J. Agric. Res.* 5: 2008-2016.
- Sbrussi, C.A.G. et Zucareli, C. (2014). Germinação de sementes de milho com diferentes níveis de vigor em resposta à diferentes temperaturas. *Semina Ciências Agrárias* 35(1) : 215-226.

- Schmitt, A., Koch, E., Stephan, D., Kromphardt, C., Jahn, M. et Krauthausen, H.J. (2009). Evaluation of non-chemical seed treatment methods for the control of *Phoma valerianellae* on lamb's lettuce seeds. *J. Plant Dis. Prot.* 116: 200–207.
- Schulze, W.X., Gleixner, G., Kaiser, K., Guggenberger, G., Mann, M. et Schulze, E.D. (2005). A proteomic fingerprint of dissolved organic carbon and of soil particles. *Oecologia* 142: 335–343.
- Scotti, G. (1997). Analyses physicochimiques, partie I, analyse physique des grains du blé tendre et du blé dur, chap 5, P 76-119. In : (guide pratique d'analyse dans les industries des céréales), P 79
- Scully, B.T., Nagata, R.T., Cherry, R.H., Trenholm, L.E. et Unruh, J.B (2009). Registration of 'Pristine' zoysiagrass. *J Plant Registr* 3:65–68
- Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. et Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants* 10: 259.
- Selote, D.S. et Khanna-Chopra, R. (2006). Drought acclimation confers oxidative stress tolerance by inducing co-ordinated antioxidant defense at cellular and subcellular level in leaves of wheat seedlings. *Physiologia Plantarum* 127: 494-506.
- Semenov, M.A. et Shewry, P.R. (2011). Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe. *Sci. Rep.* 1
- Servalesa. (2023). Biostimulants, the key for modern agriculture.
- Shewry, P.R. (2007). Improving the protein content and composition of cereal grain. *J Cereal Sci.* 46:239–250.
- Shewry, P.R., Tatham, A.S., Forde, J., Kreis, M., Miflin, B.J. (1986). The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *J Cereal Sci.* 4:97–106.
- Shirdelmoghanloo, H., Cozzolino, D., Lohraseb, I. et Collins, N.C. (2016). Truncation of grain filling in wheat (*Triticum aestivum*) triggered by a brief heat stress during early grain filling-association with senescence responses and reductions in stem reserves. *Functional Plant Biology* 43(10): 919-930
- Silva, R.R., Benin, G., Silva, G.O., Marchioro, V.S., Almeida, J.L. et Matei, G. (2011). Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de trigo em diferentes épocas de semeadura, no Paraná. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 46(11) : 1439-1447.
- Singh, H.V., Kumar, S.N., Ramawat, N. et Harit, R.C. (2017). Response of wheat varieties to heat stress under elevated temperature environments. *Journal of Agrometeorology* 19(1) :17
- Sirat, N. (2018). La production céréalière et la sécurité alimentaire en Algérie. *Le Quotidien D'ORAN*. Rubrique : Opinion, page07
- Sissons, M. (2008). Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Foods* 2: 75–90.

- Sissons, M., Cutillo, S., Marcotuli, I. et Gadaleta, A. (2021). Impact of durum wheat protein content on spaghetti in vitro starch digestion and technological properties. *J. Cereal Sci* 98: 103156.
- Sissons, M.J., Egan, N.E. et Gianibelli, M.C. (2005). New insights into the role of gluten on durum pasta quality using reconstitution method. *Cereal Chem.* 82: 601–608.
- Skylas, D., Mackintosh, J., Cordwell, S., Basseal, D., Walsh, B., Harry, J., Blumenthal, C., Copeland, L., Wrigley, C. et Rathmell, W. (2000). Proteome approach to the characterisation of protein composition in the developing and mature wheat-grain endosperm. *Journal of Cereal Science* 32: 169-188.
- Slafer, G.A., Whitewchurch, E.M., Reynolds, M. P., Ortiz-Monasterio, J. I. et Nab, A.M.C. (2001). Manipulating wheat development to improve adaptation, *Application of Physiology in Wheat Breeding, CIMMYT*.160–170.
- Slama, A. (2002). Étude comparative de la contribution des différentes parties du plant de blé dur dans la contribution du rendement en grains en irrigué et en conditions de déficit hydrique. Thèse de doctorat en biologie, Université de Tunis, Tunisie.
- Smart, L.B., Moskal, W.A., Cameron, K.D. et Bennett, A.B. (2001). MIP genes are down-regulated under drought stress in *Nicotiana glauca*. *Plant and Cell Physiology* 42(6): 686–693.
- Soares, S., Pérez-Gregorio, R., Vilaça, R., Carvalho, S. M. P., Izsó, T. et Kasza, G. (2024). Microbiomes for the future of sustainable wheat production. *Open Access Gov.* 43 : 398–399.
- Souza, D.N., Silva, S.R., Marinho, J.L., Bazzo, J.H.B., Fonseca, I.C.B. et Zucareli, C. (2021). Wheat yield and seed physiological quality as influenced by seed vigor, nitrogen fertilization and edaphoclimatic conditions. *Semina: Ciênc. Agrár.* 42: 3581–3602.
- Souza, T.M., Prando, A.M., Takabayashi-Yamashita, C.R., Zucareli, C. et Hirooka, E.Y. (2019). Chemical characterization of wheat kernels naturally contaminated by deoxynivalenol-DON when cultivated under nitrogen management strategies. *Rev. Ciênc. Agron.* 50: 650–659.
- Spink, J., Berry, P., Wade, A. et White, E. (2004). Minimising chlormequat residues in harvested grain. Home-Grown Cereals Authority Research Project, HGCA, London 332, 44.
- Stetkiewicz, S., Menary, J, Nair, A., et al. (2023). Crop improvements for future-proofing European food systems: a focus-group-driven analysis of agricultural production stakeholder priorities and viewpoints. *Food and Energy Security* 12: e362.
- Sun, B.J., Sun, L.Y., Tugume, A.K. et al. (2013). Selection pressure and founder effects constrain genetic variation in differentiated populations of soilborne bymovirus Wheat yellow mosaic virus (*Potyviridae*) in China. *Phytopathology* 103: 949-959
- Sureshkumar, S., Dent, C., Seleznev, A., Tasset, C. et Balasubramanian, S. (2016). Nonsense-mediated mRNA decay modulates FLM-dependent thermosensory flowering response in *Arabidopsis*. *Nat. Plants* 2: 16055
- Sylvie, D., Ingrid, A., Nicholas, Birch, E., Elad, Y.N., Lombarkia, P., Couzi, P., Pierre, P. et Auger, J. (2011). Les sucres solubles, une opportunité pour l’agriculture durable ? Des

expérimentations menées sur maïs, tomate, pomme de terre et pommier. *PHYTOMA - La Defense des végétaux* N° 640 janvier

Szablińska-Piernik, J. & Lahuta, L.B. (2023). Polar metabolites profiling of wheat shoots (*Triticum aestivum* L.) under repeated short-term soil drought and rewatering. *Int. J. Mol. Sci.* 24: 8429.

Tabet-Aoul, M. (2010). Développement et environnement au Maghreb : contraintes et enjeux, pp. 66-70.

Tajibayev, D., Yusov, V.S., Chudinov, V.A., Mal'chikov, P.N., Rozova, M.A., Shamanin, V.P., Shepelev, S.S., Sharma, R., Tsygankov, V.I. et Morgounov, A.I. (2021). Genotype by environment interactions for spring durum wheat in Kazakhstan and Russia, *Ecological Genetics and Genomics*, Volume 21.

