

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض

Faculté Des Sciences de la Nature et de
la Vie et des Sciences de la Terre

Département : Sciences biologiques



جامعة الجيلالي بونعامة – خميس مليانة

Université Djilali Bounaama
Khemis Miliana

قسم : علوم البيولوجيا

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : biotechnologies microbienne

THEME

Effet de bactérisation sur la germination de blé dur (*Triticum durum*) sous stress hydrique

Réalisé par :

MAZOUZI marwa
MEKHANEG wissam

Soutenu le 02/07/2025 devant le jury composé de :

Président(e)	M.	AIZI Djamel Eddine	MCB	U. Khemis Miliana
Promoteur	Mme	BOUCHIBA zoulikha	MCB	U. Khemis Miliana
Co-promoteur	Mme	BRAHIMI samira	MAA	U. Khemis Miliana
Examineur	Mme	FEDOUL firdaus faiza	MAB	U. Khemis Miliana

Remerciements

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على أشرف الخلق والمرسلين، سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين

Nos premiers remerciements seront à Dieu, qui nous a donné la force et la détermination d'atteindre cette tribune aujourd'hui, et on exprime notre sincère gratitude à Mme BOUCHIBA Zoulikha pour nous avoir guidé et supervisé durant notre étude.

Nous exprimons également notre gratitude au responsable du laboratoire de recherche (eau, roche, plante) de l'Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana

Et en particulier Madame Wahiba, pour nous avoir acceptés pour mettre en œuvre nos expériences et obtenir de bons résultats. on remercie également les membres du jury : Mr AIZI Djamel Eddine enseignant à

l'Université de Khemis Miliana, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de ce travail. Et Mme FEDOUL firdaous faiza, pour avoir accepté de juger ce travail.

Nous remercions Mme BRAHIMI Samira et Mme GHOMARI Faiza pour leur aide précieuse, nos collègues pour leur coopération, leur gentillesse et leur présence à nos côtés dans tous les moments qui se sont écoulés, et on remercie toutes les personnes qui ont contribué à notre soutien et à notre succès.

Dédicaces

Arrivé au terme de mes études par la grâce de dieu, Je dédie ce modeste travail :

À ma mère et mon père, que dieu les garde et les protège. Pour leur soutien moral et financier, pour leur amour et leur encouragement et les sacrifices qu'ils ont endurés, trouvent le témoignage de ma profonde affection et gratitude.

À mon époux Ayyoub, pour ton soutien indéfectible, ta patience et ta présence apaisante dans les moments les plus exigeants : merci d'avoir cru en moi.

À mes frères et sœurs : Feriale, Mohamed, Abdo, Redouane et Ritadje, merci pour votre amour sincère, vos encouragements et vos mots qui ont souvent soulagé ma fatigue

A la fleur de la maison, ma nièce : Sirine

À mon cher binôme Wissem, avec qui j'ai vécu cette aventure, en partageant les instants de joie comme ceux de difficulté.

Sans oublier amie d'enfance Ilhem et à sa famille, pour son soutien moral, elles ont été ma source de motivation.

À mes copines, Amira, Sara, Youssra, Fadoua, et Sanaa pour leur soutien, tous mes sentiments de reconnaissance pour vous.

À ma précieuse famille, pour son appui indéfectible tout au long de ce parcours, et spécialement à ma tante Hamida, merci du fond du cœur.

À mes amis (es) que je n'ai pu citer mais qui sont toujours présent dans mes pensées et mon cœur.

À tous mes enseignants durant tous mon cursus

À tous promo biotechnologie microbienne 2024/2025

À tous ceux que j'aime et je respect.

Marwa

Dédicaces

Je Dédie Ce Modeste Travail

A tous ce qui me sont chers

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la Flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur : Maman que j'adore.

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien Moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours Sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.

A mes très chère et adorable sœurs Yasmine , Anfel et Maria.

A mes frères Zine Eddine et Rabie.

A Ma cousine Meriem .

Je ne peux clôturer cette dédicace sans adresser à ma meilleure amie et ma binôme Marwa un grand remerciement pour sa patience et sa ténacité durant les bons et parfois durs Moments qu'on a passés ensemble.

Mes dédicaces sont également adressées à toute la famille A tous mes amis plus particulièrement: Hadil, Amira, Sara, Sanae, Fadoua, zola, Youssgha, mouna et Rania .

A tous mes amis et toutes la promotion de biotechnologie microbienne, Merci pour les moments partagés, les échanges enrichissants ,et cette belle complicité qui a illuminé notre parcours universitaire.

Wissam

Résumé

Dans cette étude, quatre isolats de Rhizobactéries pré-identifiés pour leur tolérance au stress hydrique ont été caractérisés par des analyses macroscopiques et microscopiques, ainsi que une identification biochimique via la galerie API 20E. Parallèlement, leur capacité à produire de l'Acide Indole Acétique (AIA) a également été évaluée. Les grains de blé (*Triticum durum* Dsef) de simeto inoculés par ces isolats sont mis à germer sous différents niveaux de stress hydriques simulés par différentes concentrations de PEG 6000 (5%,10%,15% et 20 %) et comparé aux conditions normales. L'analyse morphologique a révélé une variabilité entre les souches étudiées. Cette diversité est confirmée par la variabilité des caractéristiques métaboliques, biochimiques ainsi leur capacité à produire l'AIA où la souche S1 se distingue par sa forte production (40,09 µg/mL).

L'analyse des résultats de la galerie API 20E a permis d'affilier l'isolat S1 au genre *Pantoea*, l'isolat S2 à *Serratia*, l'isolat S3 à *Pseudomonas* et l'isolat S4 à *Rahnella*. A (5%) Les souches S1 et S4 ont amélioré le pourcentage et la vitesse de germination, ainsi que la longueur et le poids des plantules sous condition de stress. A 10% c'est la souche S1 qui a amélioré le pourcentage et la vitesse de germination alors que la souche S4 a un impact positif sur l'Indice de vigueur de la longueur et le poids des plantules. A des concentrations élevées de PEG 6000 (15%) la souche S3 se démarque par son pouvoir promoteur de tous les paramètres étudiés. Face à un stress sévère (20%) la souche S1 avait un effet positif sur le pourcentage de germination et S4 sur l'indice de vigueur du poids des plantules.

Mots Clés : Rhizobactéries ; Tolérance ; *Triticum durum* Dsef ; Stress Hydrique ; PEG 6000

Abstract

In this study, four bacterial isolates, pre-identified for their drought stress tolerance, were characterized by macroscopic and microscopic analyses, as well as biochemical identification using the API 20E gallery. Concurrently, their ability to produce Indole Acetic Acid (IAA) was also evaluated. 'Simeto' durum wheat (*Triticum durum* Desf.) seeds inoculated with these strains were germinated under different levels of water stress simulated by various concentrations of PEG 6000 (5%, 10%, 15%, and 20%), and compared to normal conditions.

Morphological analysis revealed variability among the studied strains. This diversity was further confirmed by the variability in metabolic and biochemical characteristics, as well as their IAA production capacity, with strain S1 standing out for its high production (40.09 µg/mL). API 20E gallery results allowed the affiliation of isolate S1 to the genus *Pantoea*, isolate S2 to *Serratia*, isolate S3 to *Pseudomonas*, and isolate S4 to *Rahnella*.

At 5% PEG 6000, strains S1 and S4 improved germination percentage and rate, as well as seedling length and weight under stress conditions. At 10% PEG 6000, strain S1 enhanced germination percentage and rate, while strain S4 positively impacted the seedling length vigor index and seedling weight vigor index.

At higher PEG 6000 concentrations (15%), strain S3 distinguished itself by its promoting power on all studied parameters. Faced with severe stress (20% PEG 6000), strain S1 had a positive effect on germination percentage, and S4 on the seedling weight vigor index

Keywords : Rhizobacteria; Tolerance; *Triticum durum* Desf.; Water Stress; PEG 6000

ملخص

في هذه الدراسة، تم توصيف أربع معزولات بكتيرية، تم تحديدها مسبقاً لتحملها الإجهاد المائي، من خلال تحاليل عيانية ومجهرية، بالإضافة إلى التحديد البيوكيميائي باستخدام نظام API 20E بالتوازي، تم أيضاً تقييم قدرتها على إنتاج حمض الإندول الخليك (IAA). وتم إنبات بذور القمح الصلب من صنف "سيميتو" (*Triticum durum* Desf.) "الملقحة بهذه السلالات تحت مستويات مختلفة من الإجهاد المائي المحاكى بتركيز متنوعة من 5% PEG 6000 و 10% و 15% و 20%)، ومقارنتها بالظروف الطبيعية.

كشف التحليل المورفولوجي عن تباين بين السلالات المدروسة. وتم تأكيد هذا التنوع من خلال تباين الخصائص الأيضية والبيوكيميائية، بالإضافة إلى قدرتها على إنتاج حمض الإندول الخليك، حيث تميزت السلالة S1 بإنتاجها العالي (40.09 ميكروغرام/مل). سمحت نتائج نظام API 20E البيوكيميائي بربط المعزول S1 بجنس *Pantoea*، والمعزول S2 بجنس *Serratia*، والمعزول S3 بجنس *Pseudomonas*، والمعزول S4 بجنس *Rahnella*.

عند تركيز 5% من PEG 6000، قامت السلالتان S1 و S4 بتحسين نسبة ومعدل الإنبات، بالإضافة إلى طول ووزن الشتلات تحت ظروف الإجهاد. وعند تركيز 10% من PEG 6000، عززت السلالة S1 نسبة ومعدل الإنبات، بينما كان للسلالة S4 تأثير إيجابي على مؤشر حيوية طول الشتلات ومؤشر حيوية وزن الشتلات.

عند تراكيز أعلى من (15%) PEG 6000، تميزت السلالة S3 بقوتها المحفزة لجميع المؤشرات المدروسة. في مواجهة الإجهاد الشديد (20% من PEG 6000)، كان للسلالة S1 تأثير إيجابي على نسبة الإنبات، وللسلالة S4 تأثير إيجابي على مؤشر حيوية وزن البادرات.

الكلمات المفتاحية: البكتيريا الجذرية; التحمل; القمح الصلب; (*Triticum durum* Desf.); الإجهاد المائي; PEG

Liste des abréviations

<i>ACC</i>	Aminocyclopropane-1-carboxylate
<i>AIA</i>	Acide Indole acétique
<i>IVLP</i>	Indice de vigueur de la longueur plantules
<i>IVPP</i>	Indice de vigueur de poids des plantules
<i>LB</i>	Luria Bertani
<i>PEG</i>	Le polyéthylène glycol
<i>PG</i>	pourcentage de germination
<i>PGPR</i>	Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes
<i>SMS</i>	succiante minimal salt
<i>UFC</i>	Unité formant colonie

Liste des figures

Figure 1: Phylogénie des espèces de blé	17
Figure 2: la Morphologie de blé dur	19
Figure 3: production en volume de blé au niveau mondial entre 2015/2016 et2021/2022(en millions de tonnes).	25
Figure 4: Mécanismes de solubilisation des phosphates inorganiques et organiques.....	33
Figure 5: Mécanisme de l'ACC-désaminase en association avec l'AIA en facilitant la croissance végétale sous stress abiotique..	35
Figure 6: Mode d'action des PGPR indiquant des effets directs et indirects dans l'amélioration de la croissance des plantes et la suppression des phytopathogènes	37
Figure 7: les inoculums bactériens utilisés.....	27
Figure 8: l'inoculation des grains de Blé dur	28
Figure 9: Aspect macroscopique des souches étudiées.....	31
Figure 10: Galerie API 20E après incubation	33
Figure 11: Test de production d'AIA par la méthode colorimétrique de Salkowski	35
Figure 12: Variations de la moyenne de pourcentage de germination chez la variété de simeto de blé dur.....	38
Figure 13: Variations de la moyenne L'indice de vitesse de germination chez la variété de simeto du blé dur.....	40
Figure 14: Mesure de la longueur des racines et des tiges des graines de blé germées	41
Figure 15: Variations de la moyenne Indice de vigueur de la longueur plantules chez la variété de simeto de blé dur.....	42
Figure 16: Variations de la moyenne Indice de vigueur de poids des plantules chez la variété de simeto de blé dur	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification botanique du blé	17
Tableau 2: Les facteurs environnementaux et leurs impacts biologiques sur la plante	27
Tableau 3: Caractéristiques morphologiques, culturelles des isolats étudiés	32
Tableau 4: Résultats de test galerie API 20E.....	34
Tableau 5: identification des souches par code API	34

Table des matières

RESUME	5
ABSTRACT	6
LISTE DES ABREVIATIONS	8
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	10
INTRODUCTION.....	13
1. INTRODUCTION.....	15
CHAPITRE I : ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
1. GENERALITE SUR LE BLE	16
1.1. <i>Origine géographique Du blé dur</i>	16
1.2. <i>Origine génétique :</i>	16
1.3. <i>Classification botanique du blé :</i>	17
1.4. <i>Caractères morphologiques du blé</i>	18
2. LA GERMINATION DES GRAINS DE BLE DUR.....	22
2.1. <i>Physiologie de la germination</i>	22
2.2. <i>Facteurs affectant la germination et l'émergence</i>	23
3. LA PRODUCTION DU BLE DUR.....	24
3.1. <i>La production mondiale</i>	24
3.2. <i>La production céréalière en Algérie</i>	25
4. LE STRESS	26
4.1. <i>Les types de stress</i>	26
4.2. <i>Le stress thermique</i>	29
4.3. <i>Le stress salin</i>	29
5. IMPACTS DU STRESS HYDRIQUE SUR LA CROISSANCE ET LA PHYSIOLOGIE DES PLANTES.....	30
6. STRATEGIES D'AMELIORATION DES CULTURES CONTRE LE STRESS ABIOTIQUE.....	31
7. DEFINITION DES PGPR.....	31
7.1. <i>Classification</i>	31
7.2. <i>Mécanisme d'action des PGPR</i>	32
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	22
1. L'OBJECTIF DE TRAVAIL :	23
2. PERIODE ET LIEU DE STAGE	23
3. MATERIEL UTILISE	23
4. METHODOLOGIE.....	23
4.1. <i>Etude la morphologie des Isolats</i>	23
4.2. <i>La caractérisation biochimique</i>	24
4.3. <i>Production</i>	26
4.4. <i>L'étude de la réponse des grains de blé dur au stress hydrique</i>	26
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	30
1. L'ETUDE MORPHOLOGIQUE DES SOUCHES	31
2. LA CARACTERISATION BIOCHIMIQUE.....	32
3. LA PRODUCTION DE L'ACIDE INDOLE ACETIQUE (AIA)	35
4. LA REPONSE DES GRAINS DE BLE DUR AU STRESS HYDRIQUE.....	36
4.1. <i>Pourcentage de germination (PG)</i>	36
4.2. <i>L'indice de vitesse de germination (IVG)</i>	39
4.3. <i>L'indice de vigueur de la longueur des plantules (IVLP)</i>	40
4.4. <i>L'indice de vigueur de poids des plantules (IVPP)</i>	42
CONCLUSION.....	45

LISTE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	47
ANNEXE.....	59

Introduction

1. Introduction

Les céréales sont l'une des cultures agricoles les plus importantes au monde, en raison de leur rôle vital dans la réalisation de la sécurité alimentaire et la satisfaction des besoins fondamentaux des populations (Slama *et al.*, 2005 ; FAO, 2024). Elles constituent le composant de base du régime alimentaire de la plupart des peuples du monde et sont largement utilisées dans diverses industries alimentaires (Tilman et Clark, 2018). Parmi les céréales les plus importantes, le blé se distingue comme une denrée stratégique, Il est en effet considéré comme une source principale de glucides et de protéines, et est utilisé dans la production de pain et de ses dérivés. (kellou, 2008 ; FAO, 2020)

La culture céréalière est l'activité agricole prédominante en Algérie, couvrant une superficie significative estimée à environ 3,3 millions d'hectares annuellement, principalement dans les régions arides et semi-arides (Laala *et al.*, 2009 ; MADR, 2023). Le blé, sous ses deux formes tendre et dur, constitue l'une des cultures les plus cultivées et consommées dans le pays. Malgré les efforts déployés pour atteindre l'autosuffisance, l'Algérie continue de dépendre des importations pour satisfaire la demande locale, les statistiques indiquant que la production nationale ne couvre qu'une partie limitée de la consommation (Milling & Grain Middle East and Africa, 2024).

Les changements climatiques, la réduction des terres agricoles et la rareté des ressources en eau sont parmi les principaux défis auxquels la culture du blé est confrontée en Algérie. En effet, Le stress hydrique représente un facteur crucial limitant la production des céréales, affectant l'ensemble des phases de croissance (Jha *et al.*, 2020). De ce fait, la tolérance à la sécheresse constitue un enjeu majeur pour les sélectionneurs et les producteurs de céréales à paille.

La gestion de ces défis nécessite la mise en place de stratégies efficaces ainsi que de solutions alternatives et durables visant à renforcer la résistance des plantes aux conditions environnementales extrêmes. Dans ce contexte, les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR) constituent une stratégie biologique prometteuse pour atténuer les effets délétères du stress hydrique. Ces microorganismes bénéfiques exercent leurs effets par divers mécanismes, tels que la production d'auxines, la solubilisation du phosphore, la synthèse de l'ACC-déaminase, la production d'exopolysaccharides, ainsi que l'induction de la tolérance systémique acquise, entre autres (Vurukonda *et al.*, 2016).

Ainsi, la présente étude a pour objectif d'évaluer l'impact de l'inoculation de souches bactériennes sur la germination du blé dur sous diverses conditions de stress hydrique.

Notre étude est basée sur trois chapitres principaux:

Le premier chapitre: est une synthèse bibliographique qui présente une description générale de blé dur, quelques notions de stress hydrique, et les mécanismes de tolérance des plantes au stress hydrique.

Le Deuxième chapitre: description du matériel végétal, conditions de culture et les paramètres étudiés

Le troisième chapitre: comprend la présentation et la discussion des résultats obtenus dans ce travail. Terminez ensuite la thèse par une conclusion suivie d'une liste de références bibliographiques

Chapitre I : analyse bibliographique

1. Généralité sur le blé

Les céréales figurent parmi les toutes premières plantes à avoir été cultivées et récoltées par l'homme. La prospérité des civilisations antiques reposait en grande partie sur leur capacité à produire, stocker et distribuer ces grains essentiels, notamment le blé, le riz et l'orge (El Felah *et al.*, 2015).

Le blé est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité. Son histoire est intimement liée à celle de l'homme et de l'agriculture : sa culture précède l'histoire écrite, marquant l'agriculture néolithique apparue en Europe il y a 8000 ans. La plus ancienne culture de blé identifiée semble être celle du blé dur, originaire du Croissant fertile en Mésopotamie (Maccaferri *et al.*, 2019)

Les deux espèces des céréales les plus cultivées sont : le blé dur (*Triticum durum*) : AABB (2n = 4x = 28) Tétraploïde et le blé tendre (*Triticum aestivum* L) : AABB DD (2n = 6x = 42) Hexaploïdie.

