

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Agronomiques



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences

Agronomiques

Spécialité : Production végétale

Étude de l'effet de deux souches de *Pseudomonas* spp. fluorescents sur l'amélioration de la germination et la croissance du blé dur (*Triticum durum*) sous l'effet du stress salin

Réalisé par :

M^{elle} KHEMAR Djazira.

M^{elle} KHERCHI Dehbia.

Présenté devant le jury :

Président : M. Ait Said Samir MCA (UMMTO)

Examineur : M. Medjebeur Djamel MCB (UMMTO)

Promotrice : Mme Dahoumane-Larbaoui K. MAA (UMMTO)

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant tout, nous adressons nos louanges et notre profonde gratitude à Dieu le Tout-Puissant, maître des cieux et de la terre, pour nous avoir accordé la volonté, le courage et la santé nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous adressons tout particulièrement notre profonde gratitude à notre promotrice, Mme Dahoumane, pour ses conseils avisés, sa disponibilité constante et son encadrement précieux. Son expertise, sa patience et son soutien ont été essentiels à la bonne conduite de ce projet et ont largement contribué à son aboutissement.

Nous exprimons également toute notre reconnaissance aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous remercions chaleureusement l'ingénieur du laboratoire, Mme Hadadi, pour son accueil et sa disponibilité, ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide et leur soutien à la réalisation de ce modeste travail.

Notre profonde gratitude s'adresse aussi à nos camarades, amis et collègues pour leur soutien constant, leurs échanges enrichissants et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement nos familles, pour leur patience, leur soutien indéfectible et leur présence rassurante, qui ont été une source précieuse de motivation tout au long de cette aventure.

Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif autant que personnel, et nous sommes profondément reconnaissants envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Merci

Dédicace

À mes chers parents, ma mère Nadia et mon père Malik,

Je vous dédie ce mémoire avec toute la gratitude et l'amour que j'ai dans le cœur. Votre soutien inconditionnel, votre patience et vos encouragements m'ont porté à chaque étape de ce long chemin. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles et c'est grâce à vous que j'ai trouvé la force de persévérer. Ce travail est aussi le vôtre, car sans vous rien n'aurait été possible.

À mes frères Said et Ahmed, et à mes sœurs Ferroudja, Kenza et Amel,

Merci pour votre présence constante et votre complicité qui ont illuminé mon quotidien. Vous avez su m'apporter de la joie, du réconfort et des moments de détente indispensables quand le poids du travail se faisait trop lourd. Votre confiance et votre amour fraternel sont des trésors précieux que je garde dans mon cœur.

À ma chère amie d'enfance, Sara, qui est restée toujours à mes côtés,

Ton amitié fidèle et ta présence sans faille ont été un pilier important dans ma vie. Malgré les années, tu as su garder ce lien précieux qui m'a soutenue dans les instants de doute. Merci pour ton écoute, ta compréhension et ta bienveillance.

À mes chères amies de l'université, Aldjia, Lilia,

Nous avons partagé bien plus que des heures de travail, mais aussi des éclats de rire, des encouragements et des moments d'entraide qui resteront gravés dans ma mémoire. Votre soutien collectif a été une source de motivation et de courage tout au long de cette aventure académique. Je vous en suis profondément reconnaissante.

À mon futur mari, Raouf, que j'ai eu la chance de rencontrer à l'université,

pour sa présence rassurante tout au long de cette aventure. Ta confiance en moi et ta motivation m'ont donné des ailes pour persévérer. Je suis impatiente de construire notre avenir ensemble, fort de ce chemin que nous avons partagé.

À ma binôme de travail et chère amie que l'université m'a offert, Djazira,

Merci d'avoir été à mes côtés dans cette aventure universitaire. Ton soutien, ta rigueur et ta bonne humeur ont été essentiels pour relever les défis de ce mémoire. Travailler ensemble a rendu ce parcours plus riche et plus agréable, et je suis heureuse d'avoir partagé ces moments avec toi.

Dehbia

Dédicace

À mon cher père Farid,

À celui qui, de la sueur de son front, a abreuvé la terre de mon repos, à cette lune bienveillante qui a chassé les ombres de mes chemins et illuminé les nuits obscures, à celui dont la présence m'a donné force, dont le nom est ma fierté et dont je porte les lettres tel un insigne d'honneur sur mon front.

À ma chère mère Nadia,

À celle pour qui Dieu a placé le Paradis sous ses pieds, à celle qui à côté de mes épaules le poids des épreuves par la ferveur de ses prières, à celle dont le cœur ardent m'a enlacée avant même que ses mains ne m'étreignent.

À mes chers frères Abdelrahman et Dihia,

À mes piliers inébranlables, à mes soutiens indéfectibles, à ceux sur qui je me suis appuyée avec force et qui, lorsque le monde vacillait, sont demeurés droits.

À ma précieuse grand-mère Smina,

À l'âme de notre famille, au parfum suave de mes souvenirs, au rempart de mon enfance dans lequel je trouvais refuge.

À ma meilleure amie Lisa,

À l'amie de mon enfance et de mes plus tendres années, à celle dont la présence à mes côtés, au fil du temps, est un honneur que je chéris, confidente de mon cœur et baume apaisant de mon âme.

À mes amis d'université : Dahbia, Lilia, Aldjia, Dalia, Imane,

À ceux qui ont transformé le chemin en un livre de souvenirs, chaque page imprégnée de la sueur de l'effort et de la rosée de la joie. Vous êtes ma patrie lorsque les patries se sont éloignées, et la famille que les jours ont enfantée, non le sang.

À ma binôme, Dehbia

À celle qui fut le plus beau présent offert par le destin, compagne fidèle de chacune de mes réussites, à chaque étape de mon parcours.

ACC : Acide 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylique.

AIA : Acide Indole-3-Acétique.

Antioxydants : (mot anglais, non abrégé).

ATB : Antibiotique(s).

Ca²⁺ : Ion calcium.

CAT : Catalase.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

cv. : Cultivar (variété cultivée).

Cytokinins : (hormones, non abrégé).

DAPG : 2,4-diacétylphloroglucinol.

Deaminases : (enzyme, non abrégé).

EPS : Exopolysaccharides.

G54 : Génotype de blé (code spécifique).

Glutamate : (acide aminé).

GW2 : Gène qui contrôle la largeur du grain.

HCN : Cyanure d'hydrogène.

IG : Index Glycémique.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique (Algérie).

ISR : Induced Systemic Resistance (Résistance Systémique Induite).

ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures (Algérie).

IV : Index de Vigueur.

K⁺ : Ion potassium.

Lp : Longueur moyenne de la plumule.

Lr : Longueur moyenne de la radicule.

Mg²⁺ : Ion magnésium.

mm/an : Millimètre(s) de pluie par an.

Na⁺ : Ion sodium.

NaCl : Chlorure de sodium.

NI : Nombre de graines germées

nj : Nombre de graines germées le jour j

NT : Nombre total de graines

ONFA : Office National de Formation et d'Accompagnement Agricole (Algérie).

P. aeruginosa : *Pseudomonas aeruginosa*.

P. fluorescens : *Pseudomonas fluorescens*.

PGPR : Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes).

POX : Peroxidase.

Proline : (acide aminé).

q/ha : Quintal(s) par hectare.

ROS : Reactive Oxygen Species (Espèces Réactives de l'Oxygène).

SOD : Superoxide Dismutase.

sp: Species (Espèce).

spp : Species pluralis (Espèces).

TG : Taux de Germination.

TGW6 : Gène qui contrôle le poids du grain.

Trehalose : (sucre).

t/ha : Tonne(s) par hectare.

UFC : Unité Formant Colonie.

Unknown Metabolites : (expression, non abrégé).

Figure 1: Description de la plante. A : plante de blé ; B : épi ; C : épillet ; D : une fleur isolée avec glume et glumelles ; E : grains de blé dont l'un est coupé en long (Kent & Evers, 1994 ; Barron et al., 2007).....	6
Figure 2: Effets délétères liés à la toxicité du stress salin et réponse cellulaire mise en place pour assurer la tolérance. Chez les plantes halophiles, l'excès de sel dans le sol provoque un stress ionique, oxydatif et osmotique qu'elles doivent gérer en mettant en place des stratégies pour maintenir (A) les molécules du stress oxydant à un niveau acceptable, (B) l'équilibre osmotique, et (C) l'homéostasie ionique. (Encyclopédie de l'environnement, 2020).....	13
Figure 3: Micrographie électronique à balayage de <i>Pseudomonas fluorescens</i> (reproduit avec autorisation de Science Source, dans Scales et al., 2014).	18
Figure 4: Fonctions biologiques des sidérophores (Khan et al., 2009).	20
Figure 5 : Modes d'action des rhizobactéries bénéfiques, qui conduisent à des effets de phytostimulation ou de phytoprotection du blé (Vacheron et al., 2013; Levy et al., 2018).....	21
Figure 6 : Augmentation de la tolérance et la survie des plantes induite par les PGPR en milieu salin (Ashraf et al., 2008).	23
Figure 7: Les souche bactérienne P64 et CH de <i>Pseudomonas</i> spp. Fluorescents, cultivée sur milieu King B.	25
Figure 8: Test de viabilité des graines.....	26
Figure 9: Désinfection des graines.	27
Figure 10: Les graines témoins (non bactérisées).	27
Figure 11: Bactérisation des graines avec la souche P64 et la souche CH.	28
Figure 12: Dispositif expérimentale des graines.	29
Figure 13: Effet de la bactérisation sur le taux de germination des grains de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.	33
Figure 14: Effet de la bactérisation sur le taux de germination des grains de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.....	33
Figure 15: Germination des graines de blé dur variété Vitron, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).....	36
Figure 16: Germination des graines de blé dur variété Vitron, bactérisées par la souche P64, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).....	37
Figure 17: Germination des graines de blé dur variété Vitron, bactérisées par la souche CH, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).....	37
Figure 18: Germination des graines de blé dur variété Amar, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).....	38

Figure 19: Germination des graines de blé dur variété Amar, bactérisées par la souche P64, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).....	38
Figure 20: Germination des graines de blé dur, variété Amar, bactérisées par la souche CH, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).....	39
Figure 21 : Effet de la bactérisation sur l'index de vigor des grains de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.....	39
Figure 22 : Effet de la bactérisation sur l'index de vigor des grains de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.....	40
Figure 23: La longueur racinaire de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl	42
Figure 24: La longueur racinaire de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl	42
Figure 25: Hauteur de la plumule de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.....	43
Figure 26: Hauteur de la plumule de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.....	44
Figure 27: Croissance de la graine de blé dur variété Vitron, après transplantation.....	45
Figure 28: Croissance de la graine de blé dur variété Vitron, bactérisée par la souche P64, après transplantation.	46
Figure 29: Croissance de la graine de blé dur variété Vitron, bactérisée par la souche CH, après transplantation.	46
Figure 30: Croissance de la graine de blé dur variété Amar, après transplantation.....	47
Figure 31: Croissance de la graine de blé dur variété Amar, bactérisée par la souche P64, après transplantation.	47
Figure 32: Croissance de la graine de blé dur variété Amar, bactérisée par la souche CH, après transplantation.	48
Figure 33: Poids frais de la partie foliaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar).	48
Figure 34: Poids sec de la partie foliaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar).	49
Figure 35: Poids frais de la partie racinaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar)...	50
Figure 36: Poids sec de la partie racinaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar).	51

Tableau 1: Production mondiale de blé dur et parts des principaux pays producteurs en 2025-2026 (USDA, 2025). **9**

Tableau 2: Évolution de la surface semée, de la production et du rendement du blé dur en Algérie en 2019-2024 (Ministère de l’Agriculture et du Développement Rural. Plan national d’autosuffisance en céréales 2021–2025. Alger, Algérie). **10**

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Synthèse bibliographique

Introduction générale..... 1

Chapitre 01 : Généralités sur le blé dur (*Triticum durum*)

1 Origine du blé dur..... 3

2 Catégorisation botanique 4

3 Description de *Triticum durum* 5

3.1 Appareil végétatif 5

3.2 Inflorescence 5

3.3 Grain..... 6

3.4 Caractéristiques morpho-physiologiques spécifiques 6

3.5 Adaptations morphologiques aux stress environnementaux 7

4 Variétés du blé dur présentes en Algérie 7

4.1 Les variétés locales traditionnelles..... 7

4.2 Variétés améliorées et modernes 7

5 Importance du blé dans le monde et en Algérie 8

5.1 Dans le monde 8

5.1.1 Rôle économique à l'échelle mondiale 8

5.1.2 Importance alimentaire..... 8

5.2 Signification du blé dur en Algérie 9

Chapitre 02 : Le stress salin et le blé dur

1 Effets néfastes de la salinité sur les plantes 12

1.1 Le stress osmotique 12

1.2	Stress hypersalinisé	12
1.3	Stress nutritionnel.....	Erreur ! Signet non défini.
1.4	Stress oxydatif consécutif.....	13
2	Pratiques agronomiques pour limiter l'impact de la salinité.....	14
2.1	Gestion de l'irrigation et drainage des sols salins	14
2.2	Approches biotechnologiques et génétiques	14
2.3	Intégration dans les systèmes de production durable	14