Takai, T., Adachi, S., Taguchi-Shiobara, F., Sanoh-Arai, Y., Iwasawa, N., Yoshinaga, S., Hirose, S., et al. (2013). A natural variant of NAL1, selected in high-yield rice breeding programs, pleiotropically increases photosynthesis rate. *Scientific Reports*, 3 : 1–11.

Tambussi, E.A., Bort, J., Guamet, J.J., Nogues, S. et Araus, J.L. (2007). The photosynthetic role of ears in C3 cereals: metabolism, water use efficiency and contribution to grain yield. *Crit. Rev. Plant Sci.* 26: 1–16.

Tanveer, Y., Yasmin, H., Nosheen, A., Farah, M.A. et Altaf, M.M. (2024). Synergizing *Bacillus halotolerans*, *Pseudomonas sihuiensis* and *Bacillus atrophaeus* with folic acid for enhanced drought resistance in wheat by metabolites and antioxidants. *BMC Plant Biol.* 24:1003.

Tao, F., Rötter, R.P., Palosuo, T., Díaz-Ambrona, C., Mínguez, M.I., Semenov, M.A., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Cammarano, D. et Hoffmann, H. (2017). Designing future barley ideotypes using a crop model ensemble. *Eur. J. Agron.* 82 : 144-162

Tatar, Ö. & Gevrek, M.N. (2008). Lipid peroxidation and water content of wheat. *Asian J. Plant Sci.* 7: 409–412.

Temagoult, M. (2009). Analyse de la variabilité de la réponse au stress hydrique chez des lignées recombinantes de Tournesol (*Helianthus annuus* L.). Thèse de Magistère Université Mentouri Constantine

Teng, Z., Chen, Y., Meng, S., Duan, M., Zhang, J., Ye, N. (2023). Environmental stimuli: a major challenge during grain filling in cereals. *International Journal of Molecular Sciences* 24: 2255.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. et Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 20260-20264.

Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. et Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(67): 1–7.

Timms, M.F., Bottomley, R.C., Richard, J., Ellis, S. et Schofield, J.D., (1981). The baking quality and protein characteristics of a winter wheat grown at different levels of nitrogen fertilisation. *J. Sci. Food Agric.* 32: 684-698.

- Tompa, P., Bánki, P., Bokor, M., Kamasa, P., Kovács, D., Lasanda, G. et Tompa, K. (2006). Protein–water and protein–buffer interactions in the aqueous solution of an intrinsically unstructured plant dehydrin: NMR intensity and DSC aspects. *Biophysical Journal* 91: 2243–2249.
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S.M., Volaire, F., Boone, A., et al. (2020). Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth Science Reviews* 210: 103348.
- Tran, L.S., Nakashima, K., Shinozaki, K. et Yamaguchi Shinozaki, K. (2007). Plant gene networks in osmotic stress response: from genes to regulatory networks. *Methods Enzymol.* 428: 109–128.
- Tricker, P. J., ElHabti, A., Schmidt, J. et Fleury, D. (2018). The physiological and genetic basis of combined drought and heat tolerance in wheat. *Journal of Experimental Botany* 69 : 3195–3210.
- Troccoli, A., Borrelli, G.M., De Vita, P., Fares, C. et Di Fonzo, N. (2000). Durum wheat quality: A multidisciplinary concept (review). *J. Cereal Sci.* 32: 99–113.
- Tubiello, F.N., Donatelli, M., Rosenzweig, C. et Stöckle, C.O. (2000). Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *Eur. J. Agron.* 13(2-3): 179-189.
- Tuhina-Khatun, M., Newaz, M.A. et Bari, M.A.A. (2007). Combining Ability and Heritability Estimates in F₂ Diallele Population of Spring Wheat under Interacting Environments. *Bangladesh J. Agric. Sci.* 34: 75–82.
- Turner, N.C. (1986). Adaptation to water deficits: A changing perspective. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 175-190.
- Turner, N.C. (1997). Further progress in crop water relations. *Adv. Agron.* 58 : 293-338.
- Turner, N.C., Wright, G.C. et Siddique, K.H.M. (2000). Adaptation of grain legumes (Pulses) to water-limited environments. *Advances in Agronomy* 71 : 193-231
- Tyagi, J., Ahmad, S. et Malik, M. (2022). Nitrogenous fertilizers: impact on environment sustainability, mitigation strategies, and challenges. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19(116) : 49–72.
- U.S.D.A Foreign Agricultural Service. (2015). Grain and Feed Annual; GAIN Report No: TR5016; Ankara, Turkey.
- Ugulu, I., Ahmad, K., Khan, Z.I., Munir, M., Wajid, K. et Bashir, H. (2021). Effects of organic and chemical fertilizers on the growth, heavy metal/metalloid accumulation, and human health risk of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28: 33–45.
- Ullah, A., Zhao, C., Zhang, M., Sun, C., Liu, X., Hu, J., Zeeshan, M., Zaid, A., Dai, T. et Tian Z. (2023). Nitrogen enhances the effect of pre-drought priming against post-anthesis drought stress by regulating starch and protein formation in wheat. *Physiologia Plantarum* 175: e13907

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Umeda, M., Hara, C., Matsubayashi, Y., Li, H.H., Liu, Q., Tadokoro, F., Aotsuka, S. et Uchimiya, H. (1994). Expressed sequence tags from cultured cells of rice (*Oryza sativa* L.) under stressed conditions: analysis of transcripts of genes engaged in ATP-generating pathways. *Plant Mol. Biol.* 25: 469-478.
- UNGA (UN General Assembly) (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A. Res. 70(1).
- Upadhyaya, N.M., Mago, R., Panwar, V., Hewitt, T., Luo, M. et Chen, J. (2021). Genomics accelerated isolation of a new stem rust avirulence gene–wheat resistance gene pair. *Nature Plants* 7 : 1220–1228.
- Velasco, R., Salamini et Bartlett, D. (1994). Dehydration and ABA increase mRNA levels and enzyme activity of cytosolic GAPDH in the resurrection plant. *Plant mol. Biol.* 26: 541-546.
- Visualcrossing. (2020). The Visual Crossing Weather. www.visualcrossing.com
- Vitti, A., Bevilacqua, V., Logozzo, G., Boichichio, R., Amato, M. et Nuzzaci, M. (2022). Seed Coating with *Trichoderma harzianum* T-22 of Italian Durum Wheat Increases Protection against *Fusarium culmorum*-Induced Crown Rot. *Agriculture* 12: 714
- Waha, K., Van Wijk, M.T., Fritz, S., See, L., Thornton, P.K., Wichern, J. et Herrero, M. (2018). Agricultural diversification as an important strategy for achieving food security in Africa. *Global Change Biology* 24(8) : 3390–3400.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M. et Foolad, M.R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany* 61(3): 199–223
- Wang, K., Taylor, D., Chen, Y., Suchy, J. et Fu, B.X. (2021). Effect of Kernel Size and Its Potential Interaction with Genotype on Key Quality Traits of Durum Wheat. *Foods* 10: 2992.
- Wang, K., Taylor, D., Chen, Y., Suchy, J. et Fu, B.X. (2021). Effect of Kernel Size and Its Potential Interaction with Genotype on Key Quality Traits of Durum Wheat. *Foods* 10: 2992.
- Wang, X., Cui, C., Xu, M., Cheng, B. et Zhuang, M. (2024). Key technologies improvements promote the economic-environmental sustainability in wheat production of China. *J. Clean. Prod.* 443:141230.
- Wang, Y., Hu, G., Liu, Z., Zhang, J., Ma, L., Tian, T.,...et Wang, X. (2022). Phenotyping in flower and main fruit traits of Chinese cherry [*Cerasus pseudocerasus* (Lindl.) G.Don]. *Scientia Horticulturae* 296: 110920.
- Wang, Z.Y., Deng, Z.Y., Kong, X.C., Wang, F., Guan, J.T. et Cui, D.D. (2022). InDels identification and association analysis with spike and awn Length in Chinese wheat mini-core collection. *Int. J. Mol. Sci.* 23: 5587.
- Wardlaw, I., Dawson, I., Munibi, P. et Fewster, R. (1989). The tolerance of wheat to high temperatures during reproductive growth. I. Survey procedures and general response patterns. *Australian Journal of Agricultural Research* 40(1): 1.