1.1. Origine géographique Du blé dur

Faisant partie des premières espèces végétales cultivées par l'homme, Cette plante annuelle a été domestiquée au Proche-Orient, espace connu sous le nom du « Croissant fertile » où les terres sont cultivables grâce à un climat suffisamment pluvieux. Il couvre l'Irak, la Palestine, la Syrie, le Liban, l'Égypte, la Jordanie, la périphérie de la Turquie et l'Iran durant une période allant de 7 000 à 10 000 ans (Croston et Williams, 1981) et il s'est propagé vers le Nord-Ouest par les plaines côtières du bassin méditerranéen et au travers des Balkans (Omari et Tahri, 2021). Des preuves archéologiques, sous forme de vestiges de blés diploïdes et tétraploïdes, attestent de sa présence dès le VII^e millénaire avant J.-C. sur des sites du Proche-Orient (Harlan, 1975 ; Boulal *et al.*, 2007). La culture du blé a été diffusée par la suite vers l'Afrique, l'Asie et l'Europe à partir de cette région (Amrouche et Mesbah, 2017).

1.2. Origine génétique :

Le blé dur (*Triticum durum*) est une espèce allotétraploïde, caractérisée par un nombre chromosomique de $2n = 4x = 28$. Il possède quatorze paires de chromosomes réparties entre deux génomes distincts, désignés A et B. Le génome A est hérité du (*Triticum urartu*), une espèce sauvage diploïde considérée comme l'ancêtre génétique de l'en grain (*Triticum monococcum*), et dont la constitution génomique est de type AA. En revanche, le génome B

provient vraisemblablement de l'espèce sauvage (*Aegilops speltoides*), également diploïde (Schuhwerk *et al.*, 2011) (**Figure 1**).

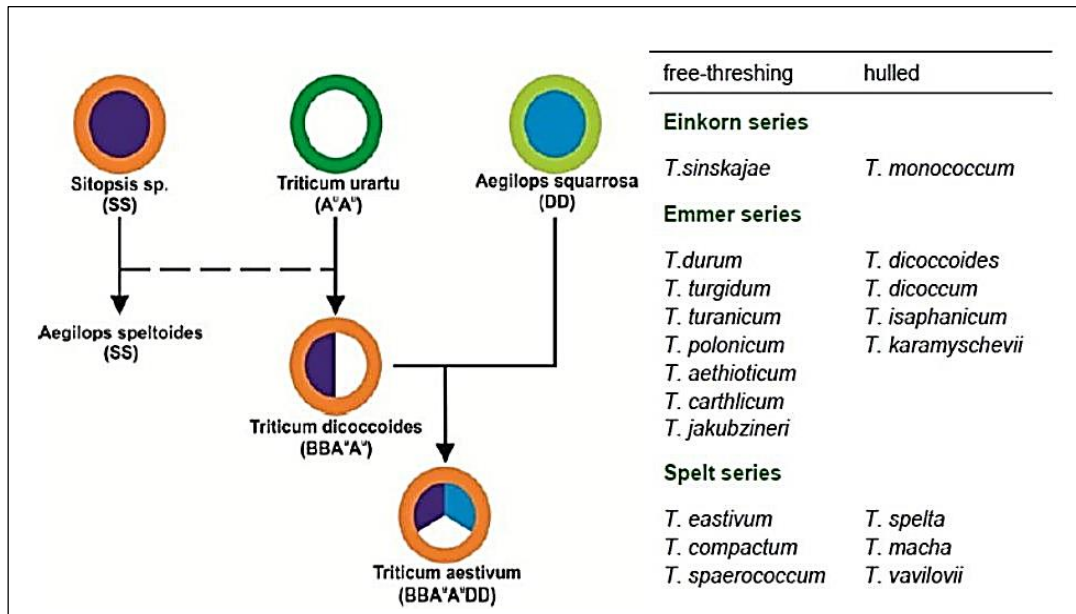


Figure 1: Phylogénie des espèces de blé (Schuhwerk *et al.*, 2011)

1.3. Classification botanique du blé :

Le blé est une Angiosperme, Monocotylédone. Il appartient à l'ordre des Poales, famille des Poacées appelée aussi graminées. Cette famille rassemble 600 genres et plus de 5000 espèces (Zegrany, 2014). D'après Angiosperm Phylogeny Group III (2009), la classification botanique du blé dur est dans le tableau 1

Tableau 1 : Classification botanique du blé (APG III, 2009)

Règne :	Plantae
S/règne :	Tracheobionta
Embranchement :	Phanérogamiae
S/Embranchement :	Magnoliophyta (Angiospermes)
Division :	Magnoliophyta
Classe :	Liliopsida (Monocotylédones)
S/Classe :	Commelinidae

Ordre :	Poales(Glumiflorale)
Famille :	Cyperales
S/Famille :	Poaceae (Graminées)
Tribue :	Pooideae (Festucoideae)
S/tribu :	Triticeae
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum durum.</i>

1.4. Caractères morphologiques du blé

Le blé est une plante herbacée qui se distingue par des caractéristiques morphologiques spécifiques. Sa hauteur varie selon les variétés, pouvant atteindre jusqu'à 1,5 mètre. Pour en faire une description complète, il convient d'examiner chaque organe constitutif de la plante (Figure 2).

- **Le système racinaire** est composé de deux types de racines : les racines séminales, issues de la plantule lors de la levée, et les racines adventives, qui apparaissent ultérieurement à partir des nœuds basaux et forment le système racinaire permanent (Boulal *et al.*, 2007).
- **La tige**, de forme cylindrique et généralement creuse, est segmentée en entre-nœuds d'où émergent les feuilles. Elle ressemble à un tube cannelé et contient de nombreux faisceaux conducteurs de sève.
- **Les feuilles**, quant à elles, sont disposées de manière alternée, de forme rubanée et engainante, avec une surface pouvant atteindre 30 cm². Chaque feuille se compose d'une gaine qui entoure la tige et d'un limbe qui se déploie à maturité.
- **L'épi** se développe à partir du bourgeon terminal situé sur le plateau de tallage, une fois la croissance de la tige achevée. Il est initialement enveloppé par la dernière feuille (figure 2)
- **Les épillets**, disposés le long de l'axe de l'épi, regroupent plusieurs fleurs. Celles-ci, dépourvues de pétales, sont protégées par des glumelles et glumillules. Après fécondation, chaque fleur donne naissance à un fruit unique : le caryopse ou grain (Hacini, 2014).
- **Le grain**, à la fois fruit et graine, présente une forme ovoïde avec une face dorsale légèrement bombée et une face ventrale aplatie. Le caryopse est constitué de trois

parties: les enveloppes, l'albumen (ou amande) et l'embryon (ou germe). Sa couleur varie du blanc au roux selon les conditions climatiques, pédologiques et culturales (Hacini, 2014)

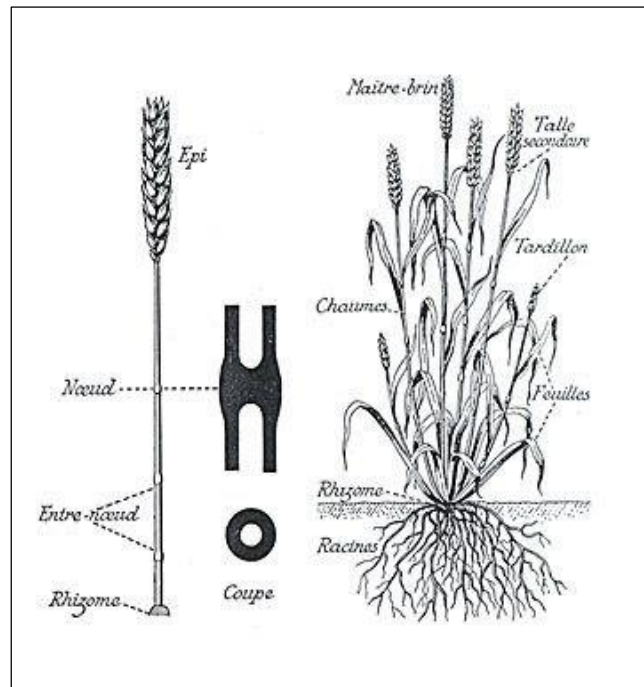


Figure 2: la Morphologie de blé dur (AAINB, 2003)

2. La germination des grains de blé dur

La germination est une étape clé marquant le passage de l'état de dormance de la graine sèche à celui de développement actif de la plantule utilisant les réserves de la graine pour soutenir sa croissance (Laurent *et al.*, 1991 ; Mazoyer, 2002).

Ce processus se déclenche lorsque la graine se trouve dans des conditions favorables, c'est-à-dire avec suffisamment d'eau, de chaleur et d'oxygène (Chaussat et Ledebunff 2000; Baskin et Baskin 2004 ; Soltner, 2007). Elle débute dès l'hydratation de la graine et suit une cinétique en trois phases (Bewley, 1997). L'eau s'infiltré dans la graine, déclenchant ainsi l'activité enzymatique essentielle à la conversion des réserves nutritives en énergie. La première partie de la plante à émerger est la radicule, destinée à devenir la racine principale. Par la suite, la tigelle pousse vers le haut, portant les premières feuilles (Taiz *et al.*, 2015).

2.1. Physiologie de la germination

La germination des graines comprend trois principales phases successives

➤ Phase 1 : Imbibition (absorption de l'eau)

La première phase débute lorsque la graine commence à absorber l'eau de son environnement. Pour enclencher le processus de germination, une graine de blé doit atteindre un taux d'humidité situé entre 35 % et 45 % de sa masse sèche. La germination peut être amorcée aussi bien par la vapeur d'eau que par l'eau liquide (Pracharoenwattana, 2005). Il est à noter que la germination du blé dur peut s'amorcer même à une humidité relative de l'air de 97,7 % (Dupont, 2010). Ce phénomène souligne l'efficacité de la graine à capter l'humidité ambiante. Par comparaison, un sol qualifié de "sec", où l'eau n'est plus accessible aux racines des plantes, conserve néanmoins une humidité relative d'environ 99 % (Green, 2015), ce qui est largement supérieur à l'état de dessiccation d'une graine. Ainsi, même dans des conditions sèches, la germination peut débuter si la graine absorbe suffisamment d'humidité, bien que cela prenne plus de temps qu'en conditions humides (Pracharoenwattana, 2005).

➤ Phase 2 : Activation enzymatique

Une fois la graine réhydratée, l'embryon se gonfle et produit des hormones qui stimulent la synthèse d'enzymes. Ces enzymes dégradent les réserves d'amidon et de protéines stockées dans la graine, les transformant en sucres simples et acides aminés, fournissant ainsi l'énergie nécessaire à la croissance embryonnaire. Plus une graine contient d'amidon, plus elle dispose d'énergie pour le développement. Si la graine se dessèche avant que l'embryon ne commence

à se développer, elle peut rester viable et reprendre la germination ultérieurement. Cette phase se poursuit jusqu'à la rupture du tégument, qui marque le premier signe visible de la germination (Agronomists, 2007).

➤ **Phase 3 : Germination visible**

Au cours de cette phase, l'embryon poursuit son développement de manière observable. La radicule (future racine principale) perce en premier, suivie des autres racines primaires, puis du coléoptile. Les enzymes mobilisées lors de la phase précédente permettent de transférer les nutriments stockés vers les tissus en croissance (Agronomists, 2007).

➤ **Émergence**

L'émergence correspond au moment où le coléoptile ou la première feuille devient visible au-dessus de la surface du sol. Avant cela, le coléoptile, après avoir percé le tégument, commence à croître vers la surface, guidé par la lumière (Agronomists, 2007).

➤ **Formation du coléoptile**

Le coléoptile, bien formé dès l'état embryonnaire, est une structure en forme de dé à coudre qui enveloppe la première feuille et facilite sa traversée du sol. Il peut mesurer environ 50 mm de long et 2 mm de diamètre. Sa couleur est généralement blanche, à l'exception de deux fines bandes chlorophylliennes. L'extrémité du coléoptile, arrondie et fermée, comporte un petit pore d'environ 0,25 mm par lequel passera la première feuille une fois la lumière détectée. Lorsque le coléoptile atteint la surface du sol, il cesse de croître, et la première vraie feuille le traverse. Tant que cette étape n'est pas atteinte, la plantule dépend exclusivement des réserves de la graine. La particularité du coléoptile est qu'il peut détecter la direction de la surface du sol, contrairement à la première feuille qui, si elle émerge sous terre, peut pousser de manière désorientée (Agronomists, 2007).

2.2 Facteurs affectant la germination et l'émergence

La germination et l'émergence du blé sont principalement influencées par trois facteurs clés. Premièrement, la dormance des graines varie selon les variétés : faible et rapide chez les blés blancs australiens, mais plus longue (3-7 mois) chez les blés rouges européens/nord-américains en raison d'anthocyanes dans leur tégument. Deuxièmement, l'humidité du sol est déterminante pour la vitesse de germination, un sol sec la ralentissant considérablement. La graine peut suspendre et reprendre sa germination si le sol s'assèche, restant viable jusqu'à l'arrivée de nouvelles pluies. Cependant, un sol compacté ou croûté après le semis peut entraver l'émergence des plantules, surtout pour les variétés à coléoptile court ; des pratiques

comme l'ajout de gypse/chaux ou la rétention de chaume peuvent améliorer la structure du sol et la levée (Agronomists, 2007). Enfin, la température est un facteur majeur, avec une plage optimale de 12 °C à 25 °C. La vitesse de germination est directement liée à la température cumulée (en degrés-jours), nécessitant environ 35 degrés-jours pour être visible, par exemple 5 jours à 7 °C ou 3,5 jours à 10 °C (Agronomists, 2007).

3. La production du blé dur

3.1. La production mondiale

À l'échelle mondiale, le blé dur représente une part relativement modeste de la production céréalière, avec environ 10 % du volume total de blé cultivé (FAO, 2023). Toutefois, sa valeur économique est plus élevée que celle du blé tendre, en grande partie grâce à l'industrie des pâtes, qui stimule la demande. Le prix du blé dur est généralement supérieur de 10 à 20 % à celui du blé tendre (Sall *et al.*, 2019).

La culture du blé dur est concentrée dans trois principales zones géographiques : la région méditerranéenne, les grandes plaines situées entre le Canada et les États-Unis, ainsi que les zones arides du sud-ouest des États-Unis et du nord du Mexique. Les plus grands producteurs mondiaux sont la Turquie et le Canada, suivis par l'Algérie, l'Italie et l'Inde. (Abou-Ayana *et al.*, 2020).

Dans le bassin méditerranéen, la production varie fortement d'une année à l'autre en raison de sa forte dépendance aux conditions climatiques, notamment aux précipitations. En Afrique du Nord et dans le sud de l'Europe, les épisodes de sécheresse affectent considérablement les rendements (Ranieri, 2015). Face à une production locale insuffisante, les pays méditerranéens dépendent des importations : ils acquièrent annuellement plus de 5 millions de tonnes de blé dur, principalement du Canada et des États-Unis. (USDA, 2024)

D'après le Conseil international des céréales (CIC) (2024), la campagne 2023/2024 a été marquée par une baisse de 10 % de la production mondiale, qui s'est établie à 31,4 millions de tonnes métriques (MMT). La demande a dépassé l'offre de 2,6 MMT, entraînant un marché tendu (**Figure 3**). Le Canada, principal exportateur mondial, a enregistré une chute de 30 % de sa production, atteignant seulement 4 MMT, en raison de la sécheresse dans ses principales régions agricoles.

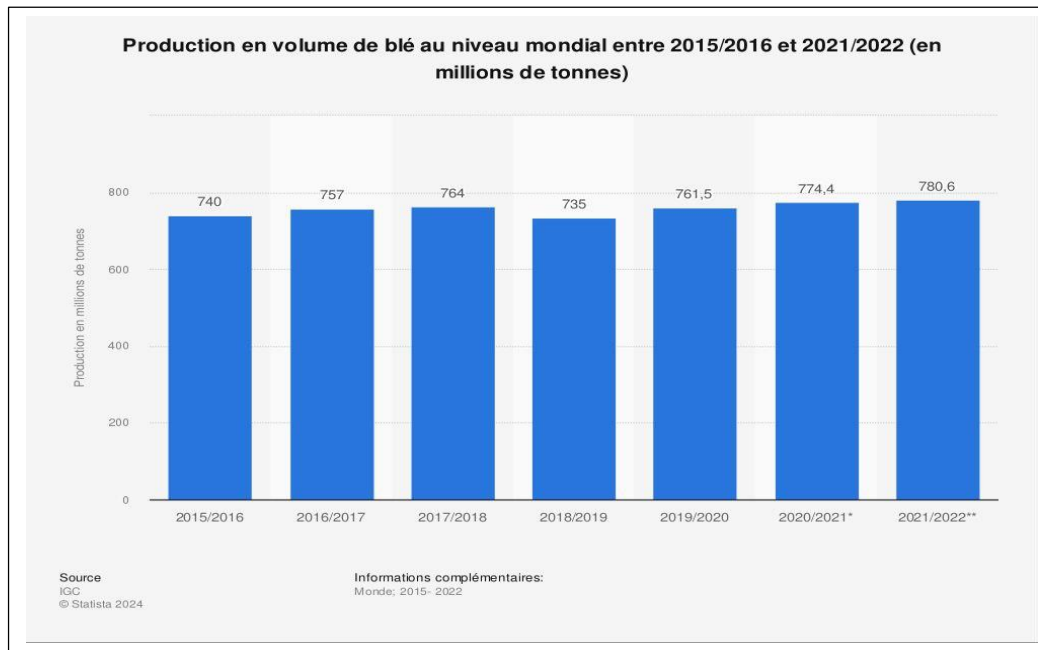


Figure 3: production en volume de blé au niveau mondial entre 2015/2016 et 2021/2022 (en millions de tonnes). (Statista, 2022)

3.2. La production céréalière en Algérie

L’Algérie s’étend sur une superficie totale de 238 millions d’hectares, dont environ 80 % sont occupés par le désert du Sahara (Direction des Systèmes d’Information, des Statistiques et de la Prospective, 2019). La superficie agricole représente 18,5 % du territoire national, mais seule une partie de cette surface est effectivement exploitée. La superficie agricole utile (SAU) est estimée à 8,56 millions d’hectares, avec environ 4,8 millions d’hectares consacrés aux cultures herbacées, notamment les céréales.

Dans un contexte climatique difficile, la céréaliculture reste la principale activité agricole dans les zones arides et semi-arides. Cependant, la production nationale varie fortement selon les années, en raison de la dépendance aux conditions climatiques, notamment à la quantité et à la répartition des précipitations (Djermoun, 2009). Pour la campagne 2023/2024, la production algérienne de blé est estimée à 2,7 millions de tonnes, en baisse par rapport à la saison précédente (2022/2023), où elle avait atteint environ 3,7 millions de tonnes (USDA, 2024).

Face à cette instabilité de la production locale, l’Algérie a recours massivement aux importations pour combler ses besoins. Avec une consommation annuelle moyenne de 11 millions de tonnes, elle se positionne comme le deuxième plus grand consommateur de blé en Afrique du Nord, après l’Égypte. En 2023/2024, les importations de blé ont atteint environ 8,7

millions de tonnes, marquant une hausse de 7,4 % par rapport à l'année précédente (United States Department of Agriculture, 2024). Les principaux fournisseurs sont la France, les États-Unis, le Canada et l'Argentine (USDA, 2024 ; Rastoin et Benabderrazik, 2014).