Chapitre 03 : Importance des PGPR

1	Généralités sur les <i>Pseudomonas</i> spp. fluorescents.....	16
2	Effets bénéfiques des <i>Pseudomonas</i> spp. fluorescents	18
2.1	Effets de phytostimulation	18
2.1.1	Production d'hormones de croissance.....	18
2.1.2	Amélioration de la nutrition minérale	18
2.1.3	Amélioration de la germination et croissance des plantes	19
2.1.4	Stimulation des interactions symbiotiques	19
2.2	Effet de biocontrôle	19
2.2.1	Production d'antibiotiques (ATB).....	19
2.2.2	Production d'enzymes hydrolytiques et composés toxiques.....	19
2.2.3	Compétition nutritionnelle et spatiale	20
2.2.4	Acide cyanhydrique (HCN)	20
2.2.5	Induction de la résistance systémique (ISR)	20
2.2.6	Formation de biofilms	21
3	Mécanismes de tolérance des <i>Pseudomonas</i> spp. fluorescents au stress salin	21
3.1	Accumulation de solutés compatibles (osmoprotecteurs)	21
3.2	Osmorégulation ionique	22
3.3	Modulation de la perméabilité membranaire et protection cellulaire	22
3.4	Défense antioxydante contre le stress oxydatif induit par la salinité	22

3.5	Variabilité de tolérance entre souches.....	22
3.6	Effet bénéfique des extraits d'halophytes	22

Partie expérimentale

Matériel et méthode

1	Matériels biologiques	25
1.1	Isolats bactériens	25
1.2	Matériel végétal.....	25
2	Stimulation de la germination du blé dur sous l'effet du stress salin	26
2.1	Préparation des graines.....	26
2.1.1	Test de viabilité des graines	26
2.1.2	Désinfection des graines.....	26
2.2	Bactérisation des graines	27
2.3	Préparation des solutions salines.....	28
2.4	Mise en germination.....	28
2.5	Paramètres étudiés.....	29
3	Biostimulation de la croissance du blé dur	30
3.1	Transplantation.....	30
3.2	Dispositif expérimental	30
3.3	Paramètres étudiés.....	31

Résultats et discussion

1	Résultats.....	33
1.1	Résultats de l'effet de la bactérisations sur la germination de <i>Triticum durum</i> sous le stress salin.....	33
1.1.1	Taux de germination.....	33
1.1.2	Index Vigor	39
1.1.3	Longueur de la racine.....	42
1.1.4	Hauteur de la plumule	43
1.2	Résultats de la biostimulation de la croissance des plants de <i>Triticum durum</i>	45

1.2.1	Poids frais et poids sec de la partie foliaire	48
1.2.2	Poids frais et sec de la partie racinaire	50
2	Discussions	52
	Conclusion générale	57
	Références bibliographiques	
	ANNEXES	

Introduction générale

Introduction générale

Le blé dur (*Triticum durum*) occupe une place prépondérante dans l'agriculture mondiale, en particulier dans les régions méditerranéennes où il constitue un pilier essentiel de l'alimentation et de l'économie rurale (Lafiandra et al., 2014 ; Bonjean et al., 2016). Cette céréale, domestiquée il y a environ 10 000 ans dans le Croissant fertile "une région historique englobant l'actuelle Syrie et Turquie" a accompagné le développement des sociétés humaines grâce à ses grains aux qualités technologiques et nutritionnelles remarquables (Tanno & Willcox, 2006 ; Avni et al., 2017). La spécificité du blé dur réside notamment dans la texture vitreuse de son grain, riche en protéines et en caroténoïdes, qui le rend particulièrement adapté à la production de semoule, de pâtes alimentaires et de couscous. Ces produits traditionnels sont devenus des références incontournables de la cuisine méditerranéenne (Coda et al., 2015 ; Les Céréales, 2023).

En Algérie, le blé dur constitue une culture stratégique majeure. Il est cultivé sur une superficie approchant 1,6 million d'hectares, soit 45% de la surface céréalière totale du pays (Mahfoud & Lasbahani, 2015 ; Kirouani et al., 2019). Cependant, cette production locale s'inscrit dans un contexte marqué par une forte dépendance aux importations, malgré un potentiel agronomique considérable. Les zones de culture, majoritairement semi-arides, sont caractérisées par des conditions climatiques difficiles : sécheresses répétées, hausse des températures, irrégularité des précipitations et dégradation croissante de la qualité des sols (Mekhlouf et al., 2006 ; Chenafi et al., 2022). Ces contraintes abiotiques influencent fortement la viabilité et la productivité des cultures, d'où la nécessité d'adapter les pratiques agricoles et de développer des variétés plus résistantes et mieux adaptées aux conditions locales (Kirouani et al., 2019).

Sur le plan agronomique, le blé dur présente une vulnérabilité particulière aux stress hydriques, thermiques et salins, qui affectent non seulement sa croissance végétative, mais aussi la qualité finale des grains. Le stress salin, en particulier résultant d'une accumulation excessive de sels dans le sol, engendre des perturbations physiologiques complexes telles que le stress osmotique, la toxicité ionique, les déséquilibres nutritionnels et l'apparition de stress oxydatifs (Ashraf & Harris, 2004 ; Munns & Tester, 2008). Ces effets sont d'autant plus critiques dans les zones arides et semi-arides, comme celles du nord de l'Afrique, où la salinité des terres agricoles constitue une menace croissante limitant la capacité productive (Zidane et al., 2018 ; Agri

Introduction générale

Maghreb, 2020). Face à ces défis, les recherches agronomiques contemporaines s'orientent vers la mise en œuvre de stratégies intégrées, combinant l'amélioration variétale, l'optimisation des pratiques culturales et l'utilisation de moyens biologiques innovants.

Parmi ces moyens biologiques, l'utilisation des rhizobactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) suscite un intérêt croissant. *Pseudomonas fluorescens*, en particulier se distingue par ses multiples mécanismes d'action bénéfiques : stimulation de la germination, amélioration de la nutrition minérale via la solubilisation du phosphore et la fixation de l'azote, production d'hormones végétales, protection contre les pathogènes et induction de résistances systémiques face aux stress biotiques et abiotiques (Kloepper & Schroth, 1978 ; Weller, 2007 ; Pieterse et al., 2014). Ces bactéries favorisent ainsi une agriculture plus durable, en réduisant la dépendance aux intrants chimiques tout en augmentant la résilience des cultures aux conditions stressantes (Ahmad et al., 2008 ; Beneduzi et al., 2012).

Notre étude consiste à mettre en évidence l'effet bénéfique de deux souches de *pseudomonas spp.* fluorescents sur la stimulation de la germination de deux variétés de blé dur (la variété Vitron et la variété Amar) sous l'effet de différentes concentrations de chlorure de sodium. Également, un essai d'évaluation des potentialités de biostimulation de la croissance végétale au stade plantules a été réalisée par la bactérisation des graines des deux variétés locales de *Triticum durum*.

Synthèse bibliographique

*Chapitre 01 : Généralités sur
le blé dur (*Triticum durum*)*

Le blé est actuellement l'une des cultures les plus stratégiques au monde, du fait qu'il est cultivé depuis plus de 10 000 ans. En ce qui concerne la culture du blé en Algérie, le pays cultive principalement du blé dur pour remplacer les anciennes pratiques agro-pastorales ; le blé est cultivé sur une superficie d'environ 1,6 million d'hectares et représente 45 % des productions céréalières du pays (Kirouani et al., 2019 ; Mahfoud & Lasbahani, 2015). Cette région est confrontée à de sévères aléas climatiques notamment la sécheresse observée au cours des 50 dernières années, et un changement dans les périodes ainsi que l'intensité et le volume des pluies, accompagnés d'une dégradation de l'état des sols. Dans ce cadre, une gamme de variétés locales, comme les croisements entre les génotypes villageois et les G54, existe, visant à améliorer et à assouplir les structures racinaires afin d'accroître la productivité (Kirouani et al., 2019 ; Chourgehal & Hartani, 2020).

En matière de production agro-alimentaire, le blé dur se distingue par le caractère vitreux de son grain une caractéristique variétale essentielle pour la fabrication de semoules, couscous et pâtes alimentaires, pivots du régime alimentaire méditerranéen (Lafiandra et al., 2014 ; Coda et al., 2015), mais également par sa vulnérabilité hydrique et thermique tout au long de son cycle végétatif, notamment dans les hauts plateaux algériens semi-arides, région où les rendements sont extrêmement variables notamment du fait des effets de contraintes abiotiques (Kirouani et al., 2019 ; Chenafi et al., 2022).

Ce chapitre aborde l'importance socio-économique du blé dur en Algérie, la diversité variétale (locale vs améliorée) et les défis d'innovation agronomique pour concilier performance agricole et durabilité face à la transition climatique et à la dépendance au blé tendre importé (*Triticum aestivum*).

1 Origine du blé dur

Le blé dur (*Triticum durum*) est une céréale à grains nus, issue d'une longue évolution génétique amorcée il y a environ 500 000 ans par une hybridation naturelle entre deux espèces sauvages : (*Triticum urartu*) (génome AA) et une espèce proche d'*Aegilops speltoides* (génome BB) (Feldman & Levy, 2015 ; SemenceMag, 2025). Cette hybridation est à l'origine de l'apparition du blé dur spontané (*Triticum dicoccoides*), ancêtre direct du blé dur cultivé aujourd'hui (Marcussen et al., 2014).

La domestication du blé dur s'est produite il y a environ 10 000 ans dans le Croissant fertile, région du Proche-Orient correspondant aujourd'hui à la Syrie et à la Turquie, selon les restes

Chapitre 01 : Généralités sur le blé dur (Triticum durum)

archéobotaniques mis en évidence sur plusieurs sites néolithiques (Tanno & Willcox, 2006 ; Tengberg, 2022). Les premiers cultivateurs ont sélectionné des caractères favorables tels que des épis non fragiles, des grains plus grands (gènes GW2 et TGW6) et des glumes plus tendres facilitant le décorticage (Avni et al., 2017 ; Dubcovsky & Dvorak, 2007 ; Ishikawa et al., 2013). Après sa domestication, le blé dur s'est diffusé vers l'Égypte ancienne vers 6000 av. J.-C., où il fut utilisé pour produire des formes primitives de pâtes alimentaires (Fairbairn et al., 2005), puis vers l'Europe méditerranéenne vers 4000 av. J.-C., s'adaptant aux climats plus secs (Colledge et al., 2004). En Afrique du Nord, des variétés locales comme le 'Mahmoudi' en Tunisie ont émergé, témoignant d'une diversification géographique (Haudry et al., 2007).

Le blé dur se caractérise par une teneur élevée en protéines (12–15 %) et par un endosperme vitreux riche en caroténoïdes, qualités qui le rendent particulièrement adapté à la production de pâtes alimentaires et de semoule (Les Céréales, 2023 ; Saintelucie, 2023). Sa rusticité et sa tolérance à la sécheresse expliquent sa prédominance dans les régions méditerranéennes, bien qu'il soit également cultivé dans des zones tempérées (ARVALIS-Institut du végétal, 2012).

Malgré une réduction de la diversité génétique lors de la domestication (environ 25 %), la sélection moderne a permis le développement de variétés résistantes aux maladies, telles que 'Cappelli' (Italie, 1915), ainsi que de cultivars modernes comme 'Svevo', dont le génome a été séquencé par l'International Wheat Genome Sequencing Consortium en 2018 (Haudry et al., 2007).

2 Catégorisation botanique

Identification botanique du blé dur (*Triticum durum*) *Triticum turgidum subsp. Durum*, appelé communément blé dur, est une plante annuelle herbacée appartenant à la famille des Poaceae, au genre *Triticum* et à la tribu Triticeae (Feillet, 2000 ; Brouillet et al., 2006). C'est une monocotylédone tétraploïde ($2n = 4x = 28$ chromosomes). Selon Feillet (2000) et Brouillet et al. (2006), le blé dur est classé comme suit ::

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Liliopsid

Sous-classe : Commelinidae

Chapitre 01 : Généralités sur le blé dur (Triticum durum)

Ordre : Poales

Famille : Poaceae

Sous-famille : Pooideae

Tribu : Triticeae

Genre : *Triticum*

Espèce : *Triticum durum*

3 Description de *Triticum durum*

Le blé dur (*Triticum durum*) est une plante herbacée appartenant au groupe des céréales à paille, envisagé ici au sens morphologique. Sa morphologie influence sa croissance, son adaptation et sa productivité (Dupont & Guignard, 2012).

3.1 Appareil végétatif

La tige aérienne est creuse et segmentée (par des diaphragmes au niveau des nœuds), de section cylindrique. À sa base, elle peut s'associer à d'autres tiges ramifiées où apparaissent bourgeons et racines adventives, assurant ainsi la formation de nouveaux axes feuillés (Clarke et al., 2002 ; Dupont & Guignard, 2012). Son système racinaire est fasciculé, constitué de nombreuses racines fines dont la distribution est concentrée essentiellement dans les 25 premiers centimètres du sol, où l'intensité de l'absorption des éléments nutritifs est optimale (Clément & Prat, 1970). Les feuilles sont alternes (horizontales), à limbe linéaire portant des nervures parallèles, avec ligule membraneuse, oreillettes latérales, et engainantes autour du chaume (Clément & Prat, 1970 ; Bozzini, 1988). La feuille présente aussi une forte densité stomatique (de 50 à 70 stomates/mm²) et une cuticule épaisse riche en cires, deux adaptations importantes au dessèchement (Cutter, 2021).