- Whittington, W.J. (1973). Genetic regulation of germination. In: Heydecker W, ed. *Seed ecology*. London: Butterworths, 5–30.
- Williams, P.C., El-Harameln, F.J., Nelson, W. et Srivastava, J.P. (1988). Evaluation of wheat quality for the baking of Syrian-type two-layered fiat breads. *J. Cereal Sci.* 7: 195.
- Wollenweber, B., Porter, J. R. et Schellberg, J. (2003). Lack of interaction between extreme high-temperature events at vegetative and reproductive growth stages in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189(3): 142–150
- Wu, X., Chang, X. et Jing, R. (2012). Genetic insight into yield-associated traits of wheat grown in multiple rain-fed environments. *PLoS ONE* 7: e31249.
- Xiao, J., Liu, B., Yao, Y. *et al.* (2022). Wheat genomic study for genetic improvement of traits in China. *Sci. China Life Sci.* 65: 1718–1775.
- Xynias, I.N., Mylonas, I., Korpetis, E.G., Ninou, E., Tsaballa A., Avdikos, I.D. et Mavromatis, A.G. (2020). Durum Wheat Breeding in the Mediterranean Region: Current Status and Future Prospects. *Agronomy* 10: 432.
- Yadav, S.K., Singh, A.K., Pandey, P., Singh, S., Yadav, S.K., Singh, A.K., Pandey, P. et Singh, S. (2015). Genetic Variability and Direct Selection Criterion for Seed Yield in Segregating Generations of Barley (*Hordeum Vulgare* L.). *Am. J. Plant Sci.* 6: 1543–1549.
- Yakhin, O.I., Lubyantsev, A.A., Yakhin, I.A. et Brown, P.H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Front. Plant Sci.* 7: 2049.
- Yan, W. et Holland, J. B. (2010). A heritability adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171(3) : 355-369.
- Yan, W. et Holland, J.B. (2010). A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171 : 355–369.
- Yang, D., Li, Y., Shi, Y., Cui, Z., Luo, Y., Zheng, M., Chen, J., Li, Y., Yin, Y. et Wang, Z. (2016). Exogenous cytokinins increase grain yield of winter wheat cultivars by improving stay-green characteristics under heat stress. *PLOS ONE* 11(5): e0155437
- Yang, J., Liu, P., Zhong, K., Ge, T., Chen, L., Hu, H., Zhang, T., Zhang, H., Guo, J., Sun, B. et Chen, J. (2022). Advances in understanding the soil-borne viruses of wheat: from the laboratory bench to strategies for disease control in the field. *Phytopathol. Res.* 4:27
- Yang, J., Zhang, J., Huang, Z., Zhu, Q. et Wang, L. (2000). Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil drying during grain filling of wheat. *Crop Sci.* 40: 1645–1655.
- Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Zhu, Q. et Liu, L. (2004). Activities of fructan- and sucrose-metabolizing enzymes in wheat stems subjected to water stress during grain filling. *Planta* 220: 331-343
- Yang, X., Tian, Z., Sun, L., Chen, B., Tubiello, F.N. et Xu, Y. (2017). The impacts of increased heat stress events on wheat yield under climate change in China. *Climatic Change* 140(3): 1-16

- Yang, Z., Cao, Y., Shi, Y., Qin, F., Jiang, C., and Yang, S. (2023). Genetic and molecular exploration of maize environmental stress resilience: Towards sustainable agriculture. *Mol. Plant* 17: 1674–S2052.
- Yao, H., Xie, Q., Xue, S., Luo, J., Lu, J. et Kong, Z. (2019). *HL2* on chromosome 7D of wheat (*Triticum aestivum* L.) regulates both head length and spikelet number. *Theor Appl Genet* 132(6):1789–97.
- Yokota, A., Takahara, K. et Akashi, K. (2006). Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. *Springer* : 15–39p.
- Zaheer, M.S., Ali, H.H., Soufan, W., Iqbal, R., Habib-Ur-rahman, M., Iqbal, J., Israr, M. et El Sabagh, A. (2021). Potential Effects of Biochar Application for Improving Wheat (*Triticum aestivum* L.) Growth and Soil Biochemical Properties under Drought Stress Conditions. *Land* 10: 1125.
- Zhai, H., Feng, Z., Li, J., Liu, X., Xiao, S., Ni, Z. et Sun, Q. (2016). QTL Analysis of Spike Morphological Traits and Plant Height in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Using a High-Density SNP and SSR-Based Linkage Map. *Frontiers in Plant Science. Sec. Plant Breeding* Vol 7.
- Zhang, B., Shi, W., Li, W., Chang, X. et Jing, R. (2013). Efficacy of pyramiding elite alleles for dynamic development of plant height in common wheat. *Molecular Breeding* 32 : 327- 338
- Zhang, Y., Zhao, Y., Li, T., Ni, C., Han, L., Du, P., and Xiao, K. (2022d). TaPYL4, an ABA receptor gene of wheat, positively regulates plant drought adaptation through modulating the osmotic stress associated processes. *BMC Plant Biol.* 22:423.
- Zhao, C., Bao, Y., Wang, X., Yu, H., Ding, A., Guan, C., Cui, J., Wu, Y., Sun, H. et Li, X. (2018). QTL for flag leaf size and their influence on yield-related traits in wheat. *Euphytica* 214 : 1-15
- Zhao, J., Zhang, S., Yang, X., Feng, K., Wang, G., Shi, Q., Wang, X., Yuan, X. et Ren, J. (2024). Hydrogen sulfide increases drought tolerance by modulating carbon and nitrogen metabolism in Foxtail Millet seedlings. *Agronomy* 14: 1080.
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., et Han, X. (2020). Water effects of water stress on photosynthesis. *yield* 1–19.
- Zhupina, A.Yu., Bazaliy, G.G., Usyk, L.O., Marchenko, T.Yu. et Lavrynenko, Yu.O. (2021). Inheritance of plant height by winter wheat hybrids of different ecological genetic origin under irrigation conditions. *Agrarian Innovations*, 10: 122-129.
- Zinn, K.E., Tunc-Ozdemir, M. et Harper, J.F. (2010). Temperature stress and plant sexual reproduction: uncovering the weakest links. *Journal of Experimental Botany* 61(7): 1959–1968
- Moriondo, M. et Bindi, M. (2007). Impact of climate change on the phenology of typical Mediterranean crops. *Ital. J. Agrometeorol.* 3: 5–12.
- Zitouni, Z. et Aïdaoui A. (2006). Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja. Mémoire

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

en vue de l'obtention du diplôme de magister en sciences agronomiques. Institut national agronomique EL-HARRACH, ALGER, 2005 – 2006.