4. Le stress

Le stress, en biologie végétale, est une situation dans laquelle une plante est exposée à des conditions défavorables (internes ou externes) qui perturbent sa croissance, son développement ou son fonctionnement normal. Cela peut être causé par des facteurs abiotiques (comme la sécheresse, le froid, ou la salinité) ou biotiques (comme les maladies ou les insectes). (Menacer, 2007)

4.1. Les types de stress

4.1.1. Stress biotique

Le stress biotique désigne l'ensemble des contraintes exercées sur un organisme vivant par d'autres organismes vivants, tels que les insectes, les micro-organismes et les mauvaises herbes qui attaquent les plantes (Kazi *et al.*, 2013). Ces organismes peuvent endommager directement les tissus végétaux ou interférer avec le métabolisme de la plante et affaiblir son système immunitaire, ce qui entraîne une réduction de la croissance et du rendement.

➤ Les maladies principales du blé dur

Le blé est susceptible d'être affecté par diverses maladies pendant son cycle de croissance, pouvant entraîner des baisses significatives de rendement, particulièrement si la variété cultivée est vulnérable et si les conditions environnementales favorisent la propagation des pathogènes, en particulier les agents cryptogamiques responsables de dommages considérables. (Aouali et Douici-Khalfi, 2013).

Le blé dur est sensible à plusieurs maladies fongiques importantes, notamment l'oïdium (*Erysiphe graminis f.sp. tritici*), qui se manifeste par des taches blanches poudreuses sur les feuilles et se propage rapidement par temps doux et humide (Amrani, 2013 ; Merouche, 2015). La septoriose, causée principalement par *Zymoseptoria tritici*, est une pathologie majeure pouvant entraîner des pertes de rendement allant jusqu'à 40 % et se caractérise par des taches brunâtres à centre clair sur les feuilles, se développant par temps frais et humide (Dean *et al.*, 2012 ; HGCA, 2012 ; Fones *et al.*, 2015). La fusariose (*Fusarium roseum* et *Microdochium nivale*) est également une préoccupation. Le blé dur est également affecté par les rouilles : la rouille jaune (*Puccinia striiformis f.sp. tritici*), qui prospère dans un climat

frais, nuageux, humide et venteux (Amrani, 2013 ; Moreau, 2011), et la rouille brune (*Puccinia triticina*), reconnaissable à ses pustules brun orangé sur les feuilles, favorisée par des températures modérées et une forte humidité, et qui réduit l'activité photosynthétique (Aouali et Douici-Khalfi, 2009).

4.1.2. Stress abiotique (non –vivant)

Les stress abiotiques désignent l'ensemble des effets néfastes engendrés par des facteurs non vivants sur les organismes vivants au sein de leur environnement (Vinebrooke *et al.*, 2004). Ces facteurs peuvent perturber le fonctionnement physiologique des organismes à l'échelle individuelle ou nuire aux performances globales d'une population, provoquant ainsi des dommages chez les plantes, les animaux et les microorganismes (Etsami *et al.*, 2018; FAO, 2021 ; Islam et Sandhi, 2022 ; Tellah *et al.*, 2022).

Les plantes sont plus affectées du fait qu'elles dépendent des facteurs environnementaux, qui peuvent leur imposer des modifications métaboliques, physiologiques, phénologiques et peuvent même entraîner la mort des plantes (shilpi et Narendra, 2005 ; Less et Galili, 2008 ; Guo et David ho, 2008 ; Etsami *et al.*, 2018).

On distingue plusieurs types de stress abiotiques, généralement classés selon leur origine : atmosphérique ou édaphique. Les stress d'origine atmosphérique regroupent notamment les variations extrêmes de température (chaleur ou froid) ainsi que les fluctuations d'humidité liées à des précipitations anormales, pouvant entraîner des situations de sécheresse ou d'inondation (FAO, 2021 ; Islam et Sandhi, 2022 ; Tellah *et al.*, 2022).

Les stress édaphiques, quant à eux, sont liés aux propriétés du sol, telles qu'une faible fertilité, une salinité ou une acidité élevées, ou encore la présence de concentrations toxiques de métaux lourds ou de polluants organiques (FAO, 2021 ; Tellah *et al.*, 2022). Une grande diversité de facteurs environnementaux abiotiques, indépendants les uns des autres, sont ainsi à l'origine des stress identifiés (**Tableau 2**)

Tableau 2: Les facteurs environnementaux et leurs impacts biologiques sur la plante

facteur	effets primaires	Effets Secondaires
Sècheresse	Réduction Du Potentiel Hydrique, Déshydratation Cellulaire,	Réduction de l'expansion fermeture stomatique, Photosynthèse, des Cellules, Inhibition de abscission la Foliaire, déstabilisation des membranes et protéines, production de ros,

		cytotoxicité ionique, mort cellulaire
Salinité	Réduction Du Potentiel Hydrique, Déshydratation Cellulaire, Cytotoxicité Ionique	Identique Au déficit hydrique
Lumière	Photoinhibition, Production De Ros	Inhibition de la réparation de PSII, réduction De La fixation du CO ₂
Chaleur	Déstabilisation des membranes et des protéines	Inhibition de la Photosynthèse et de la respiration, production de ros, mort cellulaire
Froid	Déstabilisation des membranes	Dysfonctionnement des membranes
Inondation	hypoxie, anoxie	Réduction de la respiration, métabolisme fermentatif, Production De toxines par les Microbes anaérobies, production de ros. fermeture stomatique
Gel	Réduction du Potentiel hydrique. hydratation cellulaire, formation de cristaux de glace symplasiques	effets identiques destruction Physique au déficit hydrique.
métaux et polluants	liaison Perturbée des cofacteurs aux protéines Et a l'ADN. Production de	perturbation du métabolisme, mimer d'autres métaux essentiels

	ros	
--	-----	--

4.2. Le stress thermique

La variation des températures affecte, au même titre que le manque d'eau, la croissance et le développement de la plante. Certains stades végétatifs et périodes du cycle de développement sont particulièrement plus sensibles à ces événements climatiques (Hopkins, 2003).

La contrainte thermique est une fonction complexe qui varie selon l'intensité, la durée et les taux d'augmentation ou de diminution de la température (Oukarroum, 2007).

4.3. Le stress salin

On définit la salinité comme l'accumulation de sels solubles dans la solution du sol à un niveau qui gêne la croissance et le développement des végétaux. Il existe généralement deux sortes de salinité : la salinité primaire et la salinité secondaire (Munns *et al.*, 2006).

Le stress salin se réfère à une élévation soudaine de la concentration en sels qui résulte d'une part, d'un influx accru d'ions dans la cellule suite à la diminution de la concentration du milieu extérieur, et d'autre part, à une déperdition d'eau par le biais de l'osmose. On constate une présence notable de sels dissous non seulement en milieu marin, mais également dans de nombreux environnements terrestres (Ben Hebireche et Djafour, 2011).

4.4. Le stress hydrique

Le stress hydrique désigne une perturbation physiologique survenant chez la plante en réponse à une disponibilité en eau insuffisante ou excessive, se traduisant par une réduction de sa croissance et/ou de sa capacité reproductive par rapport au potentiel génétique du génotype (Lamaze *et al.*, 1994). La contrainte hydrique correspond ainsi à l'ensemble des facteurs responsables de cette limitation hydrique. Certains auteurs restreignent la définition du stress hydrique aux seules situations où l'hydratation des tissus végétaux est inférieure au seuil optimal. L'apparition d'un épisode de sécheresse résulte généralement d'une combinaison entre une diminution de l'eau disponible dans le sol et une augmentation de la demande évaporative de l'atmosphère (Kiani, 2007).

Le stress hydrique, principalement causé par la sécheresse, se manifeste comme une perturbation physiologique majeure pour les plantes (Bouremani *et al.*, 2023 ; Ranjan *et al.*, 2023). La sécheresse elle-même est définie comme une période prolongée où le déficit en eau est tel qu'il perturbe la croissance et la productivité des cultures. (Boyer, 1982) On distingue

plusieurs formes de sécheresse qui peuvent induire ce stress : la sécheresse météorologique due à un manque de précipitations, la sécheresse hydrologique caractérisée par une raréfaction des ressources en eau (superficielles et souterraines), la sécheresse agricole où l'humidité du sol diminue, affectant directement le développement des plantes, et la sécheresse socio-économique où les besoins en eau des populations et des activités économiques ne sont plus satisfaits (Ngumbi et Kloepper, 2018 ; Sati *et al.*, 2023).

5. Impacts du stress hydrique sur la croissance et la physiologie des plantes

Le stress hydrique, ou sécheresse, est un facteur multidimensionnel qui affecte profondément la croissance des plantes en altérant leur potentiel hydrique et leur turgescence cellulaire (Bouremani *et al.*, 2023 ; Ranjan *et al.*, 2023). Un niveau d'humidité adéquat est essentiel au métabolisme et au développement embryonnaire des graines. Sous conditions de sécheresse, l'absorption d'eau devient insuffisante, ce qui ralentit significativement la germination (Kapoor *et al.*, 2020).

Ce stress provoque des déséquilibres hormonaux, notamment une augmentation de l'acide abscissique (ABA) et une diminution de l'acide gibbérellique (AG), prolongeant ainsi la dormance des graines et compromettant la germination (Ali *et al.*, 2023). Il impacte également la croissance des plantes en causant une faible densité de semis, une croissance inégale, une diminution de la hauteur et du poids frais, et une baisse généralisée des rendements (Zia *et al.*, 2020 ; Ranjan *et al.*, 2023). La période de reproduction est particulièrement vulnérable, la sécheresse perturbant la floraison et le développement des organes reproducteurs. De plus, le stress hydrique induit une forte concentration d'éthylène, contribuant à des désordres physiologiques comme la chlorose et la sénescence prématurée des feuilles (Salehi-Lisar et Bakhshayeshan-Agdam, 2016 ; Ali *et al.*, 2023). En outre, le stress hydrique affecte la nutrition minérale des plantes. La réduction de l'eau dans le sol entrave l'absorption des nutriments essentiels (azote, phosphore, potassium, calcium) par les racines à cause d'un déséquilibre osmotique, entraînant des carences et des symptômes tels que le retard de croissance et les chloroses (Salehi-Lisar et Bakhshayeshan-Agdam, 2016 ; Kapoor *et al.*, 2020). La perte de turgescence cellulaire et la stabilité des membranes sont des indicateurs clés de cette réponse (Ahmad *et al.*, 2018). Ce stress perturbe aussi gravement la photosynthèse. La fermeture des stomates, induite par l'ABA, limite l'entrée de CO₂, réduisant le métabolisme photochimique et carboné. Cela favorise la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) et endommage les photosystèmes, diminuant l'efficacité photosynthétique

(Kapoor *et al.*, 2020 ; Zia *et al.*, 2020). L'activité de la RuBisCO est affaiblie et les pigments chlorophylliens sont réduits, ce qui nuit à la production de biomasse (Bouremani *et al.*, 2023 ; Gu *et al.*, 2024).

6. Stratégies d'amélioration des cultures contre le stress abiotique

Ces dernières années, plusieurs études ont mis en évidence le rôle des micro-organismes bénéfiques, notamment les bactéries, dans l'amélioration de la tolérance des plantes aux stress abiotiques comme la sécheresse. L'utilisation d'inoculants bactériens constitue ainsi une approche écologique, simple et peu coûteuse, contribuant à la sécurité alimentaire en conditions de stress (Ngumbi et Kloepper, 2016 ; Etesami *et al.*, 2020 ; Cherif-Silini *et al.*, 2021 ; Giannelli *et al.*, 2023).

7. Définition des PGPR

Les bactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) sont des micro-organismes présents dans la rhizosphère, la zone du sol entourant les racines. Elles colonisent la surface ou les alentours des racines et contribuent activement à la croissance et au développement des plantes. Ces bactéries sécrètent divers composés bénéfiques qui stimulent la croissance végétale, renforcent la tolérance des plantes aux stress environnementaux et améliorent leur capacité à absorber les nutriments du sol (Kumar *et al.*, 2021 ; Vocciante *et al.*, 2022 ; Agarwal *et al.*, 2023 ; Hnini *et al.*, 2024).

7.1. Classification des PGPR :

Les PGPR sont classées selon leurs fonctions principales en trois catégories :

- Biofertilisateur : Une suspension contenant des microorganismes vivants qui, une fois appliquée sur des graines, sur une plante ou dans le sol, colonisent la rhizosphère ou l'intérieur de la plante et promeuvent la croissance par l'augmentation de la disponibilité des nutriments principaux pour la plante hôte, par la fixation biologique de l'azote et la solubilisation de phosphore (Martinez-Viveros *et al.*, 2010)
- Phytostimulateur : Des microorganismes qui ont la capacité de produire ou de changer la concentration des régulateurs de la croissance comme l'acide indole acétique, l'acide gibbérellique, les cytokinines ou l'éthylène (Martinez-Viveros *et al.*, 2010)

- Biopesticide : Des microorganismes qui stimulent la croissance d'une plante via le contrôle des agents phytopathogènes, principalement par la production des antibiotiques et des métabolites antifongiques (Martinez-Viveros *et al.*, 2010)

7.2. Mécanisme d'action des PGPR

7.2.1. Mécanismes directs :

Certains PGPR stimulent la croissance des plantes en absence des agents pathogènes. Les mécanismes directs de l'action des PGPR comprennent l'amélioration de la nutrition des plantes en leur fournissant des éléments nutritifs (ex : P, K, Zn, Fe, autres nutriments minéraux essentiels) ou à travers la stimulation de la croissance et le développement des plantes, par la régulation des niveaux de phytohormones (Gouda, 2018 ; Kalam, 2020).

➤ La Fixation de l'azote

La fixation biologique de l'azote, assurée par certaines bactéries du sol, constitue un mécanisme fondamental par lequel les plantes tirent avantage de leur interaction avec les micro-organismes (Bhattacharyya *et al.*, 2012 ; Gupta *et al.*, 2015). Ces bactéries convertissent l'azote gazeux en ammoniac grâce à un système enzymatique spécialisé ; Elles représentent une catégorie importante de biofertilisants, offrant une alternative écologique aux engrais chimiques (Cherif, 2014). Parmi les PGPR capables de fixer l'azote atmosphérique, on retrouve notamment *Azoarcus* spp., *Burkholderia* spp., *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum* ; *Azotobacter*, *Paenibacillus* et les rhizobiums (formant des nodules symbiotiques) (Munes et Mulugeta, 2014).

➤ La Solubilisation du Phosphore inorganique

Le phosphore est un élément nutritif essentiel à la croissance et au développement des plantes. Il joue un rôle déterminant dans la formation du système racinaire, la régulation de la floraison, ainsi que dans le développement et la maturation des fruits, contribuant ainsi à une croissance équilibrée de la plante (Kour *et al.*, 2023). Cependant, dans le sol, le phosphore présente une faible mobilité, ce qui favorise son adsorption aux particules du sol, le rendant peu disponible pour les plantes (Holford, 1997). Les bactéries solubilisatrices de phosphate (PSB) libèrent des acides organiques pour rendre le phosphore sous forme d'orthophosphates (PO_4^{3-}) assimilables par les plantes (Govind *et al.*, 2015) (**Figure 4**).

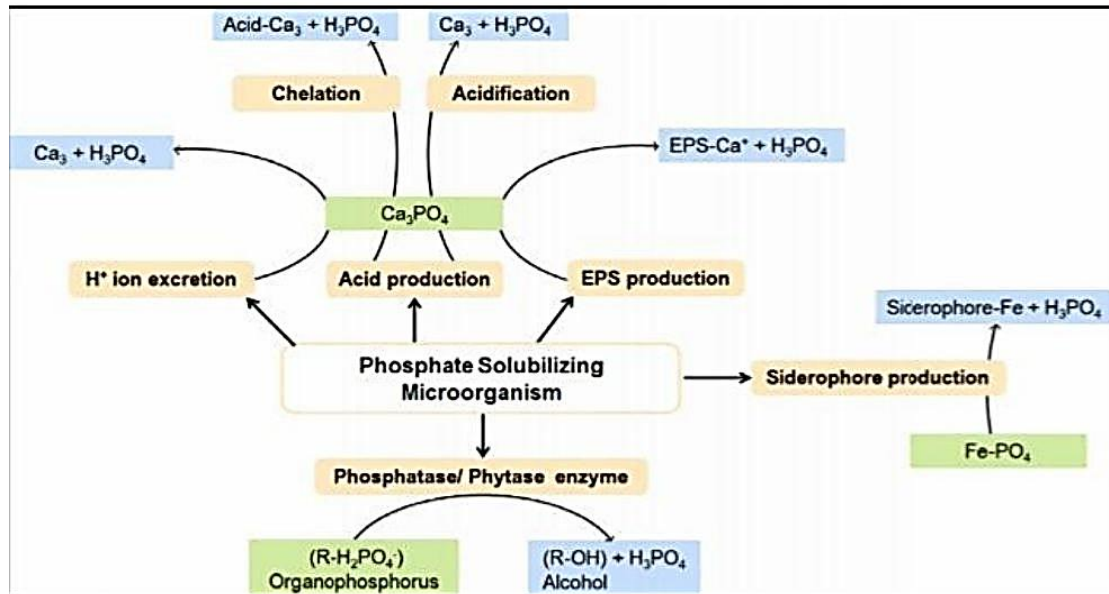


Figure 4: Mécanismes de solubilisation des phosphates inorganiques et organiques

(Prabhu *et al.*, 2019)

➤ **La Solubilisation du Potassium**

Le potassium représente, après l’azote et le phosphore, le troisième élément nutritif majeur requis pour la croissance et le bon développement des plantes (Ding *et al.*, 2021 ; Patel *et al.*, 2021). Bien que le potassium soit abondamment présent dans la lithosphère, il est en grande majorité sous des formes insolubles, principalement incorporé dans des minéraux silicatés, rendant plus de 90 % de ce potassium non disponible pour les plantes (Parmar et Sindhu, 2013). La fraction disponible, assimilable sous forme ionique (K^+), ne constitue qu’environ 1 à 2 % du total présent dans le sol (Mengel et Kirkby, 2001).

Certaines PGPR (rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes) sont capables de libérer le potassium fixé dans les roches potassiques par la production d’acides organiques, facilitant ainsi sa solubilisation et son absorption par les plantes (Meena *et al.*, 2020). Plusieurs genres microbiens ont été identifiés pour leur efficacité dans ce processus, notamment *Arthrobacter* spp., *Streptomyces* spp. *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Klebsiella*, *Erwinia* ainsi que *Acidithiobacillus* spp., *Bacillus edaphicus*, *Ferrooxidans* spp., *Bacillus mucilaginosus*, *Burkholderia* spp., et *Paenibacillus* spp. (Etesami *et al.*, 2017 ; Dos Santos *et al.*, 2020 ; Wang *et al.*, 2020).