3.2 Inflorescence

L'inflorescence est une tête terminale compacte composée de rangées d'épillets sessiles serrés (Bozzini, 1988 ; Bonjean & Picard, 1990). Chaque épillet comprend habituellement deux à cinq fleurs fertiles protégées par deux glumes et des glumelles. Le rachis est épais et résistant à la dégradation (Kellogg, 2020).

3.3 Grain

Le caryopse est ovoïde et présente un sillon latéral. À l'opposé de l'embryon, il porte une brosse de poils (Godon *et al.*, 1991 ; Hemery *et al.*, 2007). Le grain mesure généralement entre 5 et 8 mm et pèse entre 20 et 50 mg (Surget & Barron, 2005). Il est composé de trois tissus principaux : le germe ($\approx 3\%$), les enveloppes (13–17 %) et l'albumen (80–85 %) (Feillet, 2000 ; Kent & Evers, 1994). L'endosperme vitreux constitue une caractéristique typique du blé dur (Himi *et al.*, 2021).

3.4 Caractéristiques morpho-physiologiques spécifiques

Le blé dur se distingue du blé tendre par un feuillage plus clair, glabre, un tallage faible et un chaume long et souple, ce qui peut l'exposer davantage à la verse (Olmedo, 1995). L'épi se caractérise par un rachis solide, des glumes fortement carénées et des glumelles inférieures souvent armées d'une longue barbe (Simon *et al.*, 1989) (Figure 2).

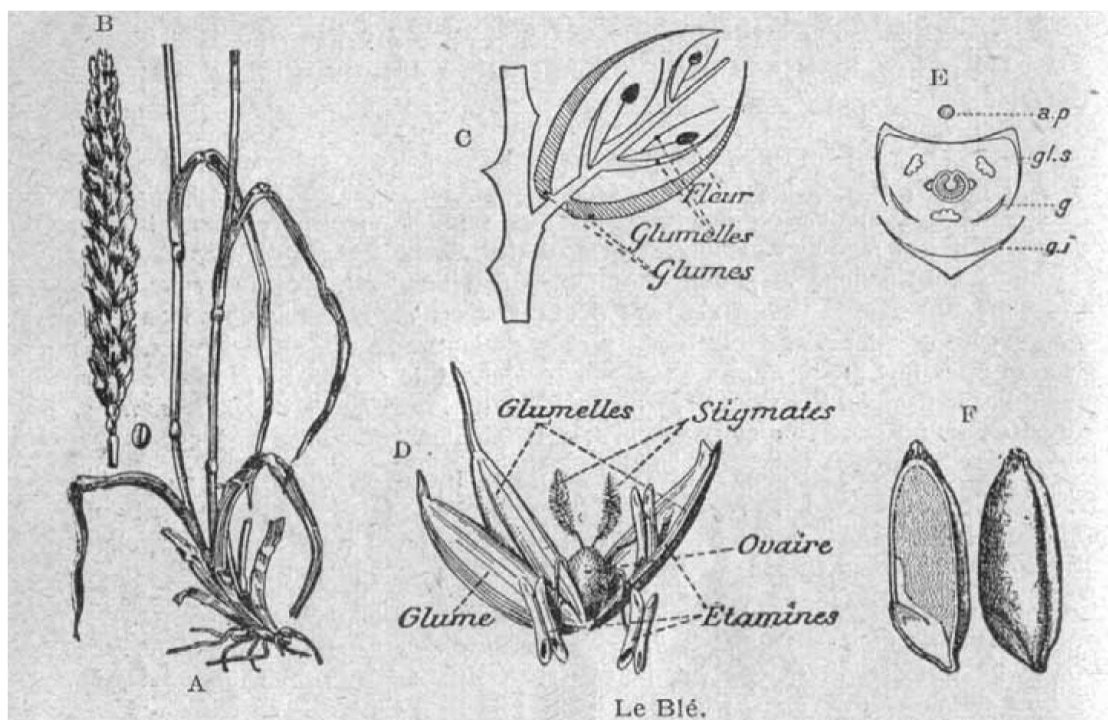


Figure 1: Description de la plante. A : plante de blé ; B : épi ; C : épillet ; D : une fleur isolée avec glume et glumelles ; E : grains de blé dont l'un est coupé en long (Kent & Evers, 1994 ; Barron *et al.*, 2007).

3.5 Adaptations morphologiques aux stress environnementaux

Le blé dur a développé plusieurs adaptations morphologiques, notamment :

- L'enroulement foliaire et la réduction de la surface stomatique en conditions de stress hydrique (Gregory et *al.*, 2021 ; Watt et *al.*, 2020) ;
- L'accumulation de silice dans l'épiderme, renforçant la résistance mécanique et limitant la perte d'eau (Peng et *al.*, 2022) ;
- Des racines plus profondes et des poils absorbants plus denses que chez le blé tendre, favorisant l'extraction d'eau dans les sols pauvres (Zhang et *al.*, 2022).

4 Variétés du blé dur présentes en Algérie

4.1 Les variétés locales traditionnelles

Les principales variétés locales traditionnelles de blé dur en Algérie sont Bidi17, Hedba03 et Mohamed Ben Bachir. Elles se caractérisent par une paille haute, une longue durée de la phase végétative avec une épiaison tardive, un nombre élevé de talles par m² et une surface foliaire importante, favorable à la production de biomasse utilisable comme fourrage en années sèches, mais peu satisfaisante en termes de rendement grainier. La durée prolongée de leur cycle végétatif les rend sensibles aux gelées tardives du printemps, fréquentes dans les Hauts Plateaux. Toutefois, elles présentent une bonne tolérance au stress hydrique grâce à leur capacité à accumuler des glucides dans les talles, ce qui constitue un atout pour leur résistance à la sécheresse. Leur rendement modéré à faible est principalement lié à un nombre réduit d'épis et de grains par épi, mais elles demeurent relativement stables en conditions de fortes contraintes environnementales (Kirouani et *al.*, 2019).

4.2 Variétés améliorées et modernes

Les principales variétés améliorées et modernes cultivées en Algérie sont Waha, Vitron, Simeto, Megress, Amar06, GTA dur, Ofanto. Ces variétés sont de taille intermédiaire, présentent une épiaison précoce (cycle court), une couverture foliaire plus réduite et une densité de talles par m² inférieure à celle des variétés locales. Elles sont nettement plus productives en grains, avec un nombre d'épis par m² et de grains par épi plus élevé, en particulier Megress et Amar06, qui présentent les meilleurs rendements (Kirouani et *al.*, 2019).

Certaines variétés conjuguent tolérance à la sécheresse, résistance aux maladies et bonne productivité, comme Vitron. Cette dernière se distingue par un taux élevé de sucres solubles, contribuant à une meilleure résistance au stress et à une qualité physiologique supérieure (Kirouani et *al.*, 2019 ; Biskri, 2023).

5 Importance du blé dans le monde et en Algérie

5.1 Dans le monde

Le blé dur (*Triticum durum*) représente environ 5 à 7 % de la production mondiale de blé. Il est cultivé sur 13 à 15 millions d'hectares et sa production annuelle moyenne est de 35 et 40 millions de tonnes (Martínez-Moreno et *al.*, 2022).

5.1.1 Rôle économique à l'échelle mondiale

La valeur marchande du blé dur est estimée entre 18 et 20 milliards de dollars par an, en forte progression depuis le début des années 2000 où elle se limitait à environ 5. Ce sont le Canada et l'Union européenne qui dominent le commerce international, exportant chaque année plusieurs millions de tonnes vers la majorité des pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (International Grains Council, 2013).

Au sein de l'Union européenne, la production de blé dur est d'environ 7,9 millions de tonnes, avec un premier plan européen affirmé par l'Italie, la Grèce, la France et l'Espagne. La France étant établie sur environ 400 000 hectares, surtout dans le Sud-Est, le Sud-Ouest et la région Centre, avec des rendements moyens de 50 q/ha, et allant jusqu'à 70 q/ha au nord (FranceAgriMer, 2023). Le Canada se place au premier rang mondial en tant qu'exportateur avec une production d'environ 5 millions de tonnes dont sont exportées 4 à 4,5 millions, cette production étant cependant sensible aux aléas climatiques. La Turquie est en forte progression de surfaces et d'exportations, rivalisant avec le Canada (GIE Blé Dur, 2023 ; Terre-net, 2023).

5.1.2 Importance alimentaire

Le blé dur est la substance de production de 95 % des pâtes alimentaires de luxe à travers le globe (Bonjean et *al.*, 2016). Il est également employé à la fabrication de couscous dans l'Afrique du Nord, de boulgour au Moyen-Orient, ainsi que de pains spéciaux en Italie ou en Grèce. À la vue nutritionnelle, il est préconisé pour son teneur en protéines (12-16 %) et son

Chapitre 01 : Généralités sur le blé dur (*Triticum durum*)

index glycémique plus bas (IG=50) par rapport au pain blanc fabriqué à partir du blé tendre (IG=70), le rendant un choix idéal pour une métabole de santé (GIE Blé Dur, 2023).

Tableau 1: Production mondiale de blé dur et parts des principaux pays producteurs en 2025-2026 (USDA, 2025).

Pays	Production du blé dur	Part mondiale (%)
Union Européenne	10,2	28,8
Canada	7,5	21,2
Turquie	4,0	11,3
Etats-Unis	3,5	9,9
Autres	7,2	20,3

5.2 Signification du blé dur en Algérie

Le blé dur est une culture stratégique en Algérie, qui couvre environ 45 % de la sole céréalière (1,1 à 1,3 million d'hectares), principalement dans les régions semi-arides (INRA Algérie, 2023 ; ONFA, 2017). Les rendements annuels sont de 1,2 à 1,8 t/ha en pluvial et de 3,5 à 4,5 t/ha en irrigué (ITGC, 2022). Les Hautes Plaines y sont produites 60 % ; le Tell occidental 25 % et le Sahara nord en irrigation 15 % (ITGC, 2022).

Malgré cette production, le constat est que l'Algérie reste le premier importateur mondial de blé dur, avec des importations annuelles supérieures à 1,4 million de tonnes pour satisfaire la demande intérieure alimentant son marché de la semoule, de la pâte et du couscous (ASJP, 2023; CIC, 2023), ce qui représente un coût pour le Trésor public compris entre 1,2 et 1,5 milliard USD par an, exposant ainsi le pays aux aléas des marchés internationaux (Banque d'Algérie, 2023).

La production agricole locale se heurterait sans nul doute à des contraintes climatiques majeures, telles qu'une faible pluviométrie (250-400 mm/an) d'une part et des vagues de chaleur fréquentes (>40 °C) en période de floraison qui détériorent la fertilité des grains (Mekhlouf et *al.*, 2006). Les pratiques culturales ne sont pas encore suffisamment mécanisées (30 % des exploitations), mobilisent peu de semences certifiées (<20 %), ont des coûts de production au-delà de 40 % de ceux supportés par l'agriculteur marocain (Ait Kaki, 2007;

*Chapitre 01 : Généralités sur le blé dur (*Triticum durum*)*

Benbelkacem & Kellou, 2001), et enfin, les subventions agricoles sont déséquilibrées au profit des céréales d'irrigation par rapport au blé dur pluvial (INRA Algérie, 2023).

Le potentiel agronomique est certes réel, grâce à l'existence de variétés locales adaptées, telles que Mohamed Ben Bachir, reconnues pour la résistance à la sécheresse (Benmoussa et al., 2023). Des innovations sont à signaler, comme le semis direct sous couvert végétal (tests concluants à Sétif) et l'irrigation au goutte-à-goutte (économie d'eau de 40 %) en cours d'expérimentation (INRA Algérie, 2023), mais elles restent à généraliser. Le pays s'est fixé l'objectif de produire 60 % de nos besoins en blé dur d'ici 2030. Pour y arriver, un budget annuel de 500 millions de dinars algériens est investi dans la recherche agricole (Ministère de l'Agriculture, 2023). Pour aider les agriculteurs, des initiatives sont mises en place, comme une assurance pour protéger leurs récoltes des aléas climatiques et des aides financières ciblées pour l'achat de semences et pour l'irrigation (information de l'INRA Algérie, 2023).

Tableau 2: Évolution de la surface semée, de la production et du rendement du blé dur en Algérie en 2019-2024 (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Plan national d'autosuffisance en céréales 2021–2025. Alger, Algérie).

Année	Surface semée (ha)	Production (tonnes)	Rendement moyen (q/ha)
2019	1 050 000	1 200 000	11,4
2020	980 000	1 100 000	11,2
2021	1 020 000	1 300 000	12,7
2022	1 000 000	1 250 000	12,5
2023-2024	3 200 000	3500 000	45

*Chapitre 02 : Le stress salin et
le blé dur*

La salinité des sols constitue aujourd'hui l'un des principaux facteurs abiotiques à prendre en compte pour la production agricole dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les zones arides et semi-arides où le blé dur (*Triticum durum*) représente une culture vivrière mais aussi économique essentielle (Zidane et *al.*, 2018). Ce stress environnemental, lié à une accumulation excessive de sels solubles dans le sol, ralentit la croissance, le développement et le rendement des plantes cultivées (Munns & Tester, 2008). Bien que relativement tolérant aux conditions difficiles, le blé dur subit de fortes perturbations physiologiques et biochimiques, à un niveau comparable à celui d'autres espèces cultivées, ce qui nuit à sa productivité ainsi qu'à la qualité des grains récoltés (Ashraf & Harris, 2004).