ZOUAOUI, G. (1993). Etude en F1 et F2 des hybrides issus du croisement de 05 variétés de blé dur : détermination génétique des principaux caractères a intérêt agronomique. Mem. Ing. D'Etat. I.N.R.A El Harrach. Alger. 7p.

Zulfiqar, F., Moosa, A., Ali, H. M., Bermejo, N. F. et Munné-Bosch, S. (2024). Biostimulants: a sufficiently effective tool for sustainable agriculture in the era of climate change? *Plant Physiol. Biochem.* 211:108699.

Zweifel, C., Handschin, S., Escher, F. et Conde-Petit, B. (2003). Influence of high-temperature drying on structural and textural properties of durum wheat pasta. *Cereal Chem.* 80: 159–167.

ANNEXE

<https://doi.org/10.48047/AFJBS.7.5.2025.1008-1022>



African Journal of Biological Sciences

Journal homepage: <http://www.afjbs.com>



Research Paper

Open Access

Study of Morphological Parameters and Climate Change Vulnerability in Selected Durum Wheat Genotypes

Fatma Zohra Zaafour^{1*}, Amel Lazli², Nesrine Hacini¹, Choukri Barour³

¹ Chadli Bendjedid University. Faculty of Nature and Life Sciences. Laboratory of Functional and Evolutionary Ecology Research, PB 73, El-Tarf 36000, Algeria.

² Chadli Bendjedid University, Faculty of Nature and Life Sciences. Laboratory of Environmental Sciences and Agroecology, El-Tarf 36000, Algeria.

³ Mohamed Cherif Messaadia University. Faculty of Nature and Life Sciences. Laboratory of Aquatic and Terrestrial Ecosystems, Souk Ahras 41000, Algeria.

* Corresponding author: zorazaafour@gmail.com

Volume 7, Issue 5, May 2025

Received: 15 Mar 2025

Accepted: 05 Apr 2025

Published: 09 May 2025

[doi:10.48047/AFJBS.7.5.2025.1008-1022](https://doi.org/10.48047/AFJBS.7.5.2025.1008-1022)

Abstract

In three areas under Mediterranean climate: two in North-eastern Algeria (Tiffech and Sidi Fredj) and one in France (Montpellier), we conducted our study on some Durum wheat (*Triticum durum*) genotypes. The effect climatic conditions of said areas had on the performance of these genotypes was noted through changes in their morphological characteristics: average stem height, distance between the spreading leaf and the ear, ear length and awns length). The results obtained show significant interactions between the genotypes studied and the climatic parameters of the experimental sites. A positive correlation between stem height average and distance flag leaf-spike was recorded in all three study areas. Climatic conditions in each area affected spike length and awn length differently. In Sidi-Fredj, climatic conditions stimulated the development of the awns of majority of the cultivars studied compared to the other experimental sites. This conditioning can be interpreted as an adaptation mechanism of durum wheat genotypes to environmental stress.

Keywords: *Adaptation; Environment; Mediterranean; Stress; Triticum durum*

Introduction

The recent report by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) indicates that the global surface temperature has risen by 1.1°C compared with the pre-industrial period. Data for North Africa (NA) indicate that global warming is more pronounced in this region than the global average. In Algeria, according to the various scenarios, global warming has had a greater negative impact than elsewhere. While the global temperature increase in the 20th century was around 0.74°C, the rise in Algeria was between 1.5° and 2°C, more than double the global average. Global warming has also led to an estimated 10-20% drop in rainfall (Tabet-Aoul, 2010).

The increase in temperatures and their variability will lead to a shift and reduction in growing seasons, as well as an acceleration in soil degradation and the loss of productive land. As a result, agricultural production will see average reductions in cereal yields of between 5.7% and almost 14%. Climate change will also reduce vegetable yields by 10-30% by 2030 (Mohamed, 2012).

Cereals are the most important annual crops for Algerian agriculture (Hadibi et al., 2009). Durum wheat plays a central role in the country's economy. It covers half the surface area devoted to this activity (Mazouz, 2006). Research on winter wheat in the Mediterranean region shows that future increases in temperature will bring forward the onset of phenological stages, accompanied by a shortening of their duration (Mo et al. 2016, Rezaei et al. 2018), resulting in a lower accumulation of total dry matter and a reduction in yields (Tubiello et al., 2000, Giannakopoulos et al., 2009, Moriondo et al., 2011).

Algerian cereal crops are exposed throughout their development cycle to a series of hydric and thermal stresses. Water stress is always accompanied by, and interacts with, other abiotic stresses such as low and high temperatures and excess light (Mekhlouf, 2009). Lack of water remains the most limiting factor for durum wheat cultivation, although recent studies show that it is low winter and spring temperatures that are most detrimental to this crop (Annicchiarico, 2002, Annicchiarico et al., 2005). The aim of this article is to study the mechanisms by which durum wheat genotypes adapt to climate change. Our hypothesis was that the climatic conditions of each experimental site will affect, in different degrees, the morphological characteristics of the genotypes studied.

Materials and Methods

Plant material

29 genotypes of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) (Table 1) were grown in each of the three environments. Germplasm was supplied by the Melgueil DIASCOPE Experimental Unit (INRA Montpellier, France).

Table 1. List of studied Plant material

N°	Genotype	Code	N°	Genotype	Code	N°	Genotype	Code
01	AGATHE	AGA	11	CAR1924	CAR	21	KIEVLANKA	KIE
02	AGRIAL	AGR	12	CEEDUR	CEE	22	MEGADUR	MEG
03	ANEMONA	ANE	13	DAMOISO	DAM1	23	MONDUR	MON2
04	ARCOUR	ARC	14	DAMOISOX	DAM2	24	MONTFERRIER	MON1
05	ARDENOIS 918448	ARD2	15	DIABOLO	DIA	25	NEPAL	NEP
06	ARDENTE	ARD1	16	DURENTAL	DUR2	26	ROMEO	ROM
07	ARMET	ARM	17	DURGAMM	DUR1	27	TELEDUR	TEL
08	BEAUDUC	BEA	18	ECLADUR	ECL	28	TOMCLAIR	TOM2
09	BIODUR	BIO	19	ESCAL	ESC	29	TOMCLAIR800 891	TOM1
10	BRUMAIRE	BRU	20	JAGUAR800 858	JAG			

Experimental sites

The study was carried out in three environments that were clearly differentiated by altitude, rainfall and average temperature (Table 2), during the 2019/2020 season.

Field device and measured parameters

At each site, the experimental set-up consisted of similar randomized blocks with parallel plots (1.5m x 0.5m).

The following morphological parameters were measured on botillons of 10 plants taken from each plot: (1) *Average stem height* (measured in centimeters from the base of the stem to the base of the ear); (2) *Ear length* (measured from the base of the spike to the end of the last

spikelet excluding the awns); (3) *Awn length* (measured from the end of the last spikelet to the end of the awns); (4) *Distance Flag leaf – Spike* (measured from the ligule of the last leaf to the base of ear).