➤ La Production de Sidérophores

Le fer est un oligoélément vital, mais sa forme (Fe^{3+}) est peu soluble dans le sol. Certaines PGPR produisent des sidérophores, de petites molécules chélatrices qui complexent le fer et le rendent bio-disponible pour la plante, augmentant sa solubilité dans la rhizosphère. Cela confère également un avantage compétitif aux bactéries dans l'environnement racinaire, en limitant l'accès au fer pour d'autres microflores concurrentes, renforçant ainsi leur capacité de colonisation. Les genres *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, *Bacillus* sont connus pour cette capacité (Hider, 2010 ; Shaikh, 2015 ; Singh *et al.*, 2019).

➤ Synthèse de phytohormones par les PGPR

Les phytohormones sont des substances organiques naturelles actives à très faibles concentrations, capables de moduler de nombreux processus physiologiques et morphologiques chez les plantes, tels que la division cellulaire et l'allongement des racines (Parewa, 2018). Au-delà de leur rôle direct dans la croissance végétale, ces molécules influencent fortement le métabolisme global des plantes. Elles interviennent également dans les réponses adaptatives face aux stress abiotiques tels que la sécheresse, la salinité, les températures extrêmes (froid et chaleur) (Latif *et al.*, 2022).

Les PGPR (rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes) jouent un rôle clé en produisant diverses phytohormones bénéfiques. Parmi les principales, on retrouve l'auxine, l'éthylène, les cytokinines, les gibbérellines (GA) et l'acide abscissique, toutes impliquées dans l'amélioration de la tolérance des plantes aux conditions environnementales défavorables (Ghitri, 2018).

L'auxine est une phytohormone majeure impliquée dans la régulation de la croissance et du développement des plantes (Tsukanova *et al.*, 2017). Parmi les différentes formes d'auxines, l'acide indole-3-acétique (AIA) est la plus étudiée pour son rôle central dans les interactions symbiotiques entre les plantes et les bactéries (Luo, 2018). Son action principale concerne l'élongation racinaire, notamment la stimulation des poils absorbants et des racines secondaires, ce qui favorise une augmentation de la libération des exsudats racinaires (Grobelač, 2015). Plusieurs genres bactériens tels que *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Bacillus* et *Klebsiella* sont reconnus pour leur capacité à synthétiser l'AIA dans la rhizosphère de diverses cultures (Choudhary *et al.*, 2018).

Cytokinines : Stimulent les divisions et l'élargissement cellulaires, influençant l'organogénèse et l'architecture racinaire, et l'absorption des nutriments. Elles sont produites par *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Bacillus*, entre autres (Nasir, 2016 ; Grover *et al.*, 2020).

Gibbérellines (GA) : Favorisent la division cellulaire, l'élongation des tiges et la croissance racinaire. Des bactéries comme *Acetobacter diazotrophicus* et *Bacillus pumilus* en produisent (Shaikh, 2015 ; Grover *et al.*, 2020).

Éthylène (régulation par ACC désaminase) : L'éthylène est crucial pour divers processus végétaux, mais des niveaux élevés peuvent être stressants. Certaines PGPR produisent l'enzyme 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase, qui dégrade le précurseur de l'éthylène, régulant ainsi ses niveaux bénéfiquement. *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter* sont des exemples de genres produisant cette enzyme (Ahmed *et al.*, 2017 ; Singh *et al.*, 2019).

En conditions de stress abiotique, les Bactéries Promotrices de Croissance Végétale (PGPR) déploient un mécanisme adaptatif essentiel impliquant la synergie entre la production d'ACC-désaminase et de l'Acide Indole Acétique (AIA) (Figure 5). L'interaction de ces deux mécanismes est synergique : la réduction de l'éthylène par l'ACC-désaminase permet aux racines de répondre plus efficacement à la stimulation de l'AIA bactérien. Ce qui confère aux plantes une meilleure tolérance aux stress abiotiques, se traduisant par une croissance accrue, une biomasse améliorée et, in fine, un rendement supérieur (Glick, 2014 ; Orozco-Mosqueda *et al.*, 2023).

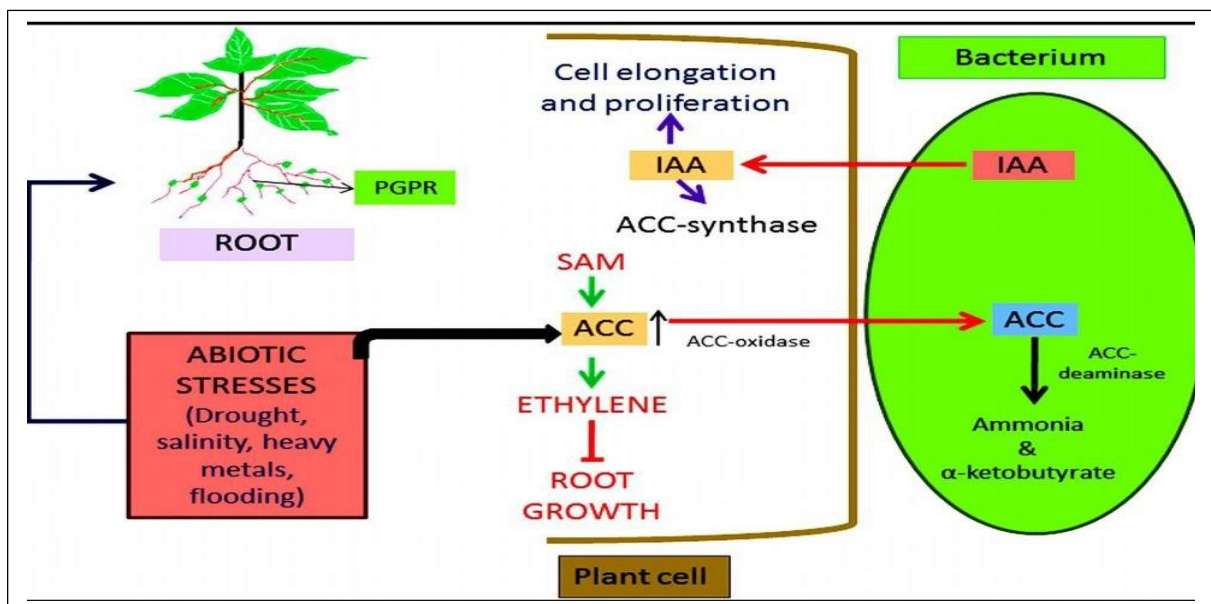


Figure 5: Mécanisme de l'ACC-désaminase en association avec l'AIA en facilitant la croissance végétale sous stress abiotique. (Meena *et al.*, 2020).

7.2.2. Effets indirects :

Les PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), favorisent la croissance des plantes de manière indirecte en inhibant les agents pathogènes via des mécanismes de bio-contrôle. Ils produisent des composés antimicrobiens, des enzymes lytiques et des antibiotiques, tout en stimulant la résistance naturelle des plantes.

➤ Production d'enzymes lytiques

Les PGPR sécrètent des enzymes capables de dégrader la paroi cellulaire des champignons pathogènes. Parmi ces enzymes, on retrouve la chitinase, les glucanases (β -1,3 ; β -1,4 ; β -1,6), la cellulases, les protéases, Les lipolipases, la pectinase et d'autres (Kumar & Dubey, 2012 ; Hakim *et al.*, 2021). Ces enzymes présentent une activité hyperparasitaire contre des agents pathogènes tels que *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Phytophthora spp.*, et *Pythium ultimum* (Yasmin *et al.*, 2016 ; Chen *et al.*, 2020).

➤ La Production d'antibiotiques

La synthèse d'antibiotiques est un autre mécanisme clé. Les PGPR, notamment *Pseudomonas spp.* et *Bacillus spp.*, produisent divers antibiotiques à large spectre, incluant des phénazines, pyrrolnitrine, pyolutéorine, 2,4-diacétylphloroglucinol, lipopeptides, et HCN (Haas et Défago, 2005 ; Meena *et al.*, 2020). Ces substances peuvent inhiber ou tuer plus de 20 types de phytopathogènes (Ulloa-Ogaz *et al.*, 2015). *Bacillus spp.* produit également des antibiotiques ribosomiques (ex. subtilosine A) et non ribosomiques (ex. mycobacilline, difficidine) (Wang *et al.*, 2015). Ainsi, les PGPR assurent un environnement racinaire sain, réduisant la pression pathogène tout en renforçant les défenses naturelles des plantes (Tabassum *et al.*, 2017 ; Naik *et al.*, 2019).

➤ La Résistance systémique acquise et induite

La Résistance Systémique Acquise (RSA) et la Résistance Systémique Induite (RSI) correspondent à des mécanismes physiologiques activés chez les plantes pour renforcer leur immunité face à des agents pathogènes dans des conditions environnementales spécifiques. (Pieterse *et al.*, 2014). Ces résistances améliorent les défenses innées des plantes contre de futures attaques. La RSI est notamment déclenchée par l'action des bactéries bénéfiques du sol, appelées PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), qui amorcent une immunité généralisée contre divers pathogènes végétaux (Naznin *et al.*, 2013). Ce processus repose sur la reconnaissance par la plante de molécules stimulatrices produites par les PGPR, entraînant une réaction de défense similaire à celle observée lors d'une infection pathogène directe

(Rehman *et al.*, 2020). Ainsi, bien que la RSA soit activée par un pathogène, la RSI résulte de l'action des PGPR, mais les deux induisent des réponses comparables. L'expression phénotypique de la RSI comprend quatre étapes : la perception des stimulateurs bactériens, la transmission du signal au reste de la plante, une mise en alerte générale sans grands changements transcriptionnels initiaux, puis, à l'attaque, l'activation de mécanismes de défense empêchant l'infection des tissus végétaux (Chérif, 2018).

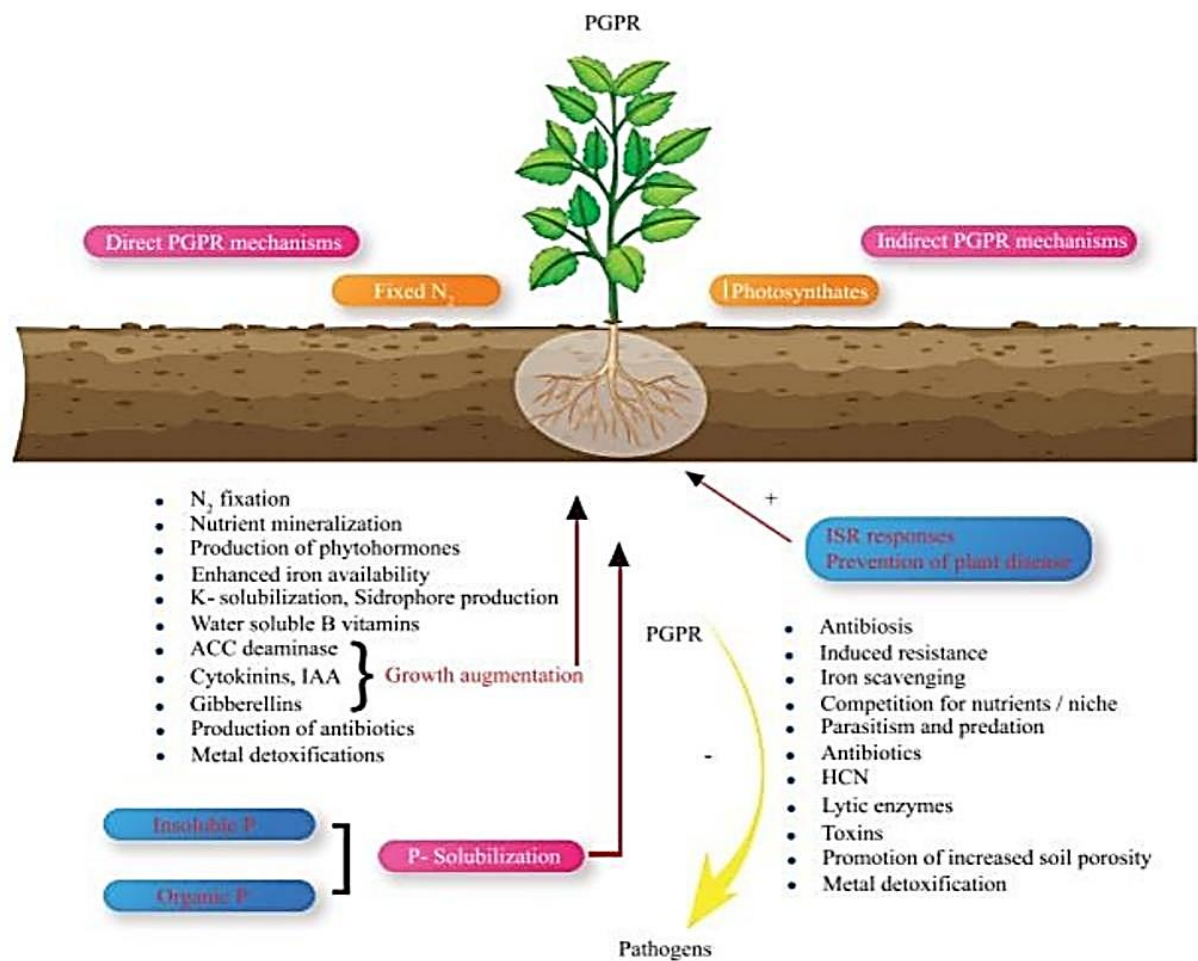


Figure 6: Mode d'action des PGPR indiquant des effets directs et indirects dans l'amélioration de la croissance des plantes et la suppression des phytopathogènes (Hyder *et al.*, 2023).

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. L'objectif de travail :

L'objectif de cette étude est la caractérisation de quatre Isolats PGPR et d'évaluer leur impact sur la germination du blé dur (*Triticum durum*) en conditions de stress hydrique induit par le polyéthylène glycol (PEG-6000).

2. Période et lieu de stage

Le travail réalisé s'est déroulé au sein des laboratoires pédagogiques de l'Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana, dans une période de 3 mois environ, du début de mois de Mars jusqu'à la Fin du mois de Mai 2025.

3. Matériel utilisé

a. Le matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué de semences de blé dur (*Triticum durum*), appartenant à la variété Simeto, connue pour son potentiel de rendement et sa sensibilité relative au stress hydrique. Les graines ont été obtenues auprès de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Khemis Miliana a Ain Defla .

b. Le matériel bactérien

Les quatre Isolats de PGPR étudiés proviennent de la collection de laboratoire de recherche (eau, roche, plante) de l'Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana.

4. Méthodologie

4.1. Etude la morphologie des Isolats

4.1.1. La revivification des Isolats

Les isolats conservées à -20°C dans du glycérol (60%) (V/V) sont Revivifiées ; où 100ul de solution stock est ensemencé dans 9ml de milieu LB liquide et incubé a 28°C pendant 48 heures sous agitation à 160rpm.

4.1.2. Ensemencement et purification

Après croissance, 100 µl de chaque isolat a été ensemencé dans des conditions stériles sur boîte de Petri contenant du milieu LB (annexe 1). La technique des stries par épuisement a été utilisée pour obtenir des colonies bactériennes séparées. Les boîtes ont été fermées et incubées

dans une étuve à 28°C pendant 48h. Les bactéries sont purifiées par repiquage successif jusqu'à l'obtention de colonies bien isolées.

4.1.3. Etude macroscopique

Pour l'examen macroscopique, les colonies bactériennes ont été observées à l'œil nu et sous loupe binoculaire. Cette observation a permis de déterminer leurs caractères morphologiques, incluant la viscosité, la couleur, la taille, la forme, le contour et l'aspect de surface.

4.1.4. Etude microscopique.

L'examen microscopique a été effectué après la coloration de Gram. Cette technique a été développée par (Hans Christian Gram, 1884), permet de révéler l'affiliation positive ou négative des cellules bactériennes selon la structure de leur paroi, et de détermine la morphologie des cellules, ainsi que leur mode d'association.

Après la préparation d'un frottis bactérien fixé et séché à la chaleur, la lame est recouverte de violet de gentiane, après 1 minute, le colorant est rejeté, et la lame est recouverte de Lugol Pendant 1 minute puis il est rejeté. Une décoloration à l'alcool est ensuite réalisée, la lame étant tenue inclinée, la durée de décoloration à l'alcool est variable selon l'épaisseur du frottis.

En pratique, la durée de décoloration est suffisante lorsque ce qui s'écoule en bas de la lame inclinée devient clair, la décoloration est stoppée par un nouveau lavage à l'eau. La lame est recouverte ensuite de fuchsine diluée pendant 30 secondes à 1 minute puis lavée à l'eau et séchée, elle est ensuite examinée à l'immersion au Grossissement X100.

Les bactéries à Gram positif doivent apparaître colorées en violet et les bactéries à Gram Négatif en rose. (Lanotte *et al.*, 2016).

4.2. La caractérisation biochimique

La caractérisation biochimique s'est basée essentiellement sur l'utilisation de la Galerie API. Le système API 20 E de BioMérieux est une méthode biochimique miniaturisée et standardisée permettant l'identification rapide des bactéries, Il repose sur 20 tests biochimiques intégrés dans une micro-galerie contenant des substrats déshydratés.

a) Préparation de la galerie

- Réunir fond et couvercle d'une boîte d'incubation et répartir environ 5ml d'eau Distillé stérile dans les alvéoles pour créer une atmosphère humide.

- Inscrire la référence de la souche sur la languette latérale de la boîte
- Sortir la galerie de son emballage individuel.
- Placer la galerie dans la boîte d'incubation.

b) Préparation de l'inoculum

Une colonie isolée sur un milieu de culture solide est transférée dans 2ml d'eau physiologique stérile, puis homogénéisée. La turbidité est ajustée à une DO à 600 nm d'environ 0,1.

c) Inoculation des galeries API 20 E

L'inoculation des puits de la galerie API 20E est réalisée à l'aide d'une micropipette stérile, en veillant à ne pas introduire de bulles d'air. La suspension bactérienne est déposée délicatement sur le côté de la cupule, en la laissant s'écouler doucement, selon les spécifications suivantes :

- Pour les tests encadrés (CIT, VP, GEL) : Remplir entièrement la cupule (tube et orifice) afin d'assurer des conditions d'aérobiose.
- Pour les tests soulignés (ADH, LDC, ODC, H₂S, URE) : Remplir uniquement le tube de la cupule avec la suspension bactérienne, puis recouvrir l'orifice d'une couche d'huile de paraffine stérile pour créer des conditions d'anaérobiose.
- Pour les autres caractères (non encadrés et non soulignés) : Remplir uniquement le tube de la cupule avec la suspension bactérienne, laissant l'orifice vide pour des conditions d'aérobiose. (Annexe 05)
- Fermer la boîte et mettre à l'étuve à 28°C pendant 24h.

d) Lecture des galeries API 20 E

Après l'incubation, les réactions dans chaque compartiment sont observées et notées. Des réactifs peuvent être ajoutés (TDA, VP1, VP2, Nit 1, Nit 2, Kovacs (JAMES) et la poudre de Zinc) à certains compartiments pour révéler des réactions finales.

Les résultats des réactions biochimiques ont été compilés pour générer un code numérique unique, reflétant le profil métabolique de l'organisme. Ce code est alors comparé à une base de données de référence à l'aide du tableau (Biomérieux., 2006). pour déterminer l'identité probable du micro-organisme testé.

4.3. Production de l'acide indole acétique (AIA)

L'estimation de la capacité des souches à produire l'acide indole acétique (AIA) extracellulaire a été déterminée selon la méthode décrite par Sheng *et al.* (2008). Les bactéries ont été cultivées sur milieu SMS additionné de 0,5 mg ml⁻¹ de tryptophane pendant 96 heures à 280°C, sous agitation constante de 150 rpm.