1 Effets néfastes de la salinité sur les plantes

Le stress salin impacte le végétal de plusieurs façons corrélées, avant tout, le stress osmotique ainsi que le stress ionique et le stress nutritionnel.

1.1 Le stress osmotique

L'augmentation de la concentration en sels dans le sol entraîne une pression osmotique plus élevée dans la solution du sol, ce qui réduit la disponibilité en eau pour les racines et empêche les plantes d'absorber l'eau dont elles ont besoin, générant ainsi un stress hydrique comparable à une sécheresse physiologique (Agri Maghreb, 2020). Le potentiel hydrique cellulaire diminue et, en fonction de l'ampleur de la réduction de la turgescence, l'expansion des cellules, et donc la croissance des tissus végétaux, se trouvent limitées (Ayadi-Bouneqab, 2020). Pour s'adapter, les plantes produisent des solutés compatibles (osmoprotecteurs) tels que certains acides aminés, sucres ou polyols, qui permettent de maintenir l'équilibre hydrique cellulaire sans perturber les fonctions métaboliques (Bentrad, 2016 ; Luu, 2020).

1.2 Stress hypersalinisé

L'accumulation d'ions toxiques majeurs, en particulier Na^+ et Cl^- , provoque la toxicité cellulaire par un effet physiologique direct sur les mécanismes métaboliques (amortissement des processus enzymatiques) et structuraux (des membranes cellulaires) entraînant de possibles morts cellulaires (Agri Maghreb, 2020 ; Symborg, 2011). Dans ce cas de signalisation critique, les plantes se défendent par la mise en œuvre de mécanismes de compartimentation dans les vacuoles et d'exclusion des cellules associée à la régulation des transporteurs (Luu, 2020).

1.3 Déséquilibre de la nutrition minérale

La surabondance d'ions Na^+ et de Cl^- dans le sol désorganise l'équilibre d'assimilation des autres nutriments minéraux, à savoir potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), entraînant des déséquilibres nutritionnels. Ce rapport de compétition induit un épuisement de la nutrition minérale et donc du métabolisme et du développement des plantes (Symborg, 2011).

1.4 Stress oxydatif consécutif

En conséquence de l'élimination du stress salin, on assiste également à une augmentation de la production de formes réactives de l'oxygène (ROS) perturbatrices des lipides, des protéines et des acides nucléiques (Encyclopédie de l'environnement, 2020 ; Symborg, 2011). Pour pallier ces effets, les plantes mettent en œuvre des systèmes antioxydants enzymatiques (catalase, superoxyde dismutase, peroxydases) et non enzymatiques (polyphénols, flavonoïdes) (Luu, 2020) (Figure 2) .

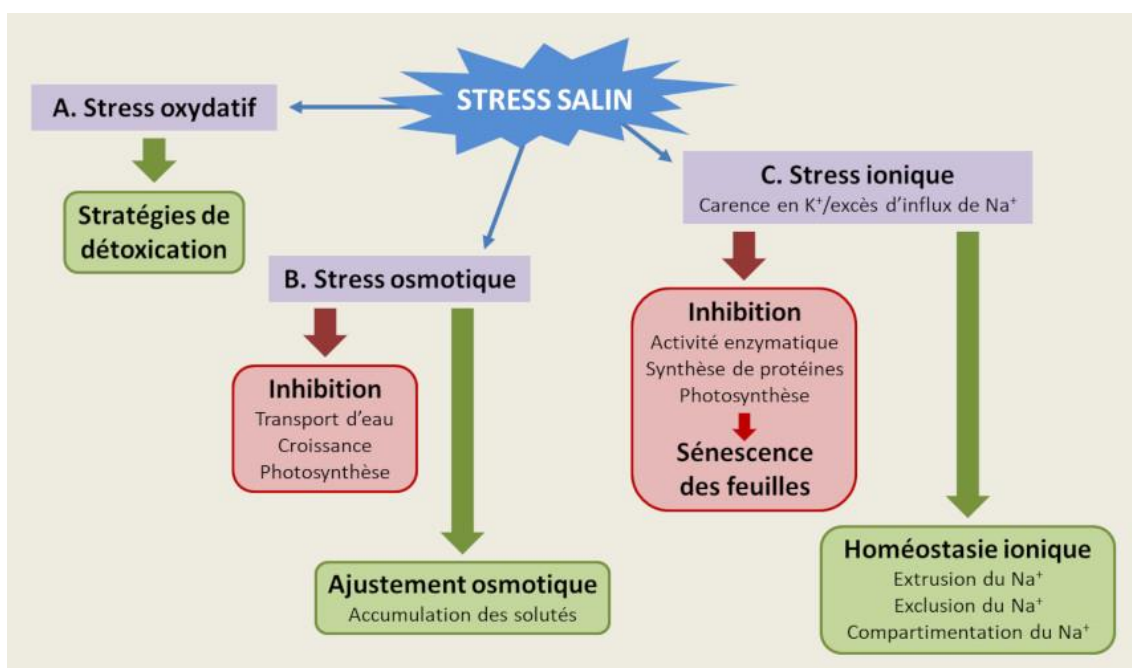


Figure 3: Effets délétères liés à la toxicité du stress salin et réponse cellulaire mise en place pour assurer la tolérance. Chez les plantes halophiles, l'excès de sel dans le sol provoque un stress ionique, oxydatif et osmotique qu'elles doivent gérer en mettant en place des stratégies pour maintenir (A) les molécules du stress oxydant à un niveau acceptable, (B) l'équilibre osmotique, et (C) l'homéostasie ionique. (Encyclopédie de l'environnement, 2020).

2 Pratiques agronomiques pour limiter l'impact de la salinité

2.1 Gestion de l'irrigation et drainage des sols salins

Une bonne irrigation avec une eau peu saline et un drainage effectif minimisent l'accumulation des sels en surface, réduisant leur toxicité pour la plante (Gorham *et al.*, 1990 ; Buchanan *et al.*, 2000 ; Yamaguchi et Blumwald, 2005). L'apport de matière organique (compost, fumier) aide à la rétention d'eau et à la structure du sol, mais aussi à la diminution de la salinité en profondeur. Un apport en potasse et en chaux compense la perte d'éléments nutritifs liée à la salinité (Jacoby, 1994 ; Munns & Tester, 2008).

2.2 Approches biotechnologiques et génétiques

La sélection variétale et l'amélioration, notamment en incorporant des gènes de tolérance issus de plantes halophytes, sont également des pistes prometteuses (Yamaguchi et Blumwald, 2005 ; Flowers et Colmer, 2008 ; Munns et Tester, 2008). L'application de substances protectrices comme l'acide salicylique ou la glycine bêtaïne active les enzymes antioxydantes et la synthèse d'osmolytes (Bohnert et Shen, 1999 ; Hayat *et al.*, 2010). Enfin, les progrès récents sur les mécanismes moléculaires devraient permettre, à terme, le développement de technologies de pointe telles que l'édition du génome (Zhu, 2001).

2.3 Intégration dans les systèmes de production durable

L'adaptation des systèmes de culture passe par l'emploi de variétés tolérantes, la gestion de l'eau, le paillage, la rotation (Yamaguchi & Blumwald, 2005 ; Gorham *et al.*, 1990 ; Buchanan *et al.*, 2000). La diversification (blé dur, orge, luzerne, betterave sucrière) participe au bon fonctionnement du sol et diminue les risques liés à la salinité (Flowers & Colmer, 2008 ; Munns & Tester, 2008).

Chapitre 03 : Importance des PGPR

Depuis l'Antiquité, l'importance de la fertilité des sols a attiré l'attention des savants. Théophraste (372-287 av. J.-C.) l'a déjà signalé en suggérant le mélange de différents types de sol pour corriger leurs défauts et améliorer leur fertilité. Virgile témoigna plus tard de l'usage des légumineuses dans les terres cultivées, soulignant l'influence favorable de celles-ci sur la fertilisation des sols. En 1888, Hellriegel & Wilfarth ont décrit la colonisation racinaire au sein de la rhizosphère des graminées et de ceux des légumineuses et mis en évidence la capacité des bactéries du sol à transformer l'azote atmosphérique en formes assimilables par les plantes. Ces travaux ont constitué un véritable tournant concernant la connaissance des interactions plantes-micro-organismes du sol. Dans le domaine, la recherche a connu un tournant dans les années 1970 avec Kloepper et Schroth (1978), établissant le terme " rhizobactéries " pour désigner les communautés bactériennes colonisant les racines de façon compétitive, favorisant par là même la croissance des plantes, tout en jouant un rôle déterminant dans la réduction des maladies (Kloepper & Schroth, 1978).

Lors de leurs travaux en 1981, Kloepper et Schroth désignent ces micro-organismes sous le terme de plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). Leur étude a démontré que certaines souches de *Pseudomonas fluorescens* pouvaient améliorer le rendement des cultures de pommes de terre, jusqu'à 500 % pour certaines, grâce à la production de sidérophores, chélateurs de fer qui rendent indisponibles aux bactéries pathogènes natives cet élément essentiel à leurs métabolismes (Garcia et al. 2003). Pourtant, ces microorganismes ne représentent que de 1 à 2% des bactéries dans la rhizosphère (Beneduzi et al., 2012). Les rhizobactéries sont des bactéries qui se trouvent naturellement dans le sol et qui sont capables d'adhérer spontanément aux racines des plantes, soit grâce à une production spontanée de biofilms ou à la formation de structures de type symbiotique. Les bactéries peuvent agir directement quant à la croissance et indirectement en inhibant les pathogènes. Les PGPR appartiennent à de multiples genres microbiens tels que *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Serratia* (Ahmad et al., 2008), *Acinetobacter*, *Flavobacterium* et *Erwinia* (Rodriguez & Fraga, 1999), ce qui témoigne de la richesse fonctionnelle et écologique de ces microorganismes bénéfiques.

1 Généralités sur les *Pseudomonas* spp. fluorescents

Le genre *Pseudomonas* regroupe des bactéries Gram-négatives, aérobies, mobiles grâce à un ou plusieurs flagelles polaires, et caractérisées par une grande diversité métabolique leur

Chapitre 03 : Importance des PGPR

permettant de coloniser une large gamme d'environnements, notamment les sols, les eaux et la rhizosphère des plantes (Palleroni, 2005 ; Silby et *al.*, 2011). Parmi les genres bactériens, *Pseudomonas* est l'un des plus étudiés et exploités en agronomie. Il comprend principalement des espèces telles que *Pseudomonas fluorescents*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas syringae* et *Pseudomonas aeruginosa*, reconnues pour leur rôle dans les interactions avec les plantes et leur potentiel d'utilisation en protection des cultures (Raaijmakers & Mazzola, 2012).

En particulier, *Pseudomonas* spp. fluorescents est une espèce largement étudiée pour ses capacités à produire des composés antibiotiques qui inhibent la croissance de phytopathogènes, ainsi que pour sa faculté à coloniser efficacement la rhizosphère, contribuant ainsi à une meilleure santé des plantes (Weller, 2007). De plus, certaines souches de *Pseudomonas fluorescents* peuvent stimuler la croissance des plantes en facilitant l'absorption des nutriments ou en induisant des mécanismes de défense systémique chez l'hôte végétal (Haas & Défago, 2005).

En agriculture, différentes espèces du genre *Pseudomonas* sont reconnues comme des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR). Elles améliorent la nutrition végétale par la solubilisation du phosphore et du potassium, la fixation de l'azote atmosphérique, et la production de phytohormones, notamment les auxines (Perez-Montano et *al.*, 2014). Elles produisent également des antimicrobiens tels que le 2,4-diacétylphloroglucinol (DAPG), la pyrrolnitrine, les phénazines et le cyanure d'hydrogène, capables d'inhiber la croissance des pathogènes du sol (Weller et *al.*, 2007).

Ces mécanismes contribuent à la protection des cultures et à l'induction de résistances systémiques face aux stress biotiques et abiotiques (Pieterse et *al.*, 2014). Certaines espèces comme *P. fluorescens* et *P. putida* sont utilisées comme bio-inoculants pour améliorer la santé des plantes et la fertilité des sols, tandis que d'autres, comme *P. syringae*, sont exploitées comme agents de biocontrôle contre les maladies post-récolte (Weller et *al.*, 2007 ; Bakker et *al.*, 2013). Bien que *P. aeruginosa* soit considéré comme un pathogène opportuniste, certaines de ses souches présentent des effets bénéfiques, favorisant la croissance des plantes et leur résistance aux stress environnementaux. Ainsi, le genre *Pseudomonas* regroupe des espèces aux fonctions variées, parfois opposées, ce qui en fait d'excellents candidats pour une agriculture durable et respectueuse de l'environnement (Raaijmakers & Mazzola, 2012) (Figure 3).