Table 2. Ecological factors of the experimental sites

	Location	Altitude (m)	MAX.T (°C)	AVR.T (°C)	MIN.T (°C)	Precipitation (mm)	MWS (Km\h)
Site 1: Grain seed multiplication farm El-ARIBI	Tiffech (Algeria)	919 m	41 °C	20.4 °C	-0.3 °C	1079 mm	58 Km\h
Site 2: Private farm dedicated to grain farming	Sidi Fredj (Algeria)	805 m	43 °C	20.5 °C	-2 °C	1134 mm	46 Km\h
Site 3: experimental unit INRAE-Diascope	Mauguio (France)	9 m	43 °C	20 °C	-2.9 °C	758 mm	59 Km\h

MAX.T: Maximum temperature, AVR.T: Average temperature, MIN.T: Minimum temperature, MWS: Maximum wind speed.

Statistical analysis

Genotype x environment interaction and the variation in behavior due to the genotypes were the subject of an analysis of variance, a multivariate analysis (correlation) and a Principal Component Analysis (PCA) using statistical and graphical calculation software R.

Analysis of variance allowed us to determine the differences between parameters means.

Correlation analysis was used to see interaction between different morphological parameters of the genotypes studied at the same experimental site.

Principal component analysis enabled us to interpret the difference in genotype x environment interaction depending on the study area and parameters studied.

Results and Discussion

Analysis of variance showed a significant effect for all traits relating to strand morphology. There was a highly significant genotype x environment interaction for all traits.

Effect of the environment on morphological parameters

The PCA representing the 4 variables studied shows that the average height and the distance between the ear and the last leaf are highly correlated, whereas the length of the awns and the ear do not appear to be correlated (Figure 1).

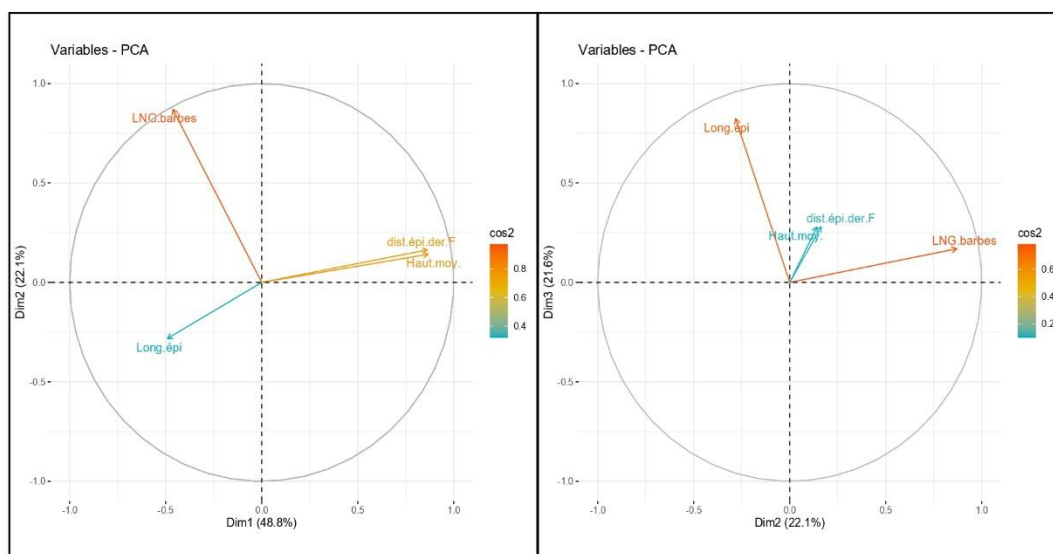


Figure 1. Results of the principal component analysis.

According to Figure 1, Dim 1 carries most of the information, which is explained mainly by stem height average and distance between the flag leaf and the spike. The variable contributing most to the explanation of Dim 2 is the awns length. Spike length explains Dim 3.

The 3 sites are well differentiated by the PCA integrating the total matrix of data (Figure 2, Figure 3).

Data measured at Montpellier are mainly on the right-hand side of the graph, with Sidi-Fredj on the left and the Tiffech site in between.

The stems average height and the distance between the spreading leaf and the shoot played an important role in the distribution of a large group of cultivars (Figure 2), in particular AGATHE, ARDENTE, MONTFERRIER (Montpellier), AGATHE, ECLADUR (Tiffech) and KIEVLANKA, DURGAMM, CAR1924 (Sidi-Fredj).

While, awn length contributes to the second-dimension formation (Figure 3). This makes it possible to distinguish a second group made up of DURGAMM, ROMEO, AGATHE (Sidi-Fredj), MONTFERRIER (Tiffech, Sidi-Fredj) and BEAUDUC (Sidi-Fredj, Tiffech).

The spur length parameter mainly explains the distribution on the third dimension, composed

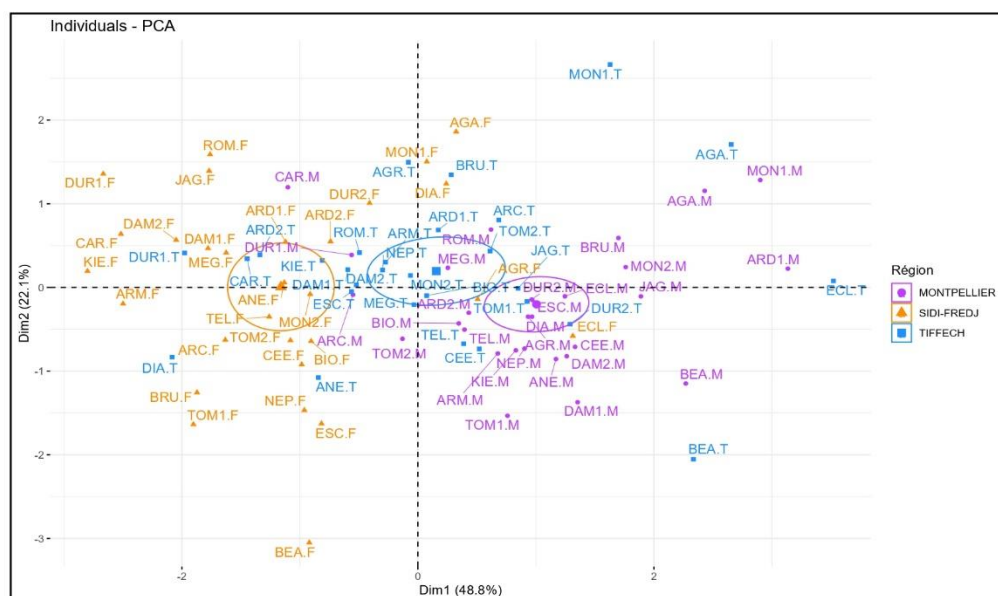


Figure 2. Graphical representation of individual genotypes on the 1X2 plane of the PCA and their distribution according to growing medium.

mainly of: BEAUDUC, ECLADUR (Sidi-Fredj), BEAUDUC (Tiffech) and BIODUR, TOMCLAIR800891 (Montpellier).