Après la croissance, 500µl du surnageant récupéré par centrifugation à 6000 rpm/min pendant 15 min est directement utilisé pour la quantification de l'AIA en rajoutant 1ml du réactif Salkowski (6 ml FeCl₃, 120 ml H₂SO₄ (acide sulfurique), 200ml H₂O). Le mélange a été incubé à température ambiante pendant 30 min. La production d'AIA a été quantifiée par spectrophotométrie à 535 nm et a été comparée ensuite avec une courbe standard préparée à partir d'AIA commercial. Toutes ces expériences ont été réalisées en trois répétitions.

4.4. L'étude de la réponse des grains de blé dur au stress hydrique

4.4.1. Désinfection des grains

Les grains de blé dur sont désinfectés avec de l'éthanol à 70% pendant 2 min, suivi par une solution d'hypochlorite de calcium Ca(ClO)₂ à 2% pendant 15 min, puis rincées 5 à 7 fois à l'eau distillée stérile.

4.4.2. Préparation de solution de solution Polyéthylène Glycol (PEG)

Le polyéthylène glycol (PEG) est un polymère hydrosoluble neutre, couramment utilisé en biologie pour simuler un stress hydrique par effet osmotique, notamment grâce à son poids moléculaire élevé qui empêche son absorption par les cellules (Michel & Kaufmann, 1973).

Dans ce travail, on a utilisé le PEG 6000 pour préparer des solutions de concentrations différentes : 0% (témoin), 5%, 10%, 15% et 20%, avec un volume final de 100 ml pour chaque solution. Pour la solution témoin (0%) on a utilisé l'eau distillée, et pour les autres concentrations on a dissoudre les quantités suivantes de PEG 6000 dans de l'eau distillée :

- L'eau distillée pour la solution témoin (0%)
- 5 g pour la solution à 5%
- 10 g pour la solution à 10%
- 15 g pour la solution à 15%
- 20 g pour la solution à 20%.

Toutes les solutions ont été stérilisées avant utilisation.

4.4.3. Préparation de l'inoculum

L'inoculum bactérienne des quatre Isolats étudiés a été préparé en bouillon LB et incubé (28°C /24h) sous agitation. Les suspensions bactériennes ont été centrifugées à 6000rpm/min pendant 5min. Les culots ont été lavés deux fois avec l'eau distillée stérile, puis resuspendus dans une solution saline (0,9%) stérile pour obtenir une concentration de 10^8 UFC /ml

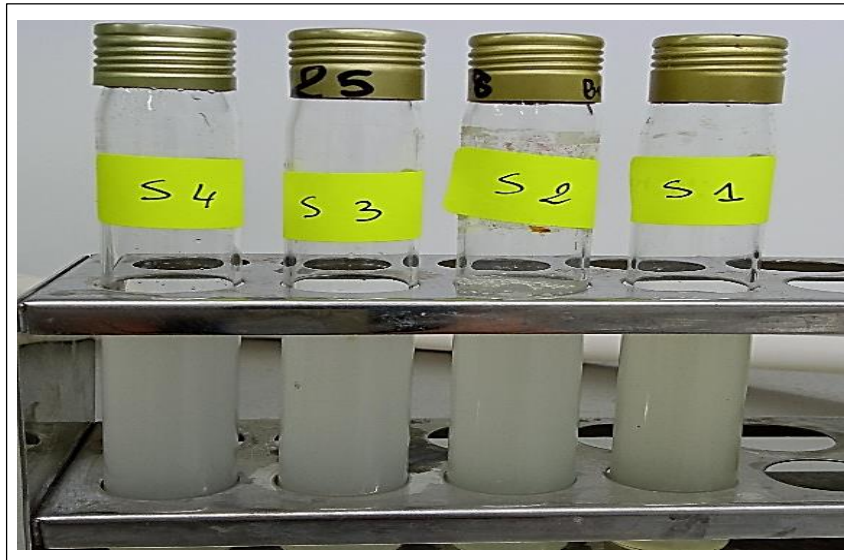


Figure 7: les inoculums bactériens utilisés

4.4.4. Inoculation des graines

Les graines stérilisées en surface ont été réparties en cinq lots: quatre pour les traitements bactériens et un pour le témoin (Figure 9). Pour chaque traitement, les graines ont été imbibées dans une suspension bactérienne (correspondant à l'un des quatre inoculum) pendant 30 min sous agitation douce pour assurer un bon contact entre les graines et les bactéries. Le lot témoin a été traité de la même manière, mais les graines ont été trempées uniquement dans de l'eau distillée stérile pendant la même durée 30 min, sans présence de bactéries.

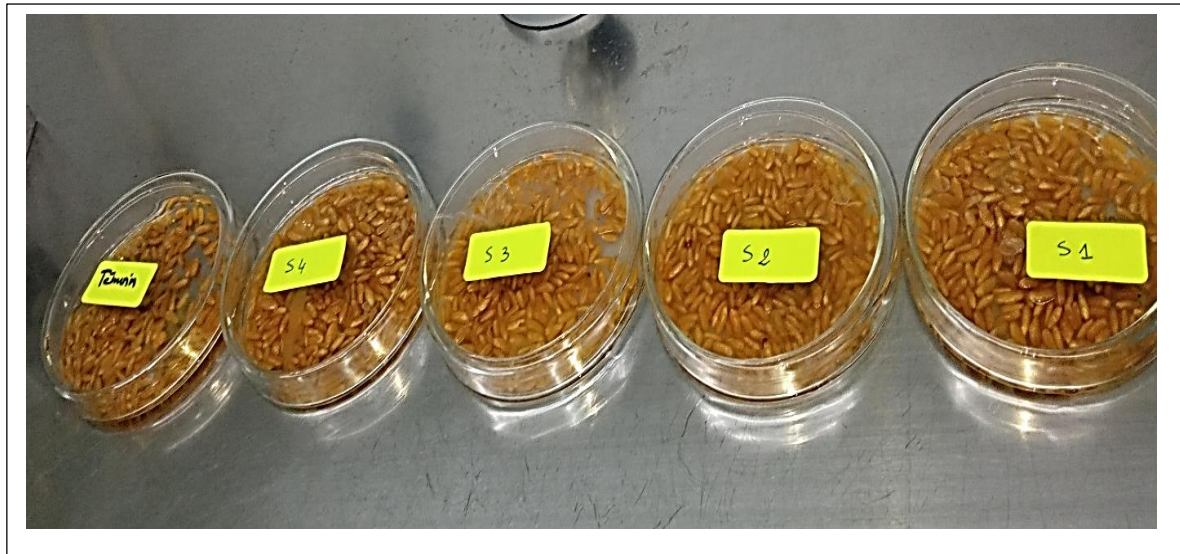


Figure 8: l'inoculation des grains de blé dur

4.4.5. Test de germination in vitro

La germination est réalisée en trois répétitions et cinq traitements : Témoin, S1, S2, S3 et S4 en l'absence et en présence de concentrations de PEG-6000 (5%,10%,15% et 20%). Les graines sont ensuite déposées dans des boîtes de Pétri (10 grains de chaque boîte) sur une double couche de papier filtre imbibé de 7 ml d'eau distillée stérile pour le témoin, et de solution de PEG (5%,10%,15% et 20%) pour les autres traitements. Les boîtes sont incubées à l'obscurité à 22 ± 2 °C. Un total de 25 traitements effectués en triplicata a été réalisé

4.4.6. Suivre de la germination et les paramètres évalués

Le suivi de la germination a été réalisé en observant l'évolution des graines aux jours 3, 5, 7 et 9 après l'inoculation. Quatre paramètres principaux, permettant de quantifier la germination et la vigueur des plantules, ont été calculés selon les méthodes décrites par Kerbab (2021) :

- Pourcentage de germination (PG)

$$PG = (\text{Nombre de graines germées} / \text{Nombre total de graines}) \times 100$$

- L'indice du taux de germination (ITG)

$$ITG = G_{3/3} + G_{5/5} + G_{7/7} + G_{9/9}$$

où G3, G5, G7 et G9 représentent les pourcentages de germination respectifs aux jours 3, 5, 7 et 9.

- l'indice de vigueur de la longueur des plantules (IVLP)

$$\text{IVLP} = \text{Longueur du plant (cm)} \times (\%) \text{ germination.}$$

- l'indice de vigueur du poids des plantules (IVPP)

$$\text{IVPP} = \text{Poids du plant (mg)} \times (\%) \text{ germination}$$

Chapitre III : Résultats et discussion

1. L'étude morphologique des souches

Les caractéristiques morphologiques des colonies ont été examinées pour évaluer la diversité des isolats étudiés. Les colonies formées par les souches sur milieu LB solide apparaissent homogènes le long des stries après 48h de culture. Elles présentent des caractères morphologiques différents (couleur, forme, diamètre, texture) (Figure10). La couleur des colonies est blanche, crème, ou jaune (**Tableau 3**). Ces variations reflètent une diversité phénotypique importante entre les souches

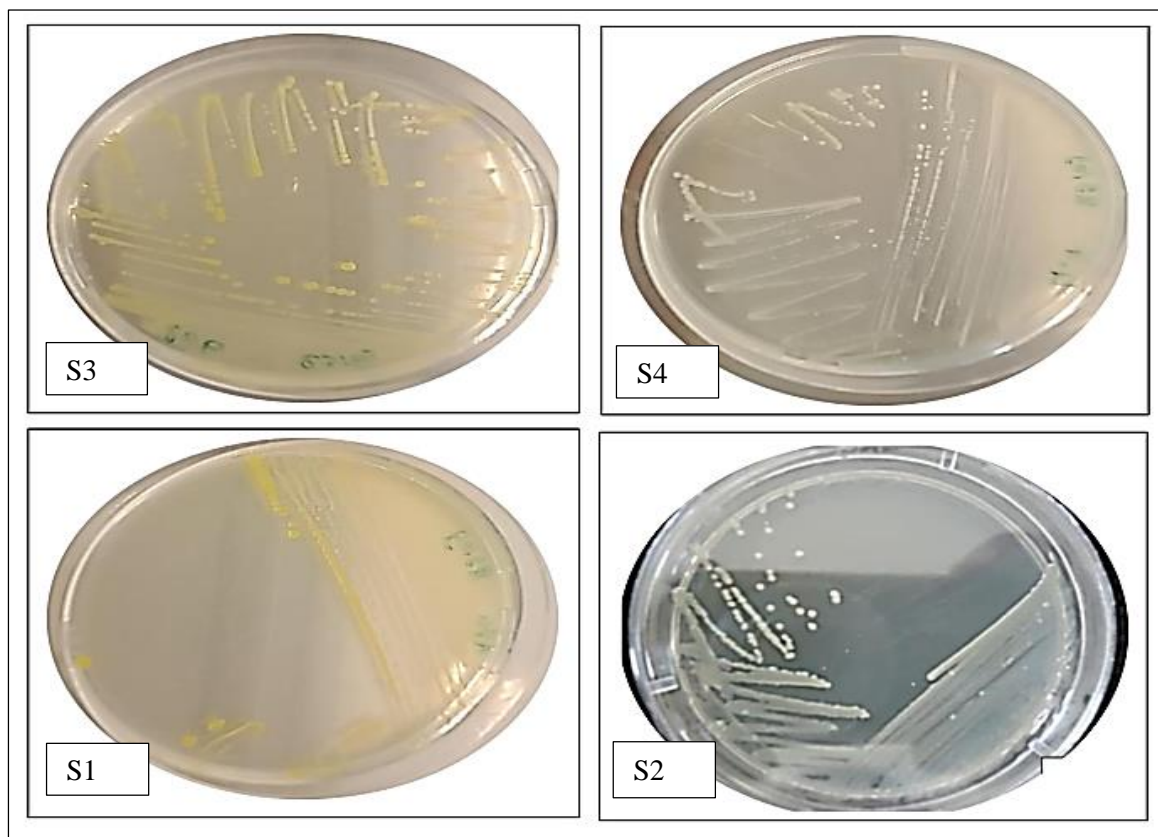


Figure 9: Aspect macroscopique des souches étudiées

L'observation microscopique après coloration de Gram a montré que tous les isolats étudiés sont des Bacilles Gram négatif, généralement isolée ou en paires (**Tableau 3**). Plusieurs études ont rapporté que la plus part des espèces colonisant la rhizosphère des plante sont des Gram négatif (Berendsen *et al.*, 2012 ; Philippot *et al.*, 2013)

L'étude morphologique et microscopique des isolats a révélé une diversité phénotypique significative, typiques des bactéries rhizosphériques. Ces caractéristiques suggèrent des capacités écologiques et fonctionnelles variées, notamment en lien avec la colonisation racinaire.

Tableau 3: Caractéristiques morphologiques, culturelles des isolats étudiés

Isolats	Caractères macroscopiques	Caractères microscopiques
S1	Des Colonies circulaires et régulières, de taille moyenne. présentant une surface lisse et souvent brillante, une couleur jaune intense virant à l'orange, et une consistance visqueuse	Petits bacilles, Paroi Gram Négatif, isolés ou en diplo
S2	des colonies blanche de petite taille, circulaires et régulières, à surface lisse et brillante. Les colonies visqueuses, opaques, légèrement bombées, et caractérisées par une forte odeur de terre mouillée	
S3	es colonies circulaires et régulières de taille moyenne présentant une surface lisse. de couleur jaune pâle et une forme légèrement bombée, ce qui les rend faciles à prélever.	
S4	Des Colonies circulaires, de petite taille, avec une surface lisse, non visqueuse à contour régulier et une couleur crème translucide	

2. La caractérisation biochimique

L'identification biochimique des quatre bactéries étudiées a été réalisée à l'aide du système API 20E, qui est particulièrement utile pour les bacilles Gram-négatifs, qui sont fréquemment rencontrés dans les sols et les environnements végétaux. L'utilisation des Galerie API fournit une empreinte métabolique unique pour chaque isolat.

Une grande variabilité est observé entres les isolats étudiés (**Figure 10**) même s'ils possèdent certaines caractéristique communes. En effet, Les quatre isolats bactériens ont montré de larges capacités fermentatives, étant constamment positifs pour la fermentation du glucose, du mannitol, du sorbitol, du saccharose, du mélibiose et de l'arabinose. Et se sont avérés uniformément négatifs pour la production de H₂S, l'activité uréase et la tryptophane désaminase. Ce qui suggère qu'ils possèdent une capacité métabolique de base partagée, pertinente pour leur niche écologique (Mendes *et al.*, 2013). Cependant, l'isolat S1 : Se distingue par ses résultats négatifs pour la consommation de citrate (CIT), le test de Voges-Proskauer (VP), l'hydrolyse de la gélatine (GEL), la fermentation de l'amygdaline (AMY) et la réduction des nitrates (NO₂). Il est d'ailleurs le seul à ne pas réduire les nitrates. Alors que L'isolat S2 se démarque par sa fermentation positive de l'Inositol (INO), la différenciant clairement des trois autres. Tandis que l'isolat S3 est Nettement séparé par ses résultats négatifs pour ONPG, production d'indole (IND) et la fermentation du rhamnose. Il est

également important de noter qu'il est positif pour l'arginine dihydrolase (ADH). L'isolat S4 se caractérise par un résultat négatif pour la lysine décarboxylase (LDC) l'arginine dihydrolase (ADH). Il partage par ailleurs un résultat négatif pour la gélatinase (GEL) avec l'isolat S1 (Tableau 4).

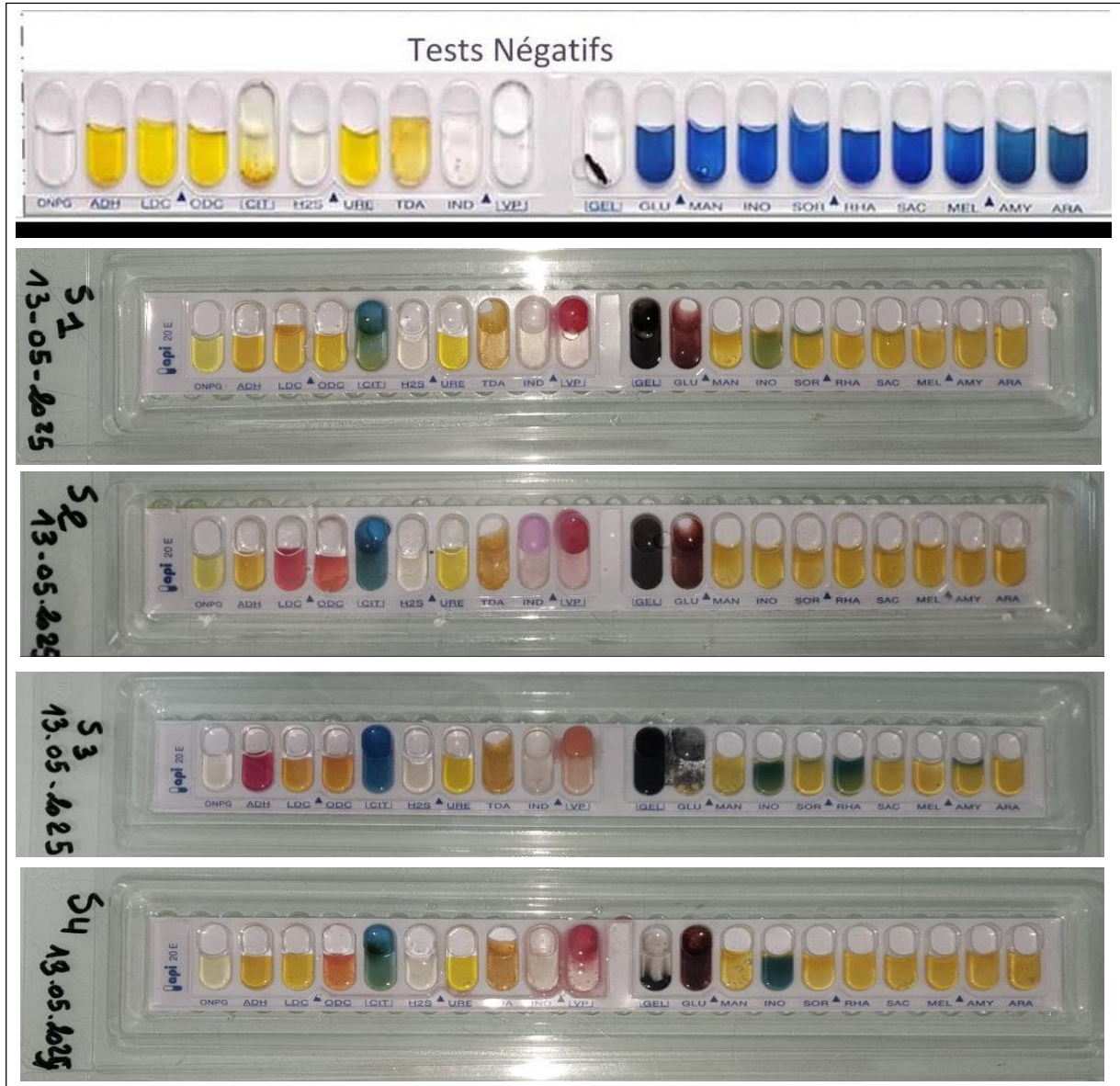


Figure 10: Galerie API 20E après incubation

Tableau 4: Résultats de test galerie API 20E

	S1	S2	S3	S4
ONPG	+	+	-	+
ADH	-	-	+	+
LDC	+	+	+	-
ODC	+	+	+	+
CIT	-	+	+	+
H2S	-	-	-	-
URE	-	-	-	-
TDA	-	-	-	-
IND	+	+	-	+
VP	-	+	+	+
GEL	-	+	+	-
GLU	+	+	+	+
MAN	+	+	+	+
INO	-	+	-	-
SOR	+	+	+	+
RHA	+	+	-	+
SAC	+	+	+	+
MEL	+	+	+	+
AMY	-	+	+	+
ARA	+	+	+	+
NO2	-	+	+	+

Le code numérique à 7 chiffres généré pour chaque isolat est comparé avec la base de données API (BioMérieux), a permis une affiliation au niveau du genre (**Tableau 5**) ; l'isolat S1 semble être affilié au genre, l'isolat S2 à *Serratia*, l'isolat S3 à *Pseudomonas* et l'isolat S4 à *Rahnella*

Tableau 5: identification des souches par code API

Isolat	Code numérique	genre
S1	5441572	<i>Pantoea</i>
S2	5644777	<i>Serratia</i>
S3	6604567	<i>Pseudomonas</i>
S4	3642577	<i>Rahnella</i>

Les souches identifiées appartiennent aux genres *Pantoea*, *Rahnella*, *Pseudomonas* et *Serratia*, tous reconnus dans la littérature comme des bactéries rhizosphériques dotées de capacités PGPR. En effet, ces bactéries présentent divers mécanismes favorisant la croissance des plantes, notamment la production d'auxines, la solubilisation du phosphate, la formation

de biofilm et la tolérance au stress abiotique (Glick, 2012 ; Lugtenberg et Kamilova, 2009 ; Amaya-Gómez *et al.*, 2020).