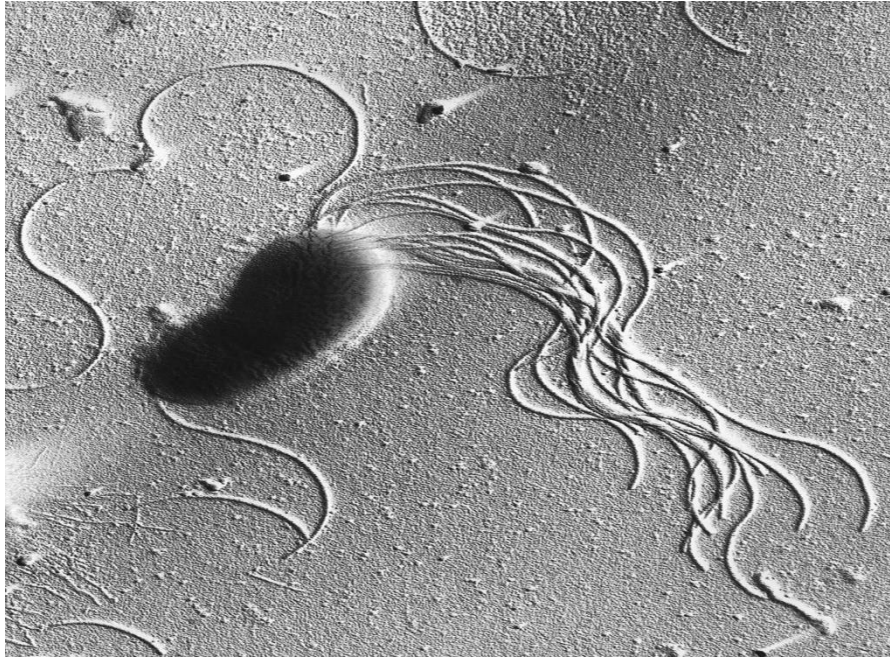


Figure 4: Micrographie électronique à balayage de *Pseudomonas fluorescens* (reproduit avec autorisation de Science Source, dans Scales et *al.*, 2014).

2 Effets bénéfiques des *Pseudomonas* spp. fluorescents

2.1 Effets de phytostimulation

2.1.1 Production d'hormones de croissance

Ces bactéries sécrètent principalement des phytohormones telles que l'acide indole-3-acétique (AIA, auxine), mais également des cytokines et des gibbérellines. Ces hormones régulent la division cellulaire, l'élongation racinaire, la formation de nouvelles racines latérales, et la différenciation cellulaire, stimulant ainsi la croissance globale des plantes et leur capacité à absorber les nutriments (Gutierrez-Manero et *al.*, 2001 ; Ricci et *al.*, 2019).

2.1.2 Amélioration de la nutrition minérale

Les *Pseudomonas fluorescens* contribuent à l'amélioration de la nutrition minérale des plantes par plusieurs mécanismes complémentaires. Ils solubilisent les phosphates insolubles grâce à la production d'acides organiques, rendant le phosphore disponible pour la plante. Par ailleurs, ils synthétisent des sidérophores, notamment la pyoverdine, qui captent le fer dans le sol et le rendent accessible aux racines, tout en limitant sa disponibilité aux agents pathogènes. Certaines

souches améliorent également la fixation de l'azote en favorisant les interactions avec des bactéries fixatrices d'azote, augmentant ainsi la teneur en azote assimilable par la plante (Naik et *al.*, 2008 ; Ongena et *al.*, 2002 ; Lemanceau, 1992).

2.1.3 Amélioration de la germination et croissance des plantes

Pseudomonas fluorescens colonise la spermosphère, zone entourant la graine, où il protège les semences contre les microbes pathogènes et stimule la germination ainsi que la levée des plantules. Cette protection et cette stimulation sont observées même en conditions de stress (Alström, 1991 ; Höfte & Altier, 1991 ; Digat, 1994). La colonisation racinaire favorise également le développement initial du système racinaire, améliorant ainsi l'absorption de l'eau et des nutriments essentiels (Taguet et *al.*, 2015).

2.1.4 Stimulation des interactions symbiotiques

Certaines souches favorisent les symbioses bénéfiques, en stimulant la nodulation des légumineuses avec *Rhizobium* et en encourageant la colonisation par les champignons mycorhiziens, optimisant l'absorption de nutriments (Lemanceau, 1992).

2.2 Effet de biocontrôle

2.2.1 Production d'antibiotiques (ATB)

Pseudomonas fluorescens produit plusieurs antibiotiques majeurs, notamment la 2,4-diacétylphloroglucinol (DAPG), les phénazines, la pyoluteorine, et la pyrrolnitrine. Ces métabolites inhibent efficacement les agents phytopathogènes dans la rhizosphère, protégeant ainsi la plante contre diverses maladies (Haas & Défago, 2005 ; Mavrodi et *al.*, 2006).

2.2.2 Production d'enzymes hydrolytiques et composés toxiques

La production d'enzymes comme les chitinases et protéases dégrade les parois cellulaires de champignons pathogènes. Par ailleurs, la synthèse d'hydrogène cyanure (HCN) participe à l'inhibition directe des pathogènes en milieu rhizosphérique (Shanmugaiah et *al.*, 2008 ; Köhl et *al.*, 2019).

2.2.3 Compétition nutritionnelle et spatiale

Grâce à la production de sidérophores, *Pseudomonas fluorescens* joue une compétition féroce pour le fer, élément vital pour la plupart des microbes, limitant la croissance des pathogènes. Elle occupe aussi efficacement l'espace autour des racines, limitant ainsi l'établissement des microbes nuisibles (Cornelis & Dingemans, 2013) (Figure 4).

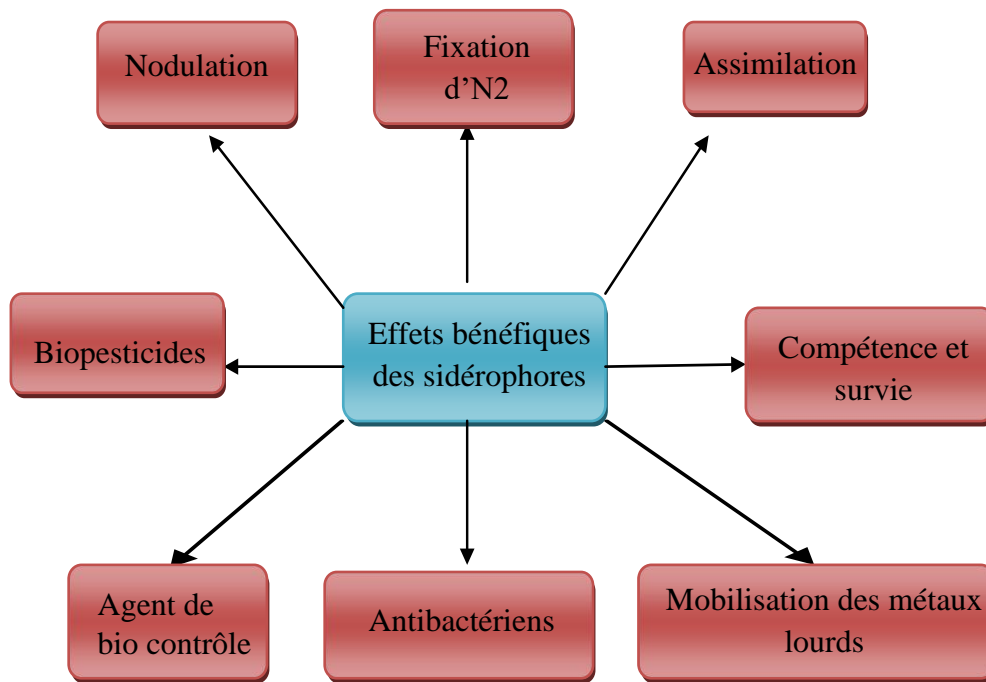


Figure 5: Fonctions biologiques des sidérophores (Khan et *al.*, 2009).

2.2.4 Acide cyanhydrique (HCN)

L'acide cyanhydrique (HCN) est un composé volatile produit par certaines souches de *Pseudomonas fluorescens*. Il agit comme un agent toxique pour de nombreux microorganismes pathogènes du sol, inhibant leur croissance et leur développement. En outre, l'HCN peut induire des mécanismes de résistance systémique chez la plante, renforçant sa défense contre diverses agressions biotiques. Ce métabolite est donc un facteur clé du biocontrôle exercé par ces bactéries en milieu rhizosphérique (Shanmugaiah et *al.*, 2008 ; Larbaoui-Dahoumane et *al.*, 2023).

2.2.5 Induction de la résistance systémique (ISR)

La colonisation par *Pseudomonas fluorescens* active des mécanismes de défense chez la plante, par l'induction systémique de résistances. Ceci implique l'activation des voies de signalisation

jasmonate et éthylène, renforçant la tolérance de la plante aux stress biotiques (champignons, bactéries) et abiotiques (Pieterse et *al.*, 2014).

2.2.6 Formation de biofilms

La bactérie forme des biofilms protecteurs, favorisant une colonisation stable et durable au niveau racinaire, ce qui renforce sa compétitivité et son effet bénéfique sur la plante (Beneduzi et *al.*, 2012) (Figure 5) .

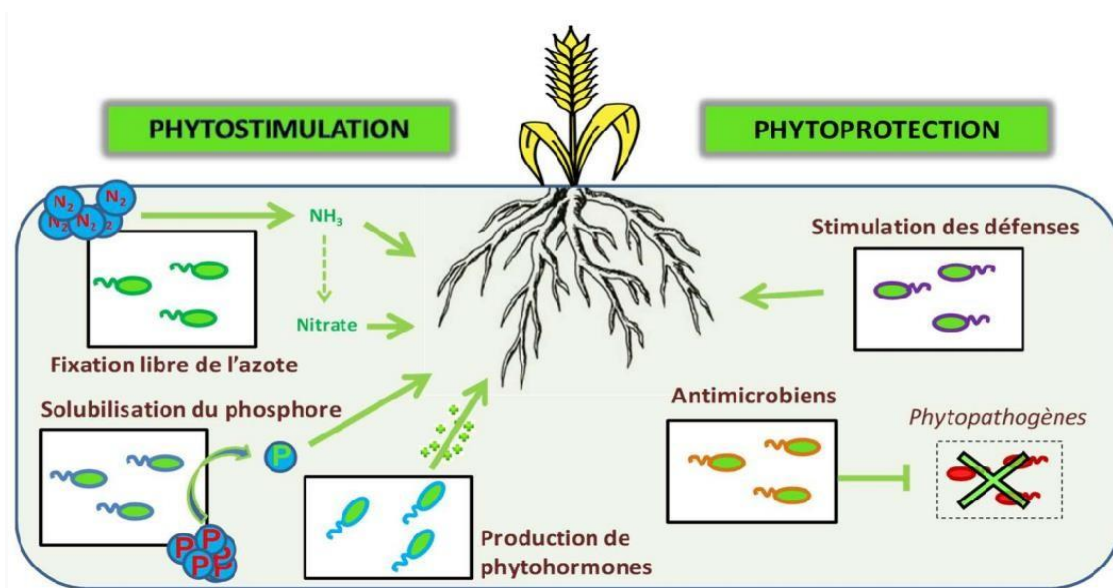


Figure 6 : Modes d'action des rhizobactéries bénéfiques, qui conduisent à des effets de phytostimulation ou de phytoprotection du blé (Vacheron et *al.*, 2013; Levy et *al.*, 2018).

3 Mécanismes de tolérance des *Pseudomonas* spp. fluorescents au stress salin

3.1 Accumulation de solutés compatibles (osmoprotecteurs)

Ces bactéries synthétisent ou transportent des molécules organiques neutres telles que la glycine bétaine dont l'accumulation induit l'augmentation de la pression osmotique des tissus racinaires, qui stabilisent les protéines et les membranes cellulaires sans perturber les fonctions cellulaires. Cette accumulation permet de contrer le stress osmotique induit par la haute concentration de sel (Rhodes & Hanson, 1993 ; Kempf & Bremer, 1998). La glycine bétaine peut également être apportée par des halophytes comme *Atriplex halimus*, favorisant la survie bactérienne dans les sols salés (Larguet, 1998 ; Ben Hassine & Lutts, 2010).

3.2 Osmorégulation ionique

Face au choc hyper-osmotique dû à une forte teneur en NaCl, *Pseudomonas* spp. peuvent réguler l'accumulation intracellulaire d'ions tels que le potassium (K⁺) et le glutamate, en premier lieu, pour compenser l'augmentation de la pression osmotique externe avant d'accumuler des osmoprotecteurs organiques, ce qui aide à prévenir la plasmolyse cellulaire (Sleator & Hill, 2001 ; Le Rudulier et *al.*, 2002).

3.3 Modulation de la perméabilité membranaire et protection cellulaire

Ces bactéries adaptent la perméabilité de leur membrane pour limiter la perte d'eau cellulaire dans un environnement hypertonique, évitant ainsi la plasmolyse, qui inhiberait des fonctions cellulaires essentielles telles que l'absorption des nutriments, la réplication de l'ADN et la biosynthèse (Csonka, 1989 ; Saum & Müller, 2007).

3.4 Défense antioxydante contre le stress oxydatif induit par la salinité

Le stress salin stimule la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) toxiques. *Pseudomonas* spp développent des systèmes antioxydants pour neutraliser ces ROS et ainsi protéger leurs composants cellulaires (Parida & Das, 2005).

3.5 Variabilité de tolérance entre souches

La tolérance au NaCl varie selon les souches de *Pseudomonas* spp. fluorescents. Par exemple, les isolats provenant de la rhizosphère d'oignon montrent une meilleure tolérance au sel (jusqu'à environ 0,51 Mm NaCl) que ceux des rhizosphères de tomate ou d'aubergine. Au-delà de 0,51 Mm NaCl, la croissance bactérienne est fortement réduite ou inhibée (DIAW et *al.*, 2018).