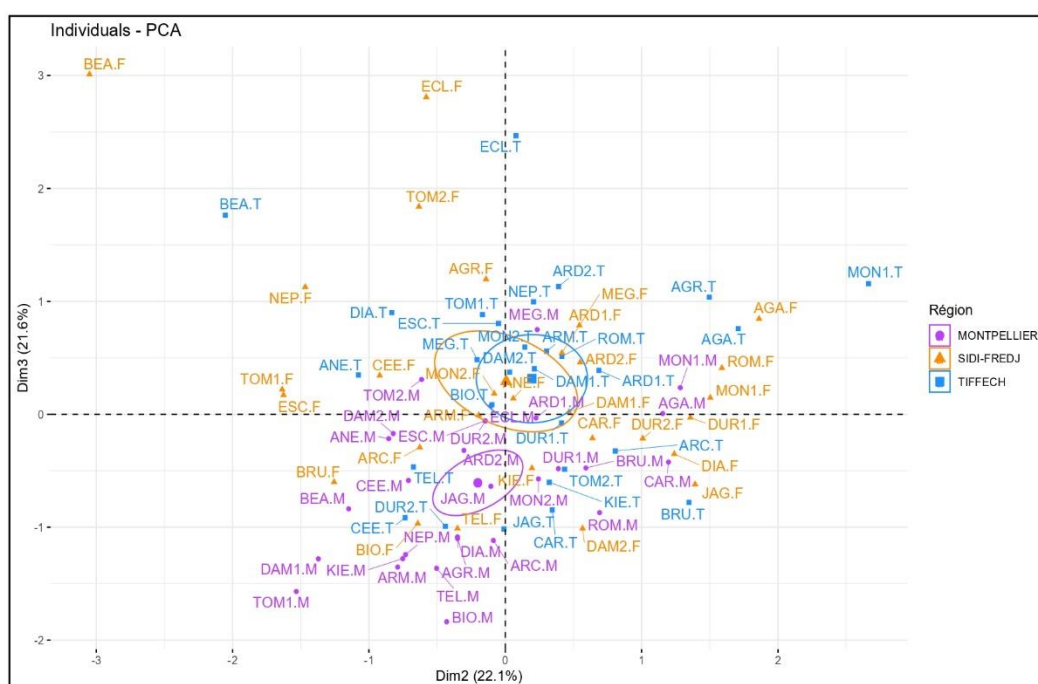


Figure 3. Individual graphical representation of genotypes on the 2X3 PCA. plane

Climatic conditions differed to a greater or lesser extent between the three trial sites (especially Montpellier compared with Tiffech and Sidi-Fredj). The genotype x environment

interaction was responsible for the instability in yields. The difference was particularly noticeable from the spike 1cm stage to maturity (water stress in Montpellier and heat stress in Sidi-Fredj).

Different behavior was observed for the parameters studied, especially for average stem height and awn length. However, some genotypes did not really show a significant environment-genotype interaction (AGRIAL, ANEMONA, ARCOUR, CEEDUR, ESCAL and MEGADUR). The average stem height and the distance between the spreading leaf and the shoot were positively correlated in the three study areas.

A closer look at each variable (Figure 4) clearly shows that these 3 sites differ greatly for each of the variables.

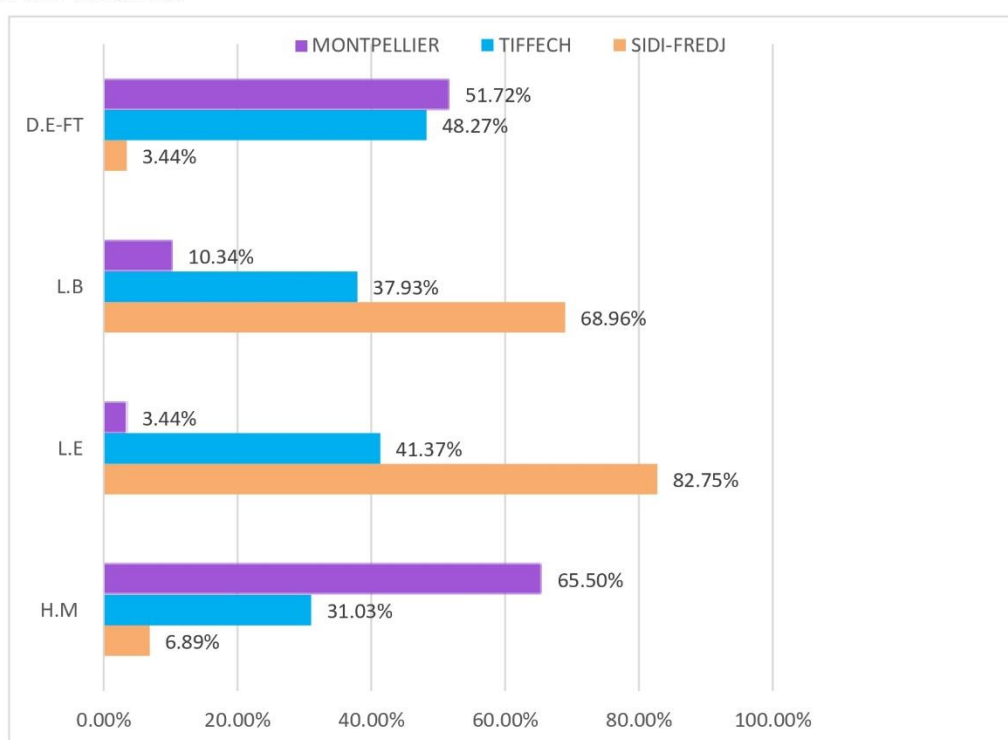


Figure 4. Comparison of the percentage impact of experimental sites on the morphological behaviour of cultivated genotypes (D.E-FT (cm): distance Flag leaf – Spike, L.B (cm): awn length, L.E (cm): ear length, H.M (cm): average stem height).

Distance Flag leaf - Spike

In Montpellier, the distance between the flag leaf and the ear of 51.71% of the cultivated genotypes was significantly affected compared to the other experimental sites (Figure 4). The average spike-to-last leaf distance of the genotypes in Montpellier was 11.38cm. In the Tiffech experimental zone, 48.27% of the genotypes were positively affected. The average spike-last

leaf distance of the 29 genotypes grown at Tiffech was 10.95cm. However, the climatic conditions at Sidi-Fredj were the most unfavorable for the genotypes, with an impact percentage of 3.44%. The average distance between the last leaf and the shoot of the genotypes grown at Sidi-Fredj was 7.4cm.

Awn length

In the Sidi-Fredj study area, the awn length of 68.96% of the cultivated genotypes (20/29 genotypes) was significantly longer than that of 37.93% in Tiffech and 10.34% in Montpellier (Figure 4). The average awn length of the 29 cultivated genotypes was: 9.57cm in Montpellier, 11.76cm in Tiffech and 12.45cm in Sidi-Fredj.

Ear length

The average spike length of the cultivated genotypes was: 6.43 cm at Montpellier, 7.6 cm at Tiffech and 8.19 cm at Sidi-Fredj. The Sidi Fredj site favored the development of the ears of 82.75% of the genotypes (24/29 genotypes).

Average stem height

Regarding mean stem height, 65.50% of the genotypes grown at Montpellier (19 genotypes) were positively affected compared to the other sites. 31.03% of genotypes (9 genotypes) responded positively at the Tiffech experimental site (Figure 4). The average master strands height of the 29 genotypes grown was: 68.12 cm at Montpellier, 64.86 cm at Tiffech and 54.40 cm at Sidi-Fredj.

Correlation analysis

Analysis of the correlations between the measured parameters (Figure 5) shows that there are positive and negative links, both weak and strong.

A study of the correlation coefficients between the different variables measured in the 29 genotypes grown in Montpellier (Figure 5.1) shows that there is a significant positive correlation between stem height and flag leaf-spike distance.