3. La production de l'Acide Indole Acétique (AIA)

La production d'acide indole-acétique (AIA) a été évaluée chez les quatre souches bactériennes à l'aide du test colorimétrique de Salkowski, méthode largement utilisée pour estimer la capacité des bactéries à produire des auxines via la voie du tryptophane (Glick, 2012). Les résultats ont révélé une variabilité entre les souches, traduisant des potentiels fonctionnels différents (**Figure 11**).

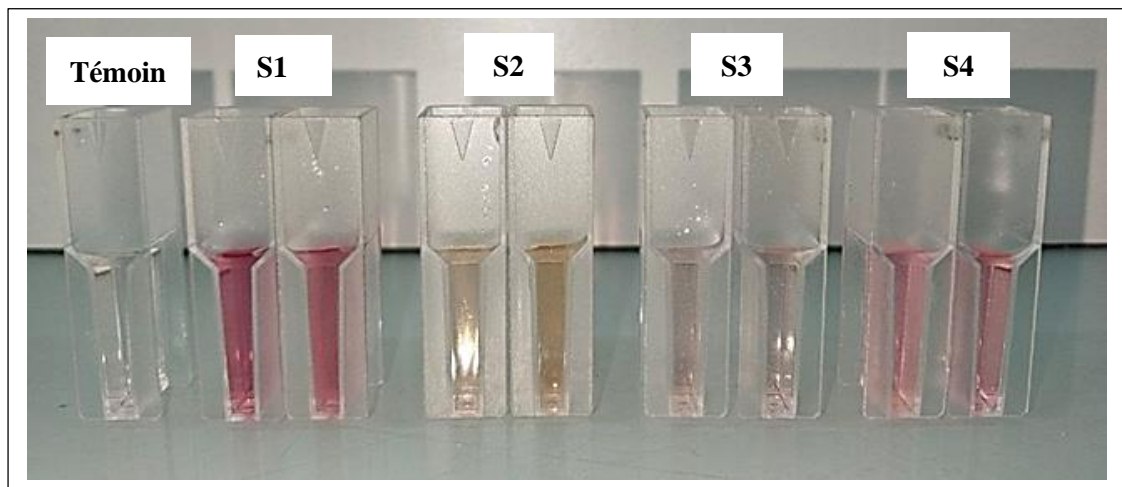


Figure 11: Test de production d'AIA par la méthode colorimétrique de Salkowski

La souche S1 a montré une production élevée d'AIA (40,09 $\mu\text{g/mL}$), suggérant un rôle déterminant dans la stimulation de la croissance racinaire et l'amélioration de la tolérance au stress des plantes (Spaepen et Vanderleyden, 2011). Les souches S4 avec (16,24 $\mu\text{g/mL}$) d'AIA et S2 (13,76 $\mu\text{g/mL}$) présentent des niveaux intermédiaires, qui pourraient être suffisants dans certaines conditions, mais probablement moins efficaces de manière isolée (Patten & Glick, 2002). La souche 3, à l'inverse, a affiché une production très faible (7,25 $\mu\text{g/mL}$), ce qui pourrait expliquer une efficacité réduite en tant qu'agent phytostimulant.

La production des phytohormones comme les auxines par les PGPR a été signalée par divers chercheurs ; Chaiharn et Lumyong (2011), ont constaté qu'environ 80% des bactéries de la rhizosphère peuvent sécréter de l'AIA. mais les quantités produites varient considérablement selon les études. Des niveaux élevés de production d'AIA ont été rapportés pour des espèces de *Pseudomonas* (Ahmad *et al.*, 2008a; Kumar *et al.*, 2012; Kaur et Sharma, 2013). D'autres genres bactériens, tels que *Aeromonas*, *Burkholderia* (Halda-Alija, 2003) et *Bacillus* (Swain *et al.*, 2007), sont également connus pour leur capacité à produire cette phytohormone.

Sous conditions de croissance optimales, les rhizobactéries peuvent produire des quantités d'auxine variant de 53,1 à 71,1 $\mu\text{g/mL}$ (Lwin *et al.*, 2012; Kaur et Sharma, 2013), bien que des productions plus faibles aient aussi été rapportées. Globalement, la littérature révèle une large gamme de production d'AIA par les bactéries, allant de 35 à 217 $\mu\text{g/mL}$ (Shobha et Kumudini, 2012).

4. La réponse des grains de blé dur au stress hydrique

L'impact de différents niveaux de stress hydrique, simulé par diverses concentrations de PEG6000 (5, 10, 15 et 20%), sur la germination des grains de blé dur a été mis en évidence par l'analyse de plusieurs paramètres clés. Ceci inclut notamment le calcul du pourcentage de germination (PG), de l'indice de vitesse de germination, de l'indice de vigueur basé sur la longueur des plantules (IVLP) et de l'indice de vigueur basé sur le poids des plantules (IVPP), tant en l'absence qu'en présence de bactéries rhizosphériques.

4.1. Pourcentage de germination (PG)

La germination constitue une phase déterminante du cycle de développement des plantes, particulièrement sensible aux variations des conditions environnementales. Ce processus dépend d'une hydratation suffisante des graines, favorisant l'activation enzymatique, la mobilisation des réserves et la reprise de la croissance embryonnaire. Le pourcentage de germination est donc un indicateur clé de la vitalité des semences et du potentiel de développement des plantules, notamment en présence de contraintes abiotiques telles que le stress hydrique.

Les résultats de la mesure du taux de germination du blé, illustrés dans la figure 13, montrent une diminution progressive en fonction de l'augmentation du stress hydrique pour tous les traitements. Il passe d'environ 97% à 0% de PEG à environ 43% à 20% de PEG. Cela confirme que le stress hydrique a bien un effet inhibiteur sur la germination du blé dur.

En l'absence de stress toutes les souches bactériennes maintiennent un pourcentage de germination très élevé, comparable au témoin (autour de 90-100%). Les grains inoculés par la souche 4 ont montré les meilleur taux de germination et dépassent légèrement, le témoin et les autres souches, atteignant environ 100% de germination. Les grains inoculés avec les souches S1 et S3 montrent un pourcentage légèrement inférieur au témoin, mais toujours très élevé.

A un niveau de stress modéré ; à (5 % de PEG6000), les grains inoculés par la souche S1 (*Pantoea*) et la souche S4 (*Rahnella*) ont enregistré des taux de germination élevés (90%) suivi par ceux inoculé avec la souche S3 (*Pseudomonas*) (86,6%), ce qui reflète leurs bon effet. cependant les grains inoculés avec la souche S2 (*Serratia*) présentent un pourcentage de germination plus faible (80%). Cela suggère un effet bénéfique des Souches 1, 3 et 4 sous un stress hydrique léger.

À 10% de PEG6000 Le pourcentage de germination du témoin continue de baisser (environ 77%). La Souche S1 maintient une performance similaire ou légèrement supérieure au témoin (environ 80%). Cependant, les Souches S2 et S3 montrent une forte sensibilité à ce niveau de stress, avec une baisse marquée de leur pourcentage de germination (environ 60% pour S2 et 50% pour S3), et semblent moins bien supporter ce stress que le témoin. La Souche 4 est comparable au témoin.

À des concentrations élevées (15 % de PEG 6000), Le témoin continue de décliner (environ 74%) ce qui est de même pour les grains inoculés avec S1, S2 et S4 (entre 63% et 70%). En revanche, la Souche 3 montre une performance exceptionnelle, avec un pourcentage de germination qui remonte à environ 80%, dépassant les autres souche. Cela indique une capacité remarquable de la Souche 3 à atténuer le stress hydrique à cette concentration de PEG, suggérant un mécanisme de protection ou de promotion de la germination très efficace à ce stade de stress (Vurukonda *et al.*, 2016)

A un niveau de stress sévère (20% PEG6000) une baisse importante des pourcentages de germination est notée pour tous les traitements. Toute fois la souche 1 affiche le meilleur pourcentage (45%). Les grains inoculés par les souches S2 et S3 sont les plus affectées.

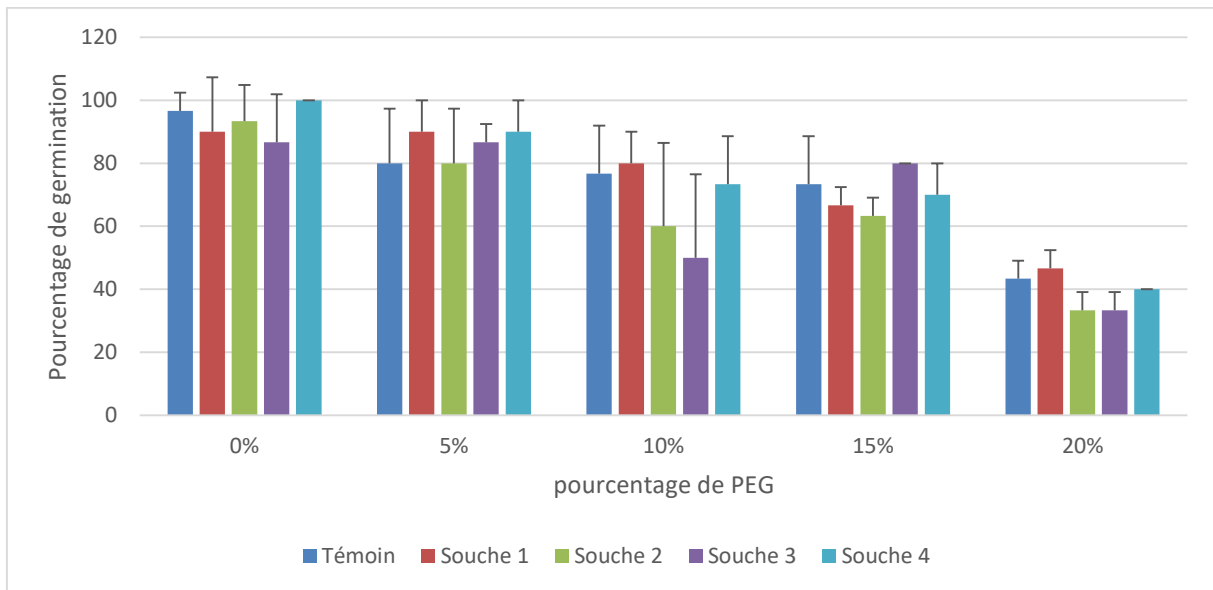


Figure 12: Variations de la moyenne de pourcentage de germination chez la variété de simeto de blé dur.

Ces résultats ont confirmé l'importance des souches S1 et S4 et leur considération en tant qu'agents biologiques capables d'atténuer le stress hydrique sur la germination du blé et sont en accord avec ceux rapportés par (Bouremani et al., 2024), qui ont montré que les souches les plus efficaces pour promouvoir la germination et la croissance du blé sous stress hydrique présente une forte production d'AIA. De plus, les mêmes auteurs ont affirmé que les souches appartenant aux genres *Serratia* et *Pantoea* ont été identifiés comme des souches efficaces pour favoriser la germination du blé ainsi que sa croissance, et leurs effets positifs sont particulièrement notables sous stress.

De nombreuses études concernant l'effet des bactéries promoteurs de la croissance des plantes (PGPR) ont confirmé les observations obtenues dans cette étude, où ces bactéries ont un effet bénéfique par divers mécanismes, notamment la production d'hormones végétales (auxines et cytokinines), la régulation de l'éthylène, la dissolution des éléments nutritifs et la libération de composés protecteurs contre l'osmose (sucres externes, proline). Elles stimulent également l'acquisition de résistance systémique (Glick, 2014). Ces mécanismes contribuent à maintenir l'intégrité des cellules végétales, à améliorer la rétention d'eau et à renforcer l'expression génique liée à la résistance au stress (Vurukonda et al., 2016)

Les genres *Pantoea* et *Serratia* ont été reconnus comme des PGPR performants pour stimuler la germination et le développement des céréales dans des situations de stress, où ils aident à réduire les impacts oxydatifs et à soutenir une activité métabolique propice à la croissance

(Tabassum *et al.*, 2017 Amaya-Gómez *et al.*, 2020). L'emploi de ces souches en tant que biofertilisants représente donc une stratégie prometteuse pour une agriculture durable, qui aide à améliorer la résistance des cultures à la sécheresse dès les premières étapes de croissance.

4.2. L'indice de vitesse de germination (IVG)

L'indice de vitesse de germination (IVG) constitue un paramètre clé pour évaluer non seulement le pourcentage de germination, mais également la rapidité du processus. Il reflète ainsi la vigueur physiologique des semences et leur aptitude à initier rapidement la croissance, des éléments cruciaux dans des environnements soumis à des contraintes abiotiques. Le stress hydrique, induit ici par des concentrations croissantes de PEG 6000, a pour effet de ralentir les processus métaboliques liés à la germination, ce qui se traduit généralement par une baisse de l'IVG.

Dans cette étude, l'évolution de la germination des graines a été suivie au cours des jours 3, 5, 7, 9 et 11 après l'inoculation. Le résultat présenté dans la figure 14 indique une diminution progressive de l'IVG avec l'augmentation du niveau de stress (la concentration de PEG 6000). Cependant, les souches 1 (*Pantoea*) et souche 4 (*Rahnella*) ont montré leur capacité à maintenir une IVG élevée malgré les concentrations élevées de PEG 6000 (5 %, 10 % et 15 %), ainsi que pour la concentration de 20 %. Bien que la plante ait été fortement affectée dans toutes les conditions, ces deux souches ont maintenu un pourcentage élevé par rapport au groupe témoin et aux autres souches. D'autre part, la souche 2 (*Serratia*) et la souche 3 (*Pseudomonas*) ont montré une efficacité limitée et proche du pourcentage du témoin, ce qui reflète leur faible capacité à soutenir une germination rapide dans des conditions de déficit en eau.

Ces observations sont conformes à l'étude de Bouremani *et al.* (2024), où ils ont prouvé la capacité de certaines souches comme *Pantoea agglomerans*, à maintenir des concentrations élevées de glutamate veineux même en présence de fortes concentrations de PEG 6000, ce qui est dû à leur capacité à résister au stress. Selon ces chercheurs, cette capacité est liée à la production de substances protectrices contre les stress abiotiques et à l'activation précoce de l'embryon.

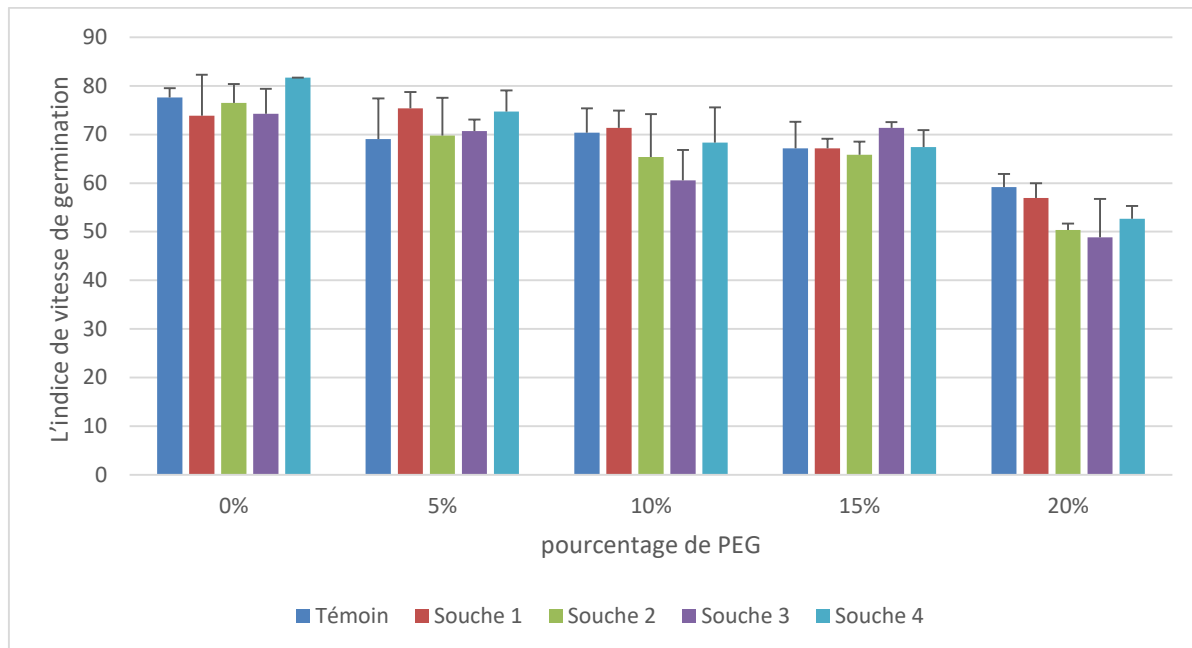


Figure 13: Variations de la moyenne L'indice de vitesse de germination chez la variété de simeto du blé dur

De nombreux chercheurs ont confirmé dans leurs études les effets positifs des PGPR sur la dynamique de la germination en présence de stress hydrique, car ils favorisent une germination rapide par la production d'auxines et la modulation de l'éthylène via l'ACC-déaminase, ainsi que par la production de métabolites bénéfiques (Glick, 2014 ; Vurukonda *et al.*, 2016). Ils contribuent également à améliorer l'absorption d'eau et la stabilité des membranes, tout en réduisant les dommages oxydatifs causés par les espèces réactives de l'oxygène (ROS), qui sont particulièrement délétères en conditions de sécheresse (Ngumbi & Kloepper, 2016). Certains PGPR sont également capables de produire des exopolysaccharides, qui favorisent la rétention d'eau autour des racines et dans la zone rhizosphérique, contribuant ainsi à une germination plus rapide et plus stable (Lugtenberg et Kamilova, 2009).