3.6 Effet bénéfique des extraits d'halophytes

La glycine bétaine provenant d'halophytes tels qu'*Atriplex halimus* agit comme une source naturelle d'osmoprotection, améliorant la croissance des *Pseudomonas* spp. fluorescents en condition de stress salin élevé (Ben Hassine & Lutts, 2010) (Figure 6).

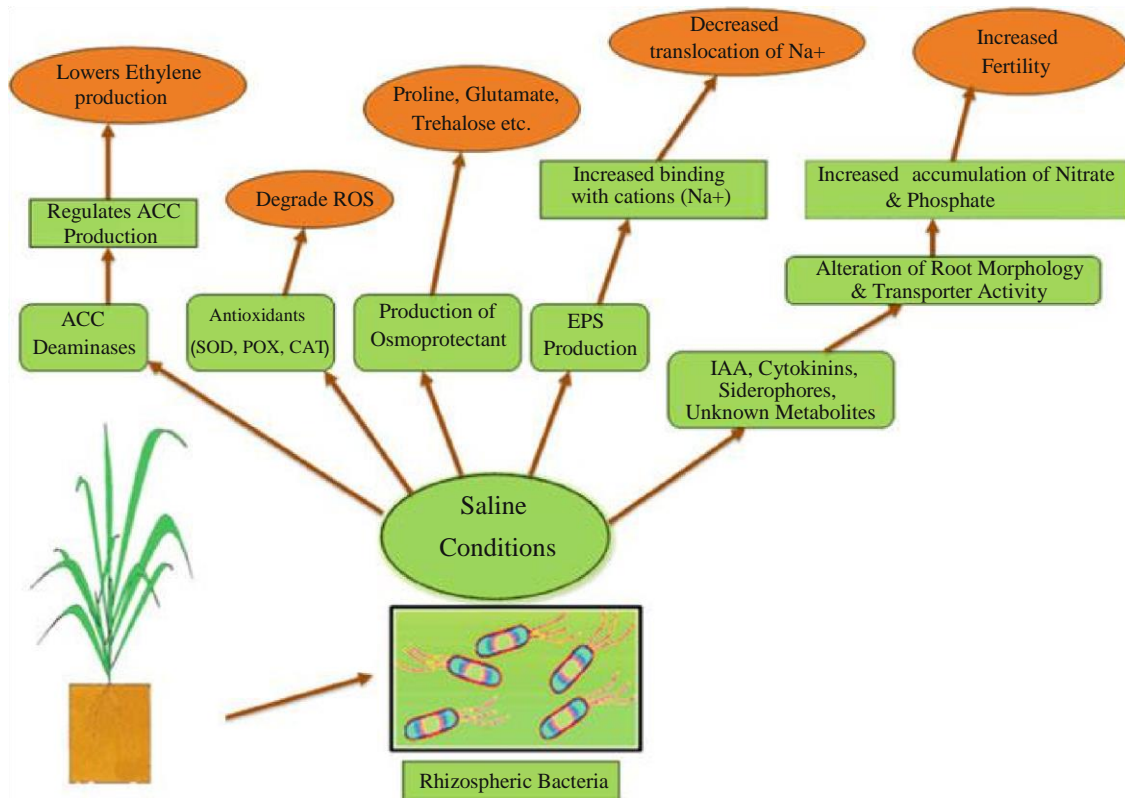


Figure 7 : Augmentation de la tolérance et la survie des plantes induite par les PGPR en milieu salin (Ashraf et *al.*, 2008).

Partie expérimentale

*Matériels
Et
Méthodes*

1 Matériels biologiques

1.1 Isolats bactériens

Les souches de *Pseudomonas* spp. Fluorescents utilisées dans cette étude sont les deux souches bactériennes **P64** et **CH**, reconnues pour leurs capacités promotrices de croissance de diverses espèces végétales. Les deux souches bactériennes étudiées font partie de la collection de laboratoire.

La pureté des souches bactériennes a été vérifiée par la réalisation de repiquages successifs sur milieu **King B** (King et al., 1954) (annexe 1).

Les souches pures sont conservées à **40°C** (figure 7).



Figure 8: Les souches bactériennes P64 et CH de *Pseudomonas* spp. Fluorescents, cultivée sur milieu King B.

1.2 Matériel végétal

Le matériel végétal est constitué de deux variétés de blé dur, la variété **Vitron** et la variété **Amar**, sélectionnées pour leurs caractéristiques agronomiques et leur sensibilité variable au stress salin.

Ces variétés ont été choisies afin d'évaluer l'effet de l'inoculation bactérienne sur leur développement et leur résistance à la salinité du milieu.

2 Stimulation de la germination du blé dur sous l'effet du stress salin (essai N°1)

2.1 Préparation des graines

Les graines sont triées manuellement au laboratoire. Celles qui sont visiblement abîmées ou percées sont éliminées du lot.

2.1.1 Test de viabilité des graines

Ce test (figure 8) consiste à placer chaque lot de graines dans un récipient contenant de l'eau distillée.

Les graines qui tombent au fond sont considérées comme mûres, tandis que celles qui remontent à la surface sont soit immatures, soit mortes, et sont donc retirées du lot (Come, 1970).



Figure 9: Test de viabilité des graines.

2.1.2 Désinfection des graines

La désinfection des graines a été réalisée par trempage dans de l'eau javellisée pendant 20 minutes (figure 9).

Trois rinçages à l'eau distillée stérile sont ensuite effectués.

Les graines désinfectées sont ensuite déposées sur du papier absorbant stérile pour le séchage.



Figure 10: Désinfection des graines.

2.2 Bactérisation des graines

La bactérisation des graines a été réalisée à l'aide de suspensions bactériennes préparées à partir de crème bactérienne des deux souches **P64** et **CH**, âgées de 24 heures et prélevées sur milieu **King B** (figure 11).

La concentration de la suspension bactérienne a été ajustée à 10^7 UFC à l'aide d'un spectrophotomètre réglé à **620 nm**.

La bactérisation a été effectuée en trempant les graines dans chaque suspension bactérienne pendant **30 minutes**

Les graines témoins (non bactérisées) ont été placées dans de l'eau distillée stérile (figure 10).



Figure 11: Les graines témoins (non bactérisées).



Figure 12: Bactérisation des graines avec la souche P64 et la souche CH.

2.3 Préparation des solutions salines

Les solutions à différentes concentrations de NaCl sont préparées. Les cinq solutions utilisées sont : C0 (H₂O stérile), qui constitue la concentration témoin ; C1 (0,8g/L), C2 (1,2g/L), C3 (1,6g/L) et C4 (2g/L).

2.4 Mise en germination

Les graines désinfectées et bactérisées avec la souche bactérienne **P64** et la souche **CH**, ainsi que les graines non bactérisées (témoins), sont disposées sur du papier absorbant stérile dans des boîtes de Pétri de 90 × 90 mm.

Les graines sont réparties à raison de 20 graines par boîte, avec cinq répétitions pour chaque modalité de concentration de NaCl, ce qui fait 100 graines pour chaque traitement étudié.

Le dispositif expérimental adopté est une randomisation totale (figure 12).

Afin de maintenir une humidité suffisante au niveau des boîtes, chaque boîte reçoit quotidiennement 3 mL de solution de NaCl, à partir du premier jour de la mise en germination.

Les boîtes sont maintenues à une température ambiante (25 à 30 °C) pendant **7 jours**, pour la germination.

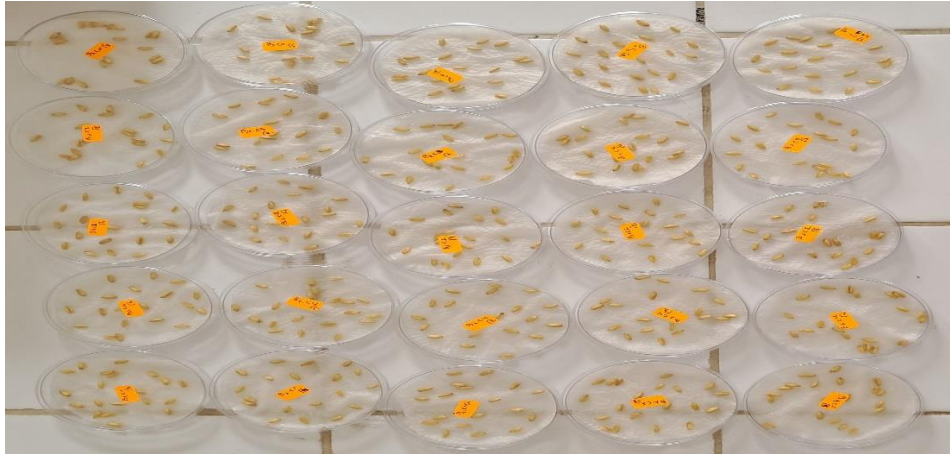


Figure 13: Dispositif expérimentale des graines.

2.5 Paramètres étudiés

Les graines sont dénombrées quotidiennement afin d'évaluer leur capacité à germer, ainsi que la durée nécessaire à leur germination.

Une graine est considérée comme germée dès que la radicule perce les téguments.

L'évaluation de la germination repose sur les critères suivants :

➤ Taux de germination (TG)

Le taux de germination est défini comme le pourcentage de graines ayant germé par rapport au nombre total de graines. Il est calculé selon la formule suivante :

$$\text{TG \%} = (\text{NI} / \text{NT}) \times 100$$

où :

NI : nombre de graines germées.

NT : nombre total de graines mises en germination.

➤ Index Vigor

Cette mesure permet d'évaluer la vigueur des plantules en intégrant à la fois leur développement morphologique et leur capacité germinative, afin de comparer les performances des différents traitements. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$\text{IV} = (\text{Lp} + \text{Lr}) \times \text{TG}$$

Où :

Lp : longueur moyenne de la plumule (en cm).

Lr : longueur moyenne de la racicule (en cm).

TG : taux de germination (en %).

Afin de mettre en évidence les effets bénéfiques des souches bactériennes **P64** et **CH** de *Pseudomonas fluorescens*, nous avons évalué l'évolution de quelques paramètres de croissance de chaque plant. Les paramètres mesurés sont :

➤ **Longueur de la racine**

Mesurée à l'aide d'une règle graduée, après étalement complet de la racine.

➤ **Nombre de racines**

Compté manuellement par observation visuelle et manipulation.

➤ **Longueur de la tige**

Mesurée à l'aide d'une règle graduée, du collet jusqu'au sommet de la partie foliaire.

❖ **Analyse statistique**

L'analyse statistique des résultats est basée sur l'analyse de la variance, à l'aide du logiciel STAT-BOX.

La comparaison des moyennes a été effectuée par le test de Newman-Keuls, au seuil de probabilité de **5 %**.

3 Biostimulation de la croissance du blé dur

3.1 Transplantation

Après une semaine de pré-germination des graines des deux variétés de blé dur (variété Viton et variété Amar), les plantules ont été transplantées dans des plaques alvéolées en plastique, à raison d'une plantule par alvéole.

Le substrat utilisé dans notre expérimentation est de la tourbe, conditionnée dans un sac de **10 kg**.

Les plantules sont régulièrement irriguées à l'eau courante jusqu'à la fin de l'expérimentation.

3.2 Dispositif expérimental

Les traitements ont été organisés selon un dispositif en randomisation totale, chaque traitement étant représenté par **20 plants**. Les traitements étudiés sont :

- **T** : témoin négatif, non bactérié.é.
- **T1** : plants bactérié.és par la suspension bactérienne de **P64**.
- **T2** : plants bactérié.és par la suspension bactérienne de **CH**.

3.3 Paramètres étudiés

➤ **Poids frais des racines et de la partie foliaire**

Au stade de 3 feuilles, les plants sont dépotés, secoués et rincés pour éliminer les particules de tourbe adhérentes au système racinaire.

À l'aide d'un scalpel stérile, la partie foliaire est séparée de la partie racinaire au niveau du collet.

Chaque partie est ensuite pesée immédiatement à l'aide d'une balance de précision.

➤ **Poids sec des racines et de la partie foliaire**

Les racines et la partie foliaire de chaque plant sont placées séparément dans des sachets en papier.

Après un passage à l'étuve pendant 5 jours à 75 °C, une deuxième pesée est effectuée afin de déterminer le poids sec.

*Résultats
Et
Discussion*

1 Résultats

1.1 Résultats de l'effet de la bactériation sur la germination de *Triticum durum* sous le stress salin

1.1.1 Taux de germination

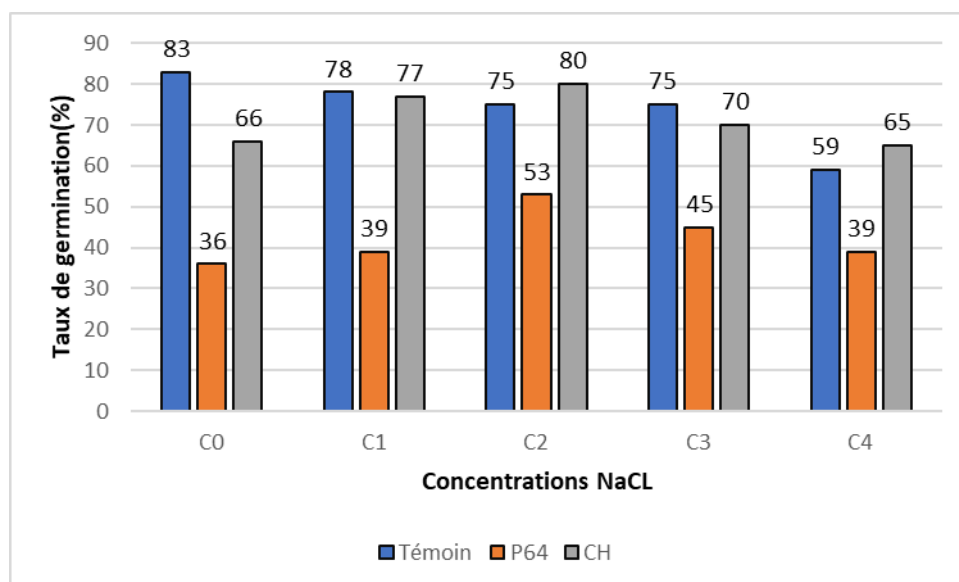


Figure 14: Effet de la bactériation sur le taux de germination des grains de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.