Ear length and spike length were also positively correlated. On the other hand, spike length and distance between spike and flag leaf were negatively correlated. The results also showed

that there is no significant correlation between stem height and ear and awn length. There was also no correlation between the length of the awns and the distance flag leaf-spike.

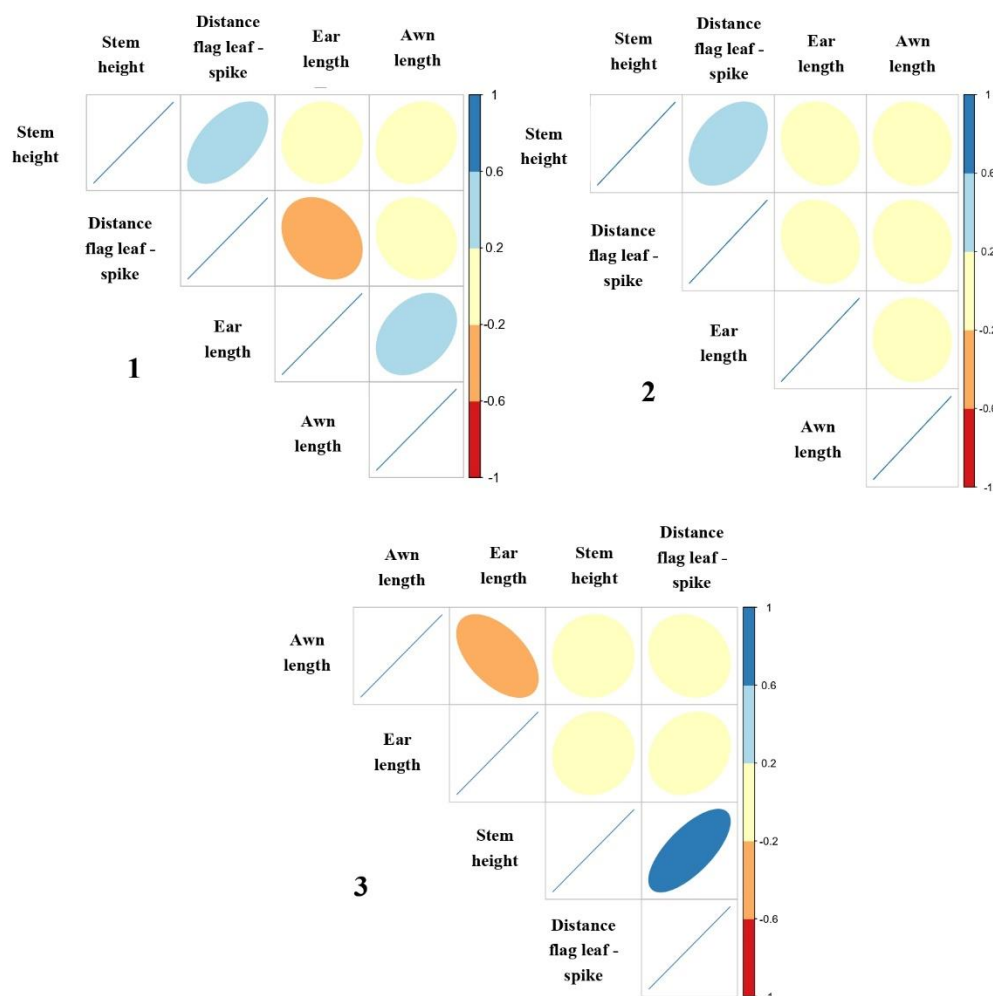


Figure 5. Correlation plot of morphological parameters at the experimental site in: **1:** Montpellier **2:** Tiffech **3:** Sidi Fredj.

The results obtained from the Tiffech experimental area (Figure 5.2) showed that there was a significant positive correlation between stem height and distance between spike and flag leaf.

A study of the correlation coefficients between the other variables measured showed that there was no relationship between awn length, spike length and distance between spike and flag leaf. The correlation plot for the Sidi-Fredj experimental zone shows that there are two types of correlation between the morphological parameters of the 29 genotypes (Figure 5.3): a highly significant positive correlation between stem height and spike-flag leaf distance and a significant negative correlation between awn length and spike length.

Genotypes morphological behavior

The comparison of the genotypes behavior studied in each area showed a highly significant difference (Figure 6).



Figure 6. Inter-variety comparison of the morphological behaviour of some cultivated genotypes under the effect of the climatic conditions of each experimental site (H.M (cm): average height of the stem, L.E (cm): length of the ear, L.B (cm): length of the awns, D.E-FT (cm): distance between leaf and ear).

Average stem height

The genotypes that showed maximum height in the three study areas were: MONTFERRIER, BEAUDUC and ECLADUR (Montpellier and Tiffèche), ARDENTE

(Montpellier) and TOMCLAIR800891 (Tiffech). On the other hand, the least developed genotypes are: KIEVLANKA, CAR1924, DURGAMM, TELEDUR and TOMCLAIR800891 at the Sidi-Fredj site.

The genotypes that showed maximum development of average stem height were: MONTFERRIER (91 cm) in Montpellier, BEAUDUC (95 cm) in Tiffech, ECLADUR (77 cm) in Sidi-Fredj. On the other hand, the genotypes that had a reduced average height were: CAR1924 (53 cm) in Montpellier, DURGAMM (46.5 cm) in Tiffech, KIEVLANKA (39 cm) in Sidi-Fredj.

Ear Length

The genotypes that showed positive behavior in relation to the meteorological parameters of the experimental sites are: BEAUDUC (Sidi-Fredj and Tiffech), ECLADUR, NEPAL, TOMCLAIR, TOMCLAIR800891 at Sidi-Fredj; DIABOLO and ARDENNOIS918448 at Tiffech.

The ears of BEAUDUC were the most developed compared to the other genotypes (12 cm), while only 6.5cm in length was recorded for DIABOLO. On the other hand, Montpellier site did not really affect the ears length (3.44% represented by DURENTAL).

Awn length

The genotypes with the longest awns were: CAR1924 in Montpellier (15 cm), MONTFERRIER in Tiffech (17 cm), DURGAMM and ROMEO in Sidi-Fredj (17 cm). The shortest awn lengths were recorded in Tiffech (BEAUDUC: 5 cm), Sidi-Fredj (BEAUDUC: 6cm) and Montpellier (BEAUDUC, DAMOISO and TOMCLAIR800891: 6cm).

Distance flag leaf - spike

The genotypes which showed a maximum flag leaf - spike distance are: ARDENTE (Montpellier), ECLADUR (Sidi-Fredj and Tiffech), AGATHE (Tiffech), MONTFERRIER (Tiffech and Montpellier). However, the genotypes with the shortest distance between the spike and the flag leaf were: KIEVLANKA, CAR1924, ARMET, TOMCLAIR800891, DURGAMM (Sidi-Fredj).

The meteorological parameters of the three experimental sites led to specific adaptations for each genotype.

It appears that some varieties of wheat have adapted to the climate by developing shorter stems. This adaptation helps to reduce the amount of water and nutrients that are lost from the plant, and it also helps to protect the plant from wind damage (Blum, 1988). A shorter stem means that the plant can put more energy into developing its grains rather than growing tall stems. In addition, wheat with reduced stem length is more resistant to lodging (Bagga et al., 1970). This goes along with what we found throughout our study, where the climatic conditions in Montpellier led to an increase in average stem height, whereas in Sidi-Fredj, the height of the stem was significantly reduced in comparison to Montpellier.