Ainsi, l'utilisation de souches bactériennes telles que *Pantoea* contribue de manière significative à soutenir la vigueur de la germination du blé dans des conditions de stress hydrique et peut être considérée comme des souches PGPR efficaces en raison de leurs effets positifs sur la résilience des cultures dès les premières étapes de leur croissance.

4.3. L'indice de vigueur de la longueur des plantules (IVLP)

L'indice de vigueur de la longueur des plantules est un paramètre utilisé pour évaluer l'activité et la croissance des jeunes plants. Cet indice combine les mesures des longueurs des

radicules et des coléoptiles pour refléter la vigueur globale (**Figure 14**) et permet de quantifier la qualité et la vitalité des plantules, en tenant compte à la fois de la croissance physique des plants et du taux de succès de la germination.

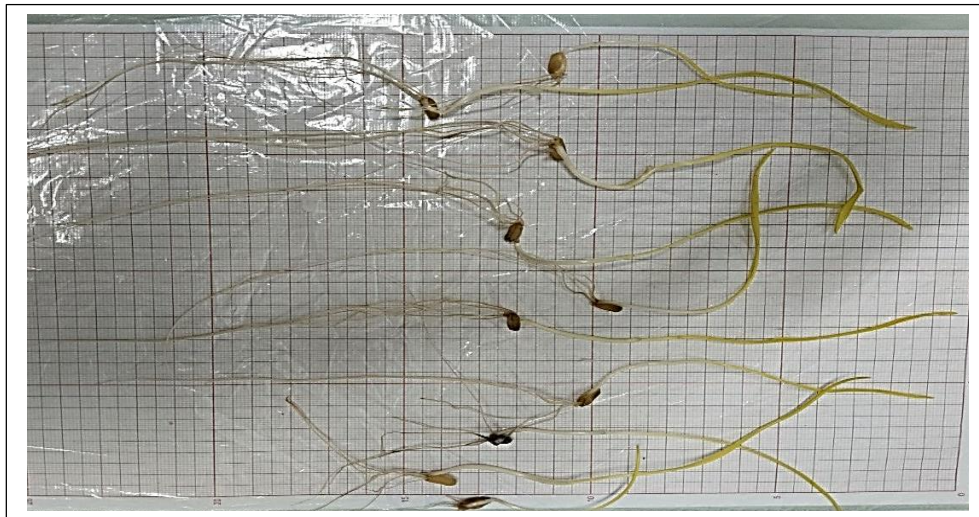


Figure 14: Mesure de la longueur des racines et des tigelles des graines de blé germées

Comme observé pour le pourcentage de germination, l'IVLP du groupe témoin (sans inoculation) diminue progressivement et fortement avec l'augmentation de la concentration de PEG6000. Il passe d'environ 2500 à 0% de PEG à environ 550 à 20% de PEG. Cette baisse importante confirme que le stress hydrique a un effet fortement inhibiteur sur la vigueur et la croissance initiale des plantules (**Figure15**).

En l'absence de stress, toutes souches bactériennes maintiennent un IVLP élevé, comparable ou légèrement supérieur au témoin (autour de 2150 à 2850). Et la souche S4 affiche la valeur la plus élevée (environ 2850), suggérant une légère promotion de la vigueur même en conditions non stressantes (**Figure15**).

À 5% de PEG6000, l'IVLP des témoins passe à environ 2000, Les souches S1 et S4 se distinguent nettement, affichant un IVLP plus élevé (environ 2700 et 2450 respectivement) que le témoin. Ce qui est dû peut être à la capacité des récepteurs de protéines végétales à atténuer les effets du stress hydrique en modifiant la forme de la racine (augmentation de la longueur et du volume racinaire), en produisant des substances osmoprotectrices, et en stimulant des réponses de défense systémique (Ngumbi et Kloepper, 2016 ; Bhardwaj *et al.*, 2014).

La Souche S3 maintient un IVLP comparable au témoin (environ 2200). En revanche, la Souche S2 montre une forte sensibilité présentant un niveau inférieur à celui du témoin.

À 10% de PEG 6000 Les Souches S1 et S4 sont comparables au témoin. Cependant, les Souches S2 et S3 sont les plus affectées à ce niveau de stress, avec des IVLP (environ 1200 et 1000 respectivement), se montrant moins résilientes que le témoin.

À 15% de PEG 6000 Les Souches 1, 2 et 4 continuent de décliner à ce niveau de stress et sont similaires ou inférieures au témoin (environ 1450). Alors que la Souche S3 montre une résilience remarquable, son IVLP remontant à environ 1700. Cette observation est cohérente avec sa performance pour le pourcentage de germination à ce même niveau de stress. Cela suggère un mécanisme d'adaptation ou de promotion de la croissance particulièrement efficace pour la Souche S3 à un stress élevé mais non extrême.

A un Niveau de Stress Sévère (20% PEG6000) l'IVLP est faible pour tous les traitements. et Les Souches 2 et 3 sont les plus sévèrement impactées.

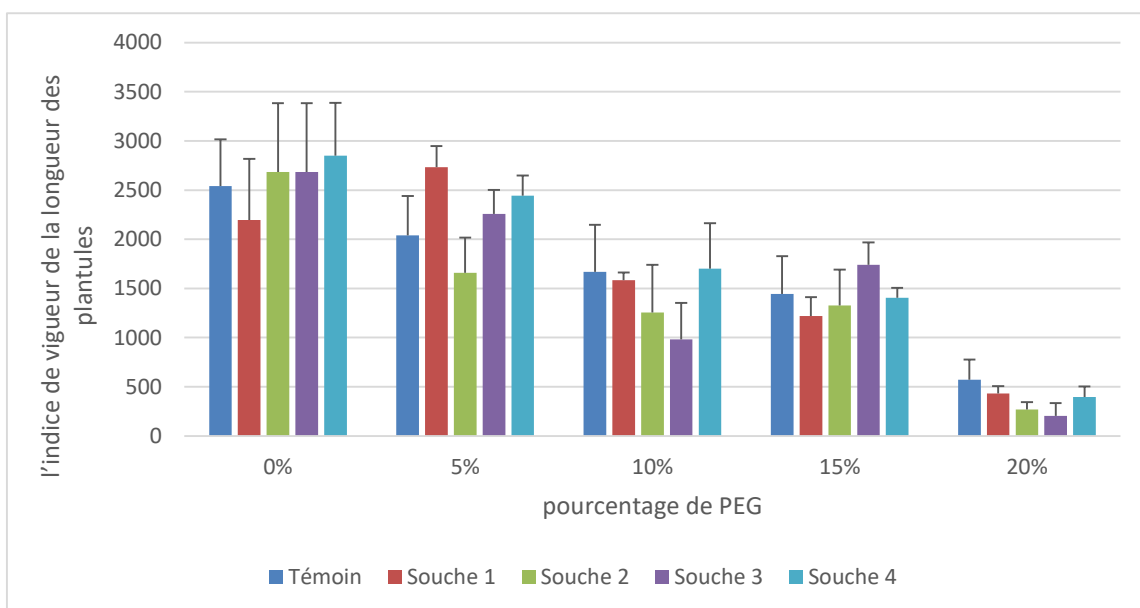


Figure 15: Variations de la moyenne Indice de vigueur de la longueur plantules chez la variété de simeto de blé dur

4.4. L'indice de vigueur de poids des plantules (IVPP)

L'indice de vigueur de poids des plantules (IVPP) est une mesure utilisée pour évaluer la vigueur des plantules en tenant compte à la fois du poids sec des plantules et du pourcentage de germination. Le IVPP est important car il permet de quantifier non seulement la capacité de germination des graines, mais aussi la qualité des plantules qui en résultent, ce qui est

crucial pour déterminer la performance des plantes dans des conditions de stress, comme le stress hydrique. En évaluant l'indice de vigueur de poids des plantules, les chercheurs peuvent mieux comprendre comment différentes conditions environnementales, comme le stress dû à la sécheresse, affectent la croissance des plantes et leur développement.

Les résultats de l'IVPP confirment les résultats obtenus pour l'IVLP, où la souche S4 et le groupe témoin ont montré les valeurs d'IVPP les plus élevées dans des conditions optimales (PEG 0%) (T=211,9 ; S4=226,3). En revanche, dans des conditions modérées (PEG 5%), la souche S1 a présenté les meilleures valeurs (175), ce qui indique une amélioration de l'accumulation de biomasse des plantules (**Figure 16**).

La diminution générale de l'IVPP à des concentrations de PEG plus élevées (10%, 15%, 20%) confirme que le stress hydrique affecte sévèrement l'accumulation de biomasse.

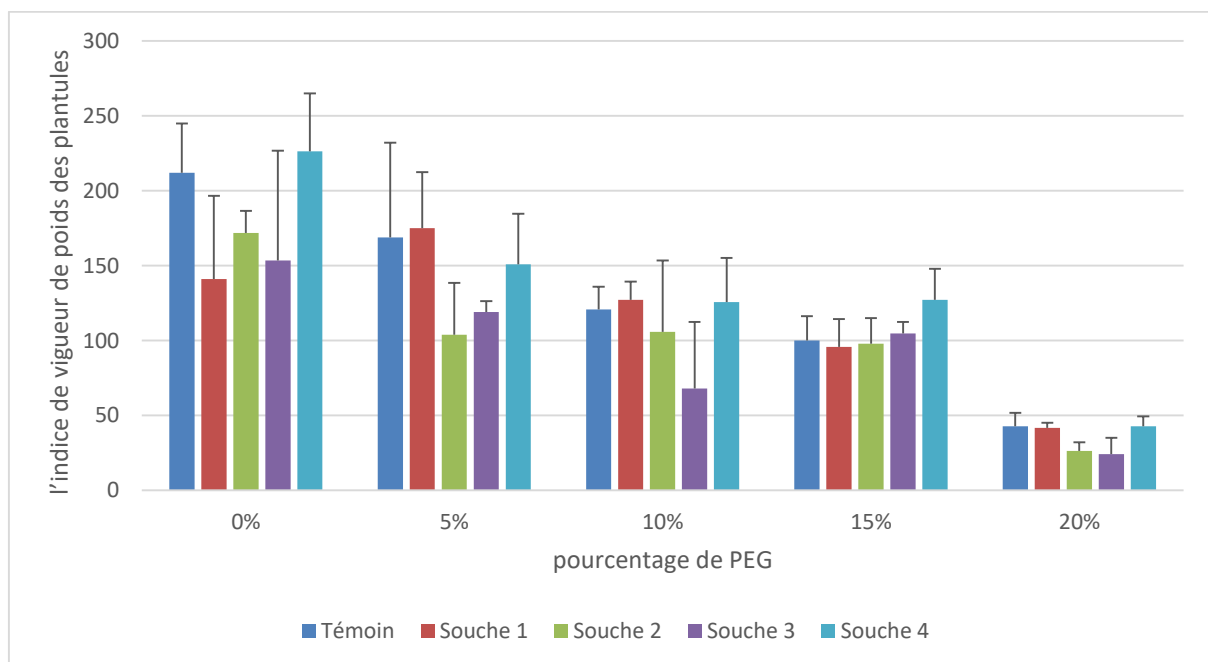


Figure 16: Variations de la moyenne Indice de vigueur de poids des plantules chez la variété de simeto de blé dur

Les PGPR jouent un rôle très important dans le maintien et l'amélioration du poids sec des plantules en conditions de stress, grâce à leur capacité à absorber des éléments nutritifs tels que le phosphore et le potassium, qui sont souvent moins disponibles en cas de stress hydrique (Sharma *et al.*, 2013). Par la production de l'enzyme ACC déaminase, des études ont montré que les bactéries racinaires produisant l'enzyme ACC déaminase augmentent la longueur des racines et des pousses, la masse des racines et le nombre de racines latérales.

dans les plantes de blé, ce qui conduit à une amélioration de l'absorption de l'eau et des nutriments, ainsi qu'à une amélioration de la croissance et de la productivité dans des conditions de sécheresse. Cela confirme que les bactéries produisant l'enzyme ACC déaminase offrent une méthode pratique et économique pour maintenir la productivité des cultures et leur qualité nutritionnelle dans l'agriculture des terres arides, en réduisant directement les niveaux d'éthylène nuisibles, en favorisant la croissance des racines et, par conséquent, en améliorant l'absorption de l'eau et des nutriments. (Vurukonda *et al.*, 2016)

Conclusion

Conclusion

Le blé dur est une culture stratégique mais très sensible au stress hydrique, l'utilisation de biofertilisants à base de bactérie promotrice de la croissance des plantes, constitue une alternative prometteuse. Dans ce même contexte, l'objectif de notre étude est la caractérisation de quatre Isolats PGPR et d'évaluer leur impact sur la germination du blé dur (*Triticum durum*) en conditions de stress hydrique.

L'étude morphologique des isolats basée sur les caractères macroscopiques et microscopiques a révélé une variabilité des caractères macroscopique, tous les isolats sont des bacilles Gram négatif.

La caractérisation biochimique a indiqué une grande fluctuation des caractères métaboliques des isolats étudiés et a permis ainsi de les affilier à différents genres ; l'isolat S1 (*Pantea*), S2 (*Serratia*), S3 (*Pseudomonas*) et S4 (*Rahnella*).

L'évaluation des souches à produire l'Acide Indole Acétique (AIA) a montré que toutes les souches peuvent le produire mais à des concentrations différentes. Le plus grand taux est produit par la souche S4 (40,09). Alors que la souche 3 a affiché une production très faible (7,25 µg/mL).

L'effet de l'inoculation sur la germination du blé sous différents niveaux de stress hydrique, simulé par diverses concentrations de PEG6000 (5, 10, 15 et 20%), a montré qu'à (5%) Les souches S1 et S4 ont amélioré le pourcentage et la vitesse de germination, ainsi que la longueur et le poids des plantules sous condition de stress. A 10% c'est la souche S1 qui a amélioré le pourcentage et la vitesse de germination alors que la souche S4 qui a un impact positif sur l'Indice de vigueur de la longueur et le poids des plantules. A des concentrations élevées de PEG 6000 (15%) la souche S3 se démarque par son pouvoir promoteur de tous les paramètres étudiés. Face à un stress sévère la souche S1 avait un effet positif sur le pourcentage de germination et S4 sur l'indice de vigueur du poids des plantules.

L'évaluation des autres caractères PGP, à savoir l'ACC désaminase semble être intéressant pour compléter ce travail et comprendre les mécanismes par lesquels les souches ont pu montrer une tolérance et une amélioration des taux de germination face au stress.

Liste de références bibliographique

Liste de références bibliographique

1. Administrateur AAINB. (2003, 7 mars). Le blé. Association Nationale des Professeurs de Boulangerie.
2. Agarwal, P., Vibhandik, R., Agrahari, R., Daverey, A., & Rani, R. (2023). Role of root exudates on the soil microbial diversity and biogeochemistry of heavy metals. *Applied*
3. Ahmad, Z., Waraich, E. A., Akhtar, S., et al. (2018). Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, 80.
4. Aiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
5. Ali, B., Wang, X., Saleem, M. H., et al. (2022). PGPR-Mediated Salt Tolerance in Maize by Modulating Plant Physiology, Antioxidant Defense, Compatible Solutes Accumulation and Bio-Surfactant Producing Genes. *Plants*, 11(3), 345.
6. Amaya-Gómez, C. V., Porcel, M., Mesa-Garriga, L., & Gómez-Álvarez, M. I. (2020). A framework for the selection of plant growth-promoting rhizobacteria based on bacterial competence mechanisms. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(14), e00760-20.
7. Amrani. 2013. Maladie : Méthode et échelle de notation des maladies et accidents divers. *Bulletin des grandes cultures*. ITGC.02 : 5p.
8. Amrouche, I., & Mesbah, E. (2017). Effet du stress abiotique sur l'accumulation des protéines totales chez deux variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) (Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).
9. Aouali S. et Douici-Khalfi A. 2013. Recueil des principales maladies fongiques des céréales en Algérie : symptômes, développement et moyens de lutte. ITGC.8-36p.
10. APG III. (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants : APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161: 105-121
11. Baskin JM, Baskin CC. 2004. A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research* 14: 1-16..

12. Benhebireche N. 2011. Effet du stress salin sur l'accumulation de la chlorophylle chez le blé dur. Mémoire étude de l'effet du stress salin sur la germination de blé dur (*triticum durum*). p9
13. BEWELEY D, 1997. Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, 9: 1055-1066.
14. Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, 13(1), 66.
15. Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327-1350.
16. Boulal, H., Djili, A., & Belabid, L. (2007). La culture du blé dur en Algérie : aspects morphologiques et physiologiques. Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), Algérie.
17. Bouremani, N., Cherif-Silini, H., Silini, A., et al. (2023). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR): A Rampart against the Adverse Effects of Drought Stress. *Water*, 15, 418.
18. Chaussat, G., & Ledeburff, E. (2000). Nutrition minérale et croissance racinaire: relations et régulations. In A. Zouine & F. Lemoine (Eds.), *La nutrition minérale des plantes* (pp. 189-207). INRA.
19. Chen, L., Dodd, I. C., Theobald, J. C., Belimov, A. A., & Davies, W. J. (2020). The rhizobacterium *Bacillus subtilis* improves plant drought tolerance by altering root hydraulic properties. *Frontiers in Microbiology*, 11, 297.
20. Cherif, H. (2018). Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp. et *Pantoea agglomerans* isolées de sols (Doctoral dissertation).
21. Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A.C., et al. (2021). Tailoring next generation plant growth promoting microorganisms as versatile tools beyond soil desalinization: A road map towards field application. *Sustainability*, 13, 4422. doi:10.3390/su13084422
22. Choudhary, D.K., et al. (2018). Bacterial IAA: A promising tool in plant-microbe interaction. In: Kumar, M., et al. (Eds.), *Rhizotrophs: Plant Growth Promotion to Bioremediation*. Springer, pp. 49–69.