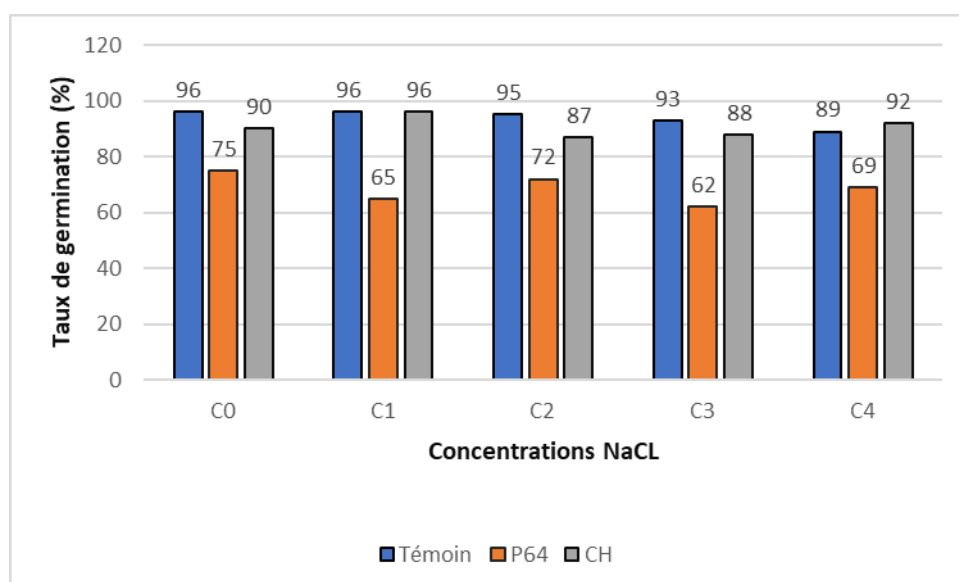


Figure 15: Effet de la bactériation sur le taux de germination des grains de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.

Résultats et discussion

D'après les résultats obtenus dans la figure N°13, nous observons une diminution générale de la germination des graines de la variété Vitron à mesure que la salinité augmente (quel que soit le traitement appliqué). En absence de stress salin (C0), les grains non bactérisés (témoin) présentent le taux de germination le plus élevé (83 %), suivis par les grains bactérisés par la souche CH (66 %) et ceux bactérisés par la souche P64 (36 %).

Sous faible salinité (C1), la germination a légèrement diminué pour les grains non bactérisés (78 %), de même que pour les grains bactérisés par la souche CH (77 %). Les graines bactérisées par la souche P64 ont maintenu des valeurs presque similaires à celles des graines non traitées mais immergées dans la solution de NaCl.

Avec la concentration C2 (stress intermédiaire), les grains bactérisés par la souche CH ont obtenu le meilleur taux de germination (80 %), surpassant les grains non bactérisés (témoin, 75 %) et ceux bactérisés par la souche P64 (53 %).

En C3 (stress élevé), les grains non bactérisés et ceux bactérisés par la souche CH conservent des valeurs relativement stables (75 % et 70 % respectivement).

La solution de NaCl C4 (stress très sévère) a engendré une baisse remarquable du taux de germination des grains non bactérisés (59 %). Les grains bactérisés par les souches CH et P64 ont maintenu des valeurs relativement stables malgré la forte salinité par rapport aux grains non bactérisés.

Dans l'ensemble, la germination décroît avec l'augmentation de la salinité pour tous les traitements. Toutefois, les grains bactérisés par la souche CH se distinguent par leur capacité à préserver et voire améliorer la germination sous stress modéré à sévère (C2 à C4). Le témoin reste performant en absence de stress (C0) mais décline progressivement avec l'augmentation de la salinité, tandis que les graines bactérisées par la souche P64 présentent systématiquement les valeurs les plus faibles (bien qu'elles demeurent relativement stables dans les différentes conditions de salinité).

Pour la variété Amar (figure N°14), on constate que, quelle que soit la concentration de la solution de NaCl, les grains bactérisés et non bactérisés conservent globalement des valeurs élevées. En absence de stress salin (C0), les grains témoins enregistrent le taux de germination le plus élevé (96 %), suivis par les grains bactérisés par la souche CH (90 %) et P64 (75 %).

Sous la faible salinité (C1), les valeurs restent stables pour l'ensemble des traitements bactérisés et non bactérisés. À la concentration C2 (stress modéré), les graines témoins conservent le taux

Résultats et discussion

élevé (95 %), ainsi que les grains bactérisés par la souche P64 (72 %), tandis que les grains bactérisés par la souche CH ont montré une réduction de la germination par rapport aux grains traités avec la solution C0 et C1 (87 %).

À l'exception des grains bactérisés par la souche P64, les grains témoins (non bactérisés) et les grains bactérisés par la souche CH ont montré les mêmes valeurs que dans le cas du stress salin à la concentration C2.

À C4 (stress très sévère), les grains témoins ont montré une certaine sensibilité au sel, de même que les grains bactérisés par la souche P64 (69 %). Les grains bactérisés par la souche CH ont montré une tolérance au stress salin (92 %), en milieu très salé.

Dans l'ensemble, l'augmentation de la salinité entraîne une légère baisse du taux de germination des grains de la variété Amar pour l'ensemble des traitements.

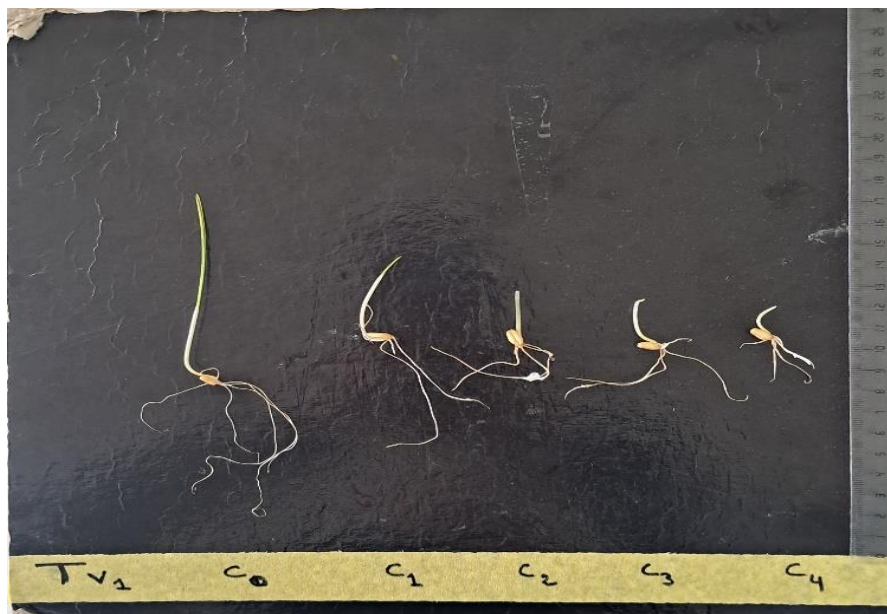


Figure 16: Germination des graines de blé dur variété Vitron, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).

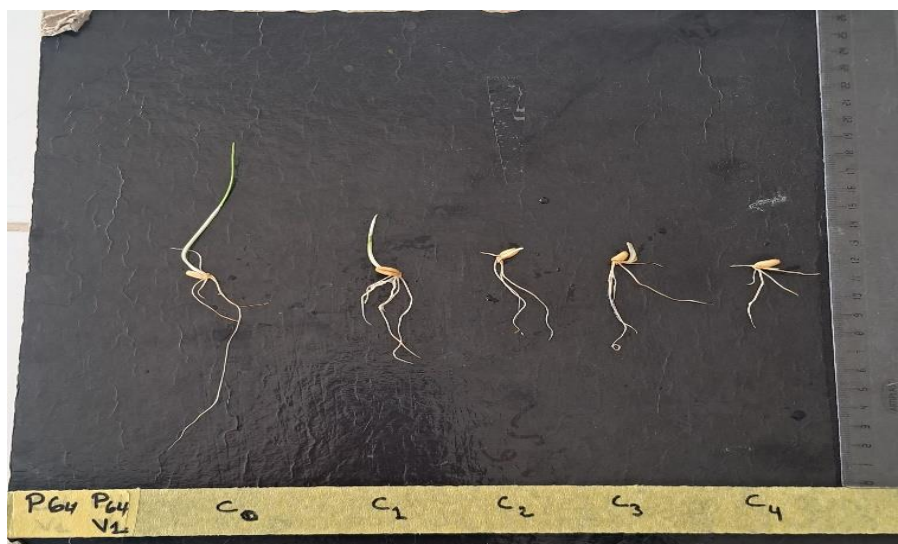


Figure 17: Germination des graines de blé dur variété Vitron, bactérisées par la souche P64, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).



Figure 18: Germination des graines de blé dur variété Vitron, bactérisées par la souche CH, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).



Figure 19: Germination des graines de blé dur variété Amar, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).

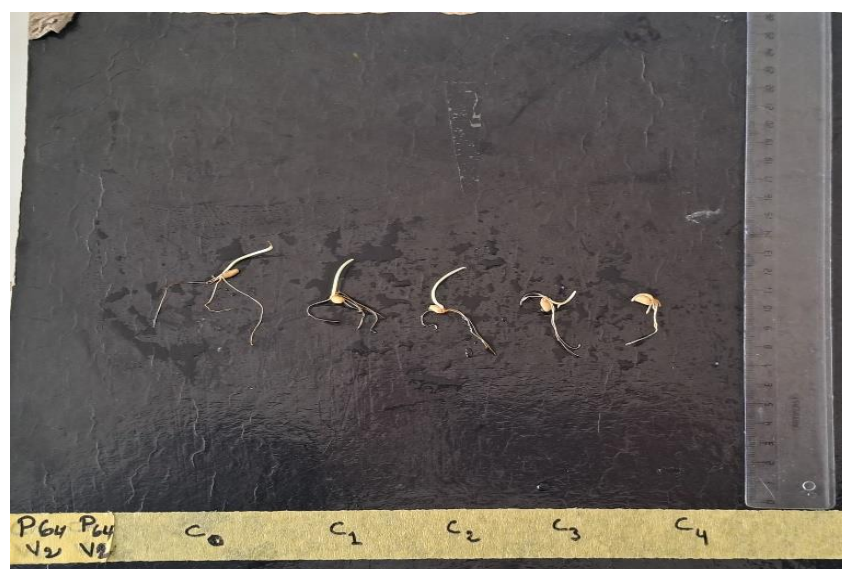


Figure 20: Germination des graines de blé dur variété Amar, bactérisées par la souche P64, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).



Figure 21: Germination des graines de blé dur, variété Amar, bactérisées par la souche CH, sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (témoin).

1.1.2 Index Vigor

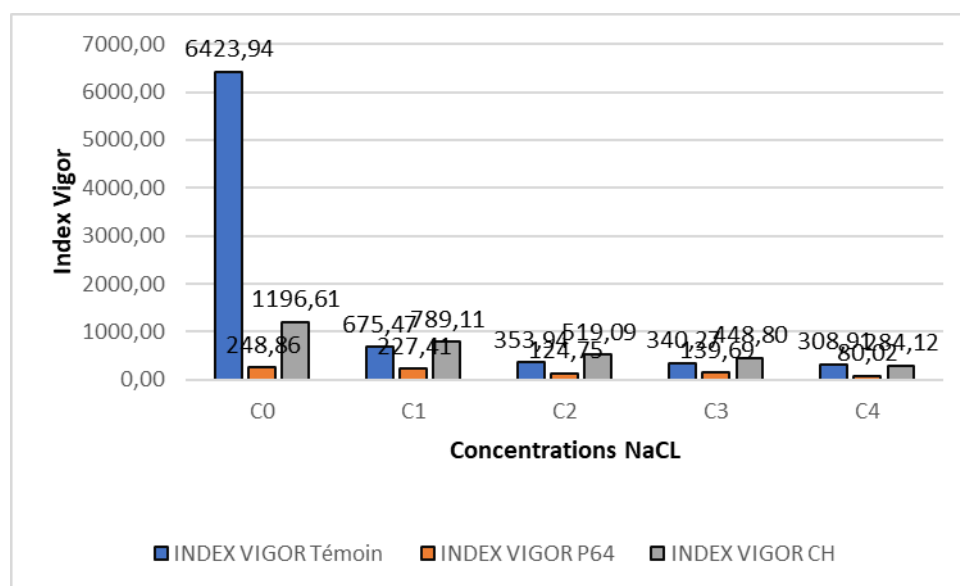


Figure 22 : Effet de la bactérisation sur l'index de vigor des grains de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.

Résultats et discussion

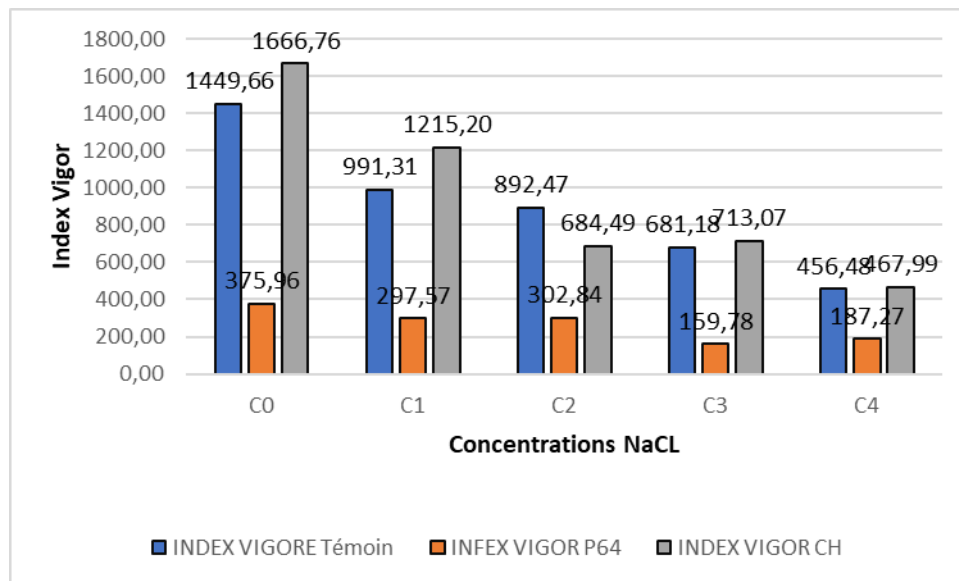


Figure 23 : Effet de la bactérisation sur l'index de vigor des grains de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.

D'après les résultats obtenus dans la figure n°21, nous avons remarqué que la salinité a manifesté un effet néfaste très prononcé sur l'index vigor des graines de la variété Vitron. Nous avons également remarqué qu'il n'y a pas un effet positif de la bactérisation sur l'amélioration de l'index vigor.

Les valeurs maximales (6423,94g) ont été obtenues par les grains non bactérisés en absence de stress salin. Dans ces mêmes conditions, les grains bactérisés par la souche CH et par la souche P64 ont enregistré des valeurs respectivement de (1196,61) et (248,86).

À partir de la concentration (C1), l'index vigor chute drastiquement, particulièrement pour les grains témoins (675,47) et les grains bactérisés par la souche CH (789,11), montrant ainsi qu'une concentration réduite de NaCl suffit à exercer une inhibition marquée.

Aux salinités intermédiaires (C2 et C3), les valeurs de l'index vigor sont presque similaires, la baisse se poursuit pour tous les traitements. Un effet notable de la bactérisation des grains de la variété Vitron par la souche CH est observé, en enregistrant le meilleur index vigor (519,09) par rapport aux grains bactérisés par la souche P64 et les grains témoins.

En condition de salinité maximale (C4), l'indice atteint ses valeurs les plus faibles pour l'ensemble des traitements (témoin : 308,98 ; P64 : 80,02 ; CH : 284,12), confirmant l'impact inhibiteur prononcé du NaCl sur l'index vigor.

Résultats et discussion

En absence de stress salin, aucun gain de vigueur n'est apporté par l'inoculation des grains avec la souche P64 ou CH. Par contre, en condition de salinité modérée (C2, C3), les grains bactérisés par la souche CH sont moins sensibles que les grains témoins et ceux bactérisés par la souche P64.

De même pour la variété Amar, l'effet défavorable du sel est apparent sur l'index vigor. D'après les résultats obtenus (figure n°10), les grains bactérisés sont moins affectés par la salinité que les grains non bactérisés (témoin). La valeur la plus élevée a été obtenue par les grains bactérisés par la souche CH (1666,76), suivie par le témoin. La plus faible valeur a été enregistrée par la souche P64 (375,96).

À faible salinité (C1), la valeur de l'index vigor diminue pour l'ensemble des traitements : témoin (991,31), P64 (297,57) et CH (1215,20), bien qu'un effet inhibiteur du NaCl soit déjà perceptible. Les grains bactérisés par la souche CH conservent des valeurs supérieures à celles du témoin et des grains bactérisés par la souche P64.

Aux niveaux intermédiaires (C2 et C3), la baisse se poursuit. Au niveau de la concentration (C3), les valeurs sont de (159,78) pour P64, (681,18) pour le témoin et (713,07) pour CH, respectivement obtenues par les grains bactérisés par la souche P64, les grains témoins et les grains bactérisés par la souche CH. Cette dernière confirme la meilleure tolérance apparente à la salinité.

En salinité maximale (C4), l'indice atteint ses plus faibles valeurs : témoin (456,48), P64 (187,27) et CH (467,99), montrant un effet inhibiteur marqué, même si les grains bactérisés par la souche CH gardent un léger avantage par rapport aux grains témoins.

Selon la figure n°22, l'inoculation des grains par la souche CH peut contribuer à maintenir ou améliorer la vigueur des plantules de la variété Amar sous stress salin, tandis que P64 présente toujours des valeurs inférieures à celles du témoin quel que soit le niveau de salinité.

1.1.3 Longueur de la racine

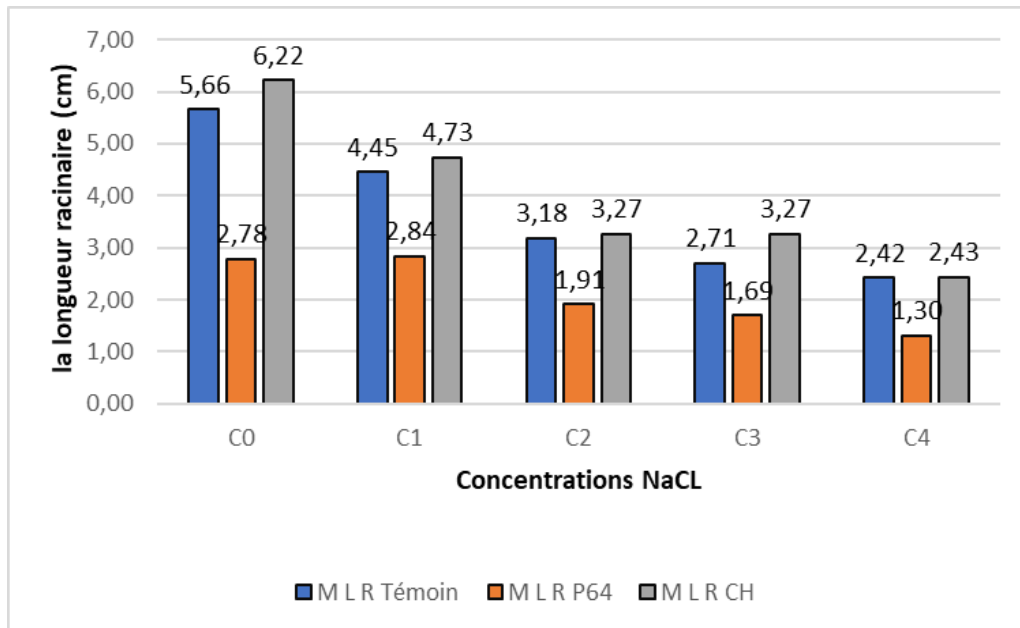


Figure 24: La longueur racinaire de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl .

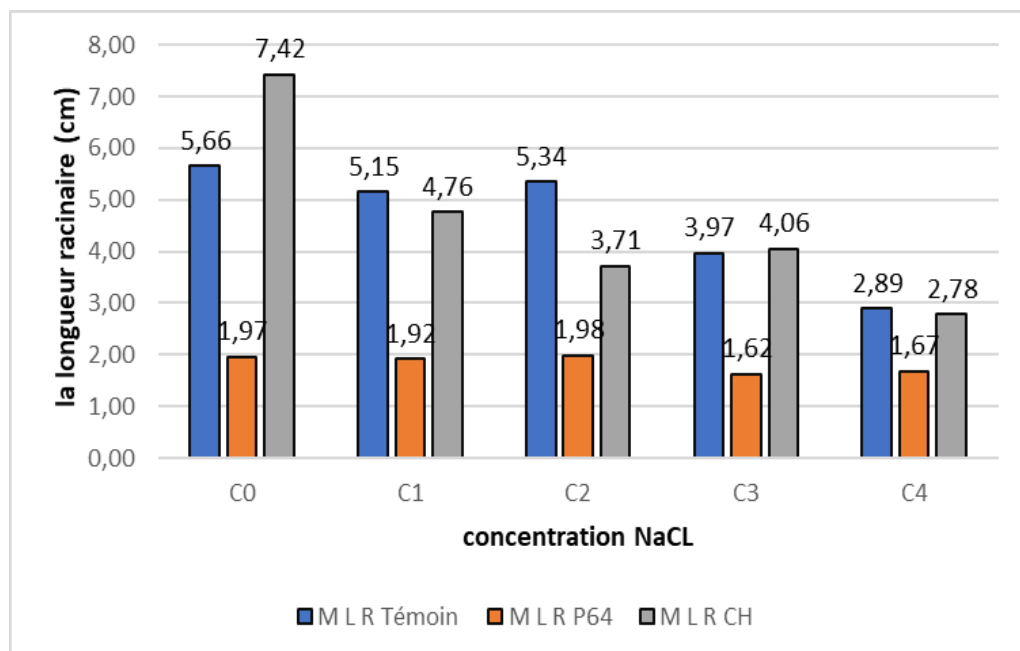


Figure 25: La longueur racinaire de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl .

Résultats et discussion

À travers les résultats obtenus (figure n°23, 24), nous constatons un effet défavorable de la salinité sur la croissance racinaire pour les deux variétés étudiées du blé dur.

Malgré l'effet négatif de la salinité sur la croissance racinaire, les grains bactérisés (particulièrement par la souche CH) ont enregistré des valeurs plus élevées que celles enregistrées avec les grains non bactérisés de la variété Vitron et de la variété Amar.

En absence de stress salin, la meilleure valeur de la longueur racinaire (7,42 cm) a été obtenue par les grains de la variété Amar bactérisés avec la souche CH. Les grains témoins (non stressés et non bactérisés) ont enregistré la même valeur de (5,66 cm) pour les deux variétés étudiées.

L'augmentation de la concentration du NaCl dans le milieu a provoqué une diminution appréciable de la croissance racinaire. Toutefois, à partir de la concentration (C2), nous constatons une réduction très prononcée du développement racinaire.

Les plus faibles valeurs ont été obtenues avec la solution (C4) pour les deux variétés.

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que la variété Vitron semble présenter la plus grande sensibilité au NaCl par comparaison avec la variété Amar.

1.1.4 Hauteur de la plumule

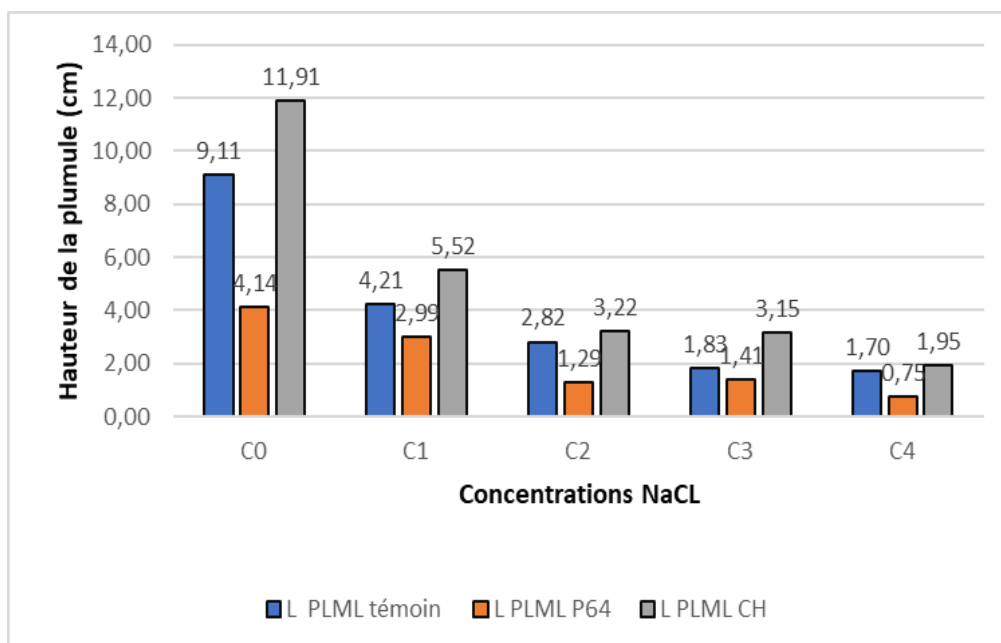


Figure 26: Hauteur de la plumule de blé dur variété Vitron soumise à différentes concentrations croissantes de NaCl.

Résultats et discussion