When it comes to spike adaptation, some varieties of wheat have adapted to the Mediterranean climate by developing shorter, thicker spikes. This adaptation helps to protect the developing grains from the sun and wind, and it also helps to reduce water loss from the plant. According to Jonard (1964), ear length is a varietal characteristic that can be influenced very little by environmental variations. However, some varieties of wheat have adapted to the Mediterranean climate by developing shorter, more compact ears. This adaptation helps to reduce the amount of water and nutrients that are lost from the plant, which helps the plant to conserve its resources during times of drought (Pradhan et al., 2012).

The length of the awn in wheat can increase the possibility of water use and dry matter production during the ripening phase. According to Blottière (2003), and Nemmar (1980), the length of the awn also contributes to limiting water loss. This morphological parameter seems to be closely linked to tolerance to terminal water deficit, at least in durum wheat (Salma, 2002). This is what we observed in Tiffech and Sidi-Fredj where the majority of the genotypes studied there were largely affected when it comes to awn length. The decrease in rainfall and the increase in temperature at the heading stage stimulated a significant increase in awn length for most of the genotypes grown at Sidi-Fredj. This can be seen as an adaptation mechanism to minimize water loss. Awns also help cool wheat spikes during grain filling in warm climates (Motzo and Giunta, 2002).

Auriau (1978) emphasized the role of the neck as a provisional organ in the translocation of assimilates to the ear, and found a positive correlation between the length of the ear neck and yield. Wheat genotypes with a larger distance between the flag leaf and the spike used more water. However, one thing to consider is that a larger distance can increase the amount of water required for irrigation. According to our results the majority of the genotypes that were

cultivated in Sidi-Fredj had a reduced distance flag leaf – spike in comparison to the other areas of study.

Conclusion

Our study focused on the behavior of 29 genotypes of durum wheat (*Triticum durum*. Desf), grown in three different areas under a Mediterranean climate. We tried to determine the effect of climatic conditions on the performance of these genotypes through changes in their morphological characteristics: average stem height, distance between the spreading leaf and the ear, ear length and awns length). Climatic conditions in each area affected spike length and awn length differently. At Sidi-Fredj, climatic conditions stimulated awn development in most of the cultivars studied compared with the other experimental sites. This conditioning can be interpreted as a mechanism by which durum wheat genotypes adapt to water and heat stress. The difference was observed at the maturity stage (hydric stress in Montpellier and thermal stress in Sidi-Fredj), for which different behavior was observed in terms of parameters (particularly the average height of the stem and the length of the awns). However, some genotypes showed stable behavior under the climatic conditions of the three sites (TELEDUR, NEPAL, ROMEO...). However, our results are only one stage in the identification of these genotypes through morphological characteristics. In Algeria, scientists have estimated that rainfall will fall by around 20 per cent in the coming years. They also estimate that temperatures will rise by a further 3°C by 2050 as a result of global warming. In future, therefore, it would be advisable to attach greater importance to the interaction between wheat and the environment, in order to better highlight the true potential for adaptation of each genotype and to find genotypes with stable behavior in their growing environment. In light of what we found in our study, there are two propositions that we think can greatly enhance drought resistance resulting in increased biomass and better yield: 1. *Early sowing* by doing so we ensure that the plants will benefit from as much precipitation as possible. In addition, the plant would have more time to reach maturity before the summer heat arrives. This can result in a higher yield, as the plant will have had more time to develop and mature which can reduce the risk of late-season heat stress. 2. *Mixed varieties* by planting two or more varieties of the same crop together. The key to using mixed varieties is to select varieties that have wanted characteristics like drought resistance and plant them together to create a sort of a genetic diversity that increases the development of said traits. This can help increase resilience to environmental stress, and it can also increase the yield.

References

- Annicchiarico, P. (2002). Genotype x environment interactions. Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. Food and Agriculture Organization. Roma. Plant Production and Protection 174.
- Annicchiarico, P., Bellah, F. and Chiari, T. (2005). Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: a case study. Crop Science 45: 1741–1749.
- Auriau, P. (1978). Climate-dependent selection for yield in wheat. An. El. Harrach 8: pp.5–14.
- Bagga, A.K., Ruwal, K.N. and Asana, R.D. (1970). Comparison of some Indian and semi-dwarf Mexican wheat to unirrigated cultivation. Indian Journal of Agricultural Research. 40: 421–427.
- Blottière, M.J. (2003). Cahier du centre de l'Algérie IX. Algerian production. Chapter One. Agricultural production.1. Cereals. Publications of the national metropolitan committee for the centenary of Algeria, Algeria, 95 p.
- Blum, A. (1988). Plant breeding for stress environments. CRC Press 223.
- Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E. and Goodess, C.M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from global warming. Glob Planet Change 68: 209–224.
- Hadibi, A., Chekired-Bouras, F.Z. and Mouhouche, B. (2009). "Analyse de la mise en œuvre du plan national de développement agricole dans la première tranche du périmètre de la Mitidja Ouest" in *Économie d'eau en systèmes irrigués au Maghreb*, Proceedings of the fourth regional workshop, 26-28 May 2008, Mostaganem (Algeria).
- Jonard, P. (1964). Comparative study of the growth of two genotypes of common wheat. Ann. Amélior. Plant, 14 (2).
- Mazouz, L. (2006). Etude de la contribution des paramètres phénomorphologiques dans l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Dsf.) dans l'étage bioclimatique semi-aride. Magister dissertation. Dept Agr, Fac Sci, UHL, Batna, Algeria.

- Mekhlouf, A. (2009). Study of the genetic variability of durum wheat (*Triticum durum*, Desf) for cold tolerance. Thèse de Doctorat. Institut National Agronomique. El-Harrach, Alger. 81p.
- Mo, F., Sun, M. and Yan Liu, X. (2016). Phenological responses of spring wheat and maize to changes in crop management and rising temperatures from 1992 to 2013 across the Loess Plateau. *Field Crop Res* 196: 337–347.
- Mohamed, C. (2012). "How to reconcile climate change and agricultural development in Algeria". *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement*, 14–15.
- Moriondo, M., Giannakopoulos, C. and Bindi, M. (2011). Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic Change* 104: 679–701.
- Motzo, R. and Giunta, F. (2002). Awnedness affects grain yield and kernel weight in near-isogenic lines of durum wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 53: 1285–1293.
- Nemmar, M. (1980). Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) : Étude de l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique. Thèse D.A.A. ENSA. Montpellier, 65 p.
- Pradhan, G.P., Prasad, P.V.V., Fritz, A.K., Kirkham, M.B. and Gill B.S. (2012). Effects of drought and high temperature stress on synthetic hexaploid wheat. *Functional Plant Biology* 39: 190–198.
- Rezaei, E.E., Siebert, S., Hüging, H. and Ewert, F. (2018). Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change. *Scientific Reports* 8: 489.
- Slama, A. (2002). Étude comparative de la contribution des différentes parties du plant du blé dur dans la contribution du rendement en grains en irrigué et en conditions de déficit hydrique. Doctoral thesis in biology, Faculty of Science, Tunis.
- Tabet-Aoul, M. (2010). Développement et environnement au Maghreb : contraintes et enjeux, pp. 66–70.
- Tubiello, F.N., Donatelli, M., Rosenzweig, C. and Stöckle, C.O. (2000). Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *European Journal of Agronomy* 13 (2-3): 179–189.