23. Dean R, Van Kan JAL, Pretorius ZA, Hammond-Kosack KE, Di Pietro A, Spanu PD, Rudd JJ, Dickman M, Kahmann R, Ellis J et Foster GD, 2012. The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Mol. Plant Pathol*, 13:414–430
24. Ding, Z., Ali, E. F., Almaroai, Y. A., Eissa, M. A., & Abeed, A. H. (2021). Effect of potassium solubilizing bacteria and humic acid on faba bean (*Vicia faba* L.) plants grown on sandy loam soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 791-800.
25. Djermoun, A. (2009). La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Nature et Technologies*. n° 01: 45-53
26. Dos Santos, R. M., Escobar Diaz, P. A., Lobo, L. L. B., & Rigobelo, E. C. (2020). Use of plant growth-promoting rhizobacteria in maize and sugarcane: characteristics and applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 136.
27. DSISP Ministère de l’Agriculture et du Développement Rural . (2021, juillet). Série B 2019 : superficies et productions agricoles, campagne 2018-2019 [PDF]. Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d’Information.
28. DuPont, T. (2010). Seed and seedling biology. Penn State Extension
29. Egamberdieva, D. et al. (2017). Role of PGPR in sustainable agriculture under drought stress. In: *Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria* (Springer), pp. 73–97.
30. El Felah, M., Gharbi, M. S., Ben Ghanem, H., & Elloumi, M. (2015). Les céréales en Tunisie entre mythe et réalité. *Annales de l’INRAT*, 2ème Numéro Spécial Centenaire, 88, 1-17
31. Etesami, H., & Beattie, G. A. (2018). Mining halophytes for plant growth-promoting halotolerant bacteria to enhance the salinity tolerance of non-halophytic crops. *Frontiers in Microbiology*, 9, 148.
32. Etesami, H., Alikhani, H. A., & Mirseyed Hosseini, H. (2017). Solubilization of inorganic phosphates by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Mechanisms and future prospects. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897–911.
33. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2021). The state of food security and nutrition in the world 2021: Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all. Rome: FAO

34. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2023). The state of food security and nutrition in the world 2023: Urbanization, agrifood-systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. Rome: FAO
35. Fones, H., & Gurr, S. J. (2015). The impact of *Septoria tritici* blotch disease on wheat: An EU perspective. *Fungal Genetics and Biology*, 79, 3-7.
36. Ghitri, Y. (2018). Étude des bactéries PGPR et leur rôle dans l'induction de la tolérance au stress abiotique chez les plantes. Mémoire de Master, Université [à compléter selon établissement], pp. 22–30.
37. Giannelli, G., Potestio, S., Visioli, G. (2023). The contribution of PGPR in salt stress tolerance in crops: Unravelling the molecular mechanisms of cross-talk between plant and bacteria. *Plants*, 12, 2197.
38. Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30-39.
39. Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30–39
40. Glick, B.R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica*, 2012, Article ID 963401.
41. Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H. S., & Patra, J. K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological research*, 206, 131-140.
42. Govind, S., Singh, D. P., & Sharma, A. K. (2015). Phosphate solubilizing microorganisms: mechanisms and applications. In *Phosphate Solubilizing Microorganisms: Principles and Application of Microphos Technology* (pp. 15–34). Springer.
43. Green, K. A.* (2015). Seed germination strategies: An evolutionary trajectory independent of seed mass. *Frontiers in Plant Science*, 6, 731
44. Grobelak, A. (2015). The role of IAA-producing bacteria in improving plant growth and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(16), pp. 12823–12831.

45. Grover, M., Bodhankar, S., Sharma, A., Sharma, P., & Yadav, S. K. (2020). PGPR mediated soil borne disease suppression and growth promotion in plants. In *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Sustainable Stress Management* (pp. 1–26). Springer
46. Gu, Z., Hu, C., Gan, Y., et al. (2024). Role of Microbes in Alleviating Crop Drought Stress: A Review. *Plants*, 13, 384.
47. Gupta, G., Parihar, S. S., Ahirwar, N. K., Snehi, S. K., & Singh, V. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. *J Microb Biochem Technol*, 7(2), 096-102.
48. Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne ipathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology*, 3(4), 307–319.
49. Hacini, N. (2014). Étude de l'interaction génotype × environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur les aptitudes adaptatives et qualitatives (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 107 p.)
50. Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., & Malik, A. (2021). Plant–microbe interactions for sustainable agriculture. *Microbiological Research*, 242, 126595.
51. Harlan, J. R. (1975). *Crops and man*. Madison, WI: American Society of Agronomy and Crop Science Society of America
52. HGCA, 2012. *Septoria tritici* in winter wheat. Topic sheet 113
53. Hnini, M., Rabeh, K., & Oubohssaine, M. (2024). Interactions between beneficial soil microorganisms (PGPR and AMF) and host plants for environmental restoration: A systematic review. *Plant Stress*, 100391
54. Holford, I. C. R. (1997). Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, 35(2), 227-240
55. Hopkins W. G., 2003. *Physiologie végétale*. 2ème édition. De Boeck, Bruxelles: 61- 476
56. Islam, M., Sandhi, A. (2023). Heavy Metal and Drought Stress in Plants: The Role of Microbes - A Review. *Gesunde Pflanzen*, 75, 695–708.
57. Kalam, S., Basu, A., & Podile, A. R. (2020). Functional and molecular characterization of plant growth promoting *Bacillus* isolates from tomato rhizosphere. *Heliyon*, 6(8), 04734.

58. Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., et al. (2020). The Impact of Drought in Plant Metabolism: How to Exploit Tolerance Mechanisms to Increase Crop Production. *Applied Sciences*, 10, 5692
59. Kazi A. G., Rasheed A., Kazi A. M. 2013. Biotic Stress and Crop Improvement: A Wheat Focus Around Novel Strategies. In Hakeem K.R. (Eds). *Crop Improvement*. Springer Science+ Business Media, Pakistan. 239-267p.
60. Khan, N., Bano, A., & Rahman, M. A. (2020). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria and exopolysaccharide-producing strains on wheat growth under drought stress. *Agronomy*, 10(2), 170.
61. Kiani, M. (2007). « Impact du stress hydrique sur la croissance et la productivité du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en région méditerranéenne ». Thèse de doctorat, Université de Blida, Algérie
62. Kour, D., & Yadav, A. N. (2023). Alleviation of cold stress in wheat with psychrotrophic phosphorus-solubilizing *Acinetobacter rhizosphaerae* EU-KL44. *Brazilian Journal of Microbiology*, 54(3),
63. Kumar, A., & Dubey, R. C. (2012). Integrated biological control of *Sclerotinia sclerotiorum* through antagonistic rhizobacteria and organic amendments. *Biocontrol Science and Technology*, 22(11), 1157–1173
64. Kumar, A., Maleva, M., Bruno, L. B., & Rajkumar, M. (2021). Synergistic effect of ACC deaminase producing *Pseudomonas* sp. TR15a and siderophore producing *Bacillus aerophilus* TR15c for enhanced growth and copper accumulation in *Helianthus annuus* L. *Chemosphere*, 276, 130038.
65. Lamaze, T., et al. (1994). « Effet du stress hydrique sur les mécanismes de tolérance au stress chez les plantes ». In : *Revue de la littérature sur le stress hydrique et la tolérance des plantes*. Université de Blida, Algérie.
66. Lanotte, P., Isnard, C., Garnier, F., & Mereghetti, L. (2016). Du prélèvement à la caractérisation des souches. In F. Denis, M.-C. Ploy, C. Martin, V. Cattoir, & B. Bébéar (Éds.), *Bactériologie médicale : Techniques usuelles* (3^e éd., pp. 16–34). Elsevier Masson.

67. Latif, M., Bukhari, S. A. H., Alrajhi, A. A., Alotaibi, F. S., Ahmad, M. *, Shahzad, A. N., Dewidar, A. Z., & Mattar, M. A. (2022). Inducing drought tolerance in wheat through exopolysaccharide-producing rhizobacteria. *Agronomy*, 12(5), 1140.
68. LAURENT B. et AHMED B., 1991. La germination des semences en conditions sèches. *Science et changements planétaires/ sécheresse*. Vol. 2 (4): 239-249.
69. Less, H., & Galili, G. (2008). Principal transcriptional programs regulating plant amino acid metabolism in response to abiotic stresses. *Plant Physiology*, 147(1), 316–330.
70. Lugtenberg, B. J. J., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541–556
71. Luo, Y. (2018). Mechanisms of auxin regulation in plant–microbe interactions. *Journal of Plant Physiology*, 231, pp. 146–154.
72. Maccaferri, M., El-Pourghannad, S., Mazari, S., et al. (2019). Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets. *Nature Genetics*, 51, 885–895.
73. Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 444(2), 139–158.
74. Martínez-Viveros, O., Jorquera, M. A., Crowley, D. E., Gajardo, G., & Mora, M. L. (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 293–319.
75. MAZOYER M, 2002. *La rousse agricole*. Ed., Paris: 320-321
76. Meena, M., Swapnil, P., Divyanshu, K., Kumar, S., Tripathi, Y. N., Zehra, A., ...& Upadhyay, R. S. (2020). PGPR-mediated induction of systemic resistance and physiochemical alterations in plants against the pathogens: Current perspectives. *Journal of Basic Microbiology*, 60(10), 828-861
77. Menacer F. 2007. Contribution à l'étude de l'effet de la salinité sur un marqueur biochimique, cas de la proline chez *Atriplex halimus* L. et *A triplex conescens* (purch) Nntt. 99p
78. Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of plant nutrition* (5th ed.). Kluwer Academic.

79. Merouche A., 2015 – Besoins en eau et maîtrise de l’irrigation d’appoint du blé dur dans la vallée du Chélif. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique. 85 p
80. Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51(5), 914–916.
81. Moreau J.M., 2011. Lutte contre les maladies. Livre Blanc « Céréales » ULg Gembloux Agro-Bio Tech et CRA-W.
82. Munees, A., & Mulugeta, K. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. *Journal of King Saud University – Science*, 26(1), 1–20.
83. Naik, H., Overbey, J. R., Desnick, R. J., Anderson, K. E., Bissell, D. M., Bloomer, J., Bonkovsky, H. L., Phillips, J. D., Wang, B., Singal, A., & Balwani, M. (2019). Evaluating quality of life tools in North American patients with erythropoietic protoporphyria and X linked protoporphyria. *JIMD Reports*, 50(1), 9–19.
84. Nasir, A. (2016). Role of phytohormones in plant growth and development. *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 11(3), 123–130
85. Naznin, H. A., Kimura, M., Miyazawa, M., & Hyakumachi, M. (2013). Systemic resistance induced by volatile organic compounds emitted by plant growth-promoting rhizobacteria. *Plant and Soil*, 366(1-2), 75–84.
86. Ngumbi, E., Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: Current and future prospects. *Appl Soil Ecol*, 105, 109-125.
87. Omari, S. et Tahri, M. (2021). La maladie de la tâche auréolée du blé dans la région d’Adrar. Master systèmes de production agro-écologiques, université Ahmed Draïa Adrar.
88. Orozco-Mosqueda et al. 2023 Orozco-Mosqueda, M. d. C., Kumar, A., Fadji, A. E., Babalola, O. O., Puopolo, G., & Santoyo, G. (2023). Agroecological management of the grey mould fungus *Botrytis cinerea* by plant growth-promoting bacteria. *Plants*, 12(3), 637.
89. Oukarroum A. 2007. Vitalité des plantes d’orge (*Hordeum vulgare* L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Thèse doctorat. Université De Genève.

90. Parmar, P., & Sindhu, S. S. (2013). Potassium solubilization by rhizosphere bacteria: influence of nutritional and environmental conditions. *J Microbiol Res*, 3(1), 25-31.
91. Patel, T. S., & Minocheherhomji, F. P. (2018). Plant growth promoting Rhizobacteria: blessing to agriculture. *Int J Pure App Biosci*, 6(2), 481-492.
92. Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347-375.
93. Pracharoenwattana, I., Cornah, J. E., & Smith, S. M. (2005). Arabidopsis peroxisomal citrate synthase is required for fatty-acid respiration and seed germination. *The Plant Cell*, 17(7), 2037-2048.
94. Ranieri, R. (2015). Geography of the durum wheat crop. *Pastaria International* 6/2015.
95. Ranjan, S., Prakash, A., Singh, R. B., et al. (2023). Effects of Drought Stress on Agricultural Plants, and Molecular Strategies for Drought Tolerant Crop Development. In: Aftab, T. (eds) *New Frontiers in Plant-Environment Interactions: Environmental Science and Engineering*. Springer, Cham.
96. Rastoin, J.-L., & Benabderrazik, E. (2014). Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb : Pour un co-développement de filières territorialisées. Institut de Prospective Économique du Monde Méditerranéen (IPEMED).
97. Rehman, S., Ali, A., Iqbal, M., et al. (2020). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a tool for sustainable agriculture. *Plant and Soil*, 447, 1–20.
98. Salehi-Lisar, S. Y., Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought Stress in Plants: Causes, Consequences, and Tolerance. In Hossain, M., Wani, S., Bhattacharjee, S., Burritt, D., Tran, L. S. (eds), *Drought Stress Tolerance in Plants 1*. Springer, Cham
99. Sall, A.T., Chiari, T., Legesse, W., Ahmed, S., Ortiz, R., Vanginkel, M., & Bassu, F.M. (2019). Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) origin, cultivation, and potential expansion in sub-Saharan Africa. *Agronomy*, 9:263
100. Schuhwerk D., A.Nakhforoosh, S.Kutshka, G.Bodner, H.Rausgruber., 2011 : Field screening of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) for drought tolerance. In *Tagung der Vereinigung der Référence bibliographique Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs*. 2010, p. 147-154. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning, Austria

101. Shaikh, S. S. (2015). Production of gibberellins by plant growth-promoting rhizobacteria and their effect on plant development. *Journal of Applied Microbiology*, 118(2), 392–403.
102. Sheng, X. F., He, L. Y., Huang, W. Y., & Chen, Y. Q. (2008). Isolation and characterization of *Acinetobacter* sp. from rhizosphere soil and its potential for promoting plant growth. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18(5), 996–1000
103. Singh, M., Singh, D., Gupta, A., Pandey, K. D., Singh, P. K., & Kumar, A. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria: application in biofertilizers and biocontrol of phytopathogens. In *PGPR amelioration in sustainable agriculture* (pp. 41-66). Woodhead Publishing
104. Soltner, D. (2007). *Les bases de la production végétale (Tome II : Le climat)*. 9^e éd. Paris : Sciences et Techniques Agricoles.
105. Tabassum, B., Khan, A., Tariq, M., Ramzan, M., Khan, M. I., Shahid, N., & Aaliya, K. (2017). Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*, 121, 102-117.
106. Tellah, S. (2022). Environment Stress Tolerance in Plant-Physiological Aspects. In: Ansari, S.A., Ansari, M.I., Husen, A. (eds) *Augmenting Crop Productivity in Stress Environment*. Springer, Singapore.
107. Tsukanova, K., et al. (2017). Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 53(6), pp. 567–579
108. U.S. Department of Agriculture (USDA). (2024). Algeria: Grain and Feed Update. Foreign Agricultural Service (FAS), Report Number AG2024-0008.
109. Ulloa-Ogaz, R., Plascencia-Jiménez, A. B., & González-Andrés, F. (2015). Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species. *BioControl*, 60(4), 451–460.
110. USDA, FAS. (2025). Grain & Feed Update – Algiers, Algeria (première moitié de MY 2024/25). USDA Foreign Agricultural Service.
111. Vinebrooke, R. D., Cottingham, K. L., Norberg, J., Scheffer, M., Dodson, S. I., Maberly, S. C., & Sommer, U. (2004). Impacts of multiple stressors on biodiversity and ecosystem functioning: The role of species co-tolerance. *Oikos*, 104(3), 451-457.

112. Vociante, M., Grifoni, M., Fusini, D., Petruzzelli, G., & Franchi, E. (2022). The role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Applied sciences*, 12(3), 1231.
113. Vurukonda, S. S., Vardharajula, S., Shrivastava, M., et al. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiology Research*, 184, 13-24.
114. Wang, M., Zhao, Y., Zhang, B., Wu, W., & Wu, Y. (2015). Antibiotics from *Bacillus*: key weapons against pathogenic microbes. *Frontiers in Microbiology*, 6, 774.
115. Wang, M., Zhao, Y., Zhang, B., Wu, W., & Wu, Y. (2015). Antibiotics from *Bacillus*: key weapons against pathogenic microbes. *Frontiers in Microbiology*, 6, 774.
116. Yasmin, F., Othman, R., Sijam, K., & Saad, M. S. (2016). Rhizobacteria as biocontrol agents against soft rot disease of pineapple. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 49(3-4), 95–110.
117. Zegrari. (2014). Zegrari D. Caractérisation morpho-physiologique et biochimique de sept génotypes de deux variétés de blé dur cultivé en Algérie [En ligne]. Mémoire de Master. Algérie : Université Constantine 1, 2014, p 67.
118. Zia, R., Nawaz, M.S., Siddique, M.J., et al. (2020). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiol Res*, 242, 126626. *Biochemistry and Biotechnology*, 1-21.

Annexe

Annexe

Annexe 01 : Gélose lauria-bertani

ÉLÉMENT	NÉCESSAIRE
tryptone	10g
Extrait de levure	5.0g
Chlorure de sodium	5.0g
Eau distillé	1000ml

Annexe02 : Réactif de salkowski

Composant	Quantité
Acide perchlorique (HClO ₄)	1ml
Chlorure ferrique (FeCl ₂)	2ml
Eau distillée stérile	Compléter jusqu'à ml

























Annexe 03 : Hypochlorite de calcium

ÉLÉMENT	NÉCESSAIRE
d'acide perchlorique à 35 %.	50ml
chlorure ferrique (FeCl ₃) à 0,5 M.	1ml

Annexe 04: Milieu SMS (succiante minimal salt) selon (Sheng *et al.*, 2008)

Composants	Concentration
KH ₂ PO ₄ (phosphate monopotassique)	1 g/L
K ₂ HPO ₄ (phosphate dipotassique)	1 g/L
(NH ₄) ₂ SO ₄ (sulfate d'ammonium)	1 g/L
MgSO ₄ ·7H ₂ O (sulfate de magnésium)	0.2 g/L
FeSO ₄ ·7H ₂ O (sulfate de fer)	0.01 g/L
Succinic acid (acide succinique)	4 g/L
Tryptophane (précurseur de l'AIA)	0.5 mg/mL (ajouté stérilement)
Eau distillée	Compléter à 1 L
pH	Ajusté à 7.0

Annexe 05 : tableau de lecture de la galerie miniaturisée API 20E

Microtube	Substrat :	Caractère recherché :	Révéléateur	Lecture directe ou indirecte Test (si nécessaire)	Résultat -	Résultat +
ONPG	ONPG = Ortho-Nitro-Phényl-Galactoside	Beta galactosidase		Lecture directe		
ADH LDC ODC	Arginine Lysine Ornithine	Arginine Dihydrolase Lysine Décarboxylase Ornithine Décarboxylase	Rouge de Phénol	Lecture directe		
ICIT	Citrate	Utilisation du citrate	BBT	Lecture directe		
H ₂ S	Thiosulfate de sodium	Production d'H ₂ S		Lecture directe		
URÉ	Urée	Uréase	Rouge de Phénol	Lecture directe		 
TDA	Tryptophane	Tryptophane désaminase		Lecture indirecte Ajouter une goutte de réactif chlorure de fer III		
IND	Tryptophane	Tryptophanase ou production d'indole		Lecture indirecte Ajouter une goutte de réactif Kovacs	 	 
V.P.	Pyruvate de sodium	production d'acétoïne (3-hydroxybutanone)		Lecture indirecte Ajouter 1 goutte de VP1 et VP2 Attendre 10 minutes		 
GEL	Gélatine	gélatinase		Lecture directe		
GLU à ARA = zymogramme	Substrat carboné (glucide)	Utilisation de substrats carbonés (glucides)	BBT	Lecture directe		
NO ₂ /N ₂	Nitrates (NO ₃ ⁻)	Nitrate réductase		Lecture indirecte Ajouter 1 goutte de NIT1 et NIT2 et zinc éventuellement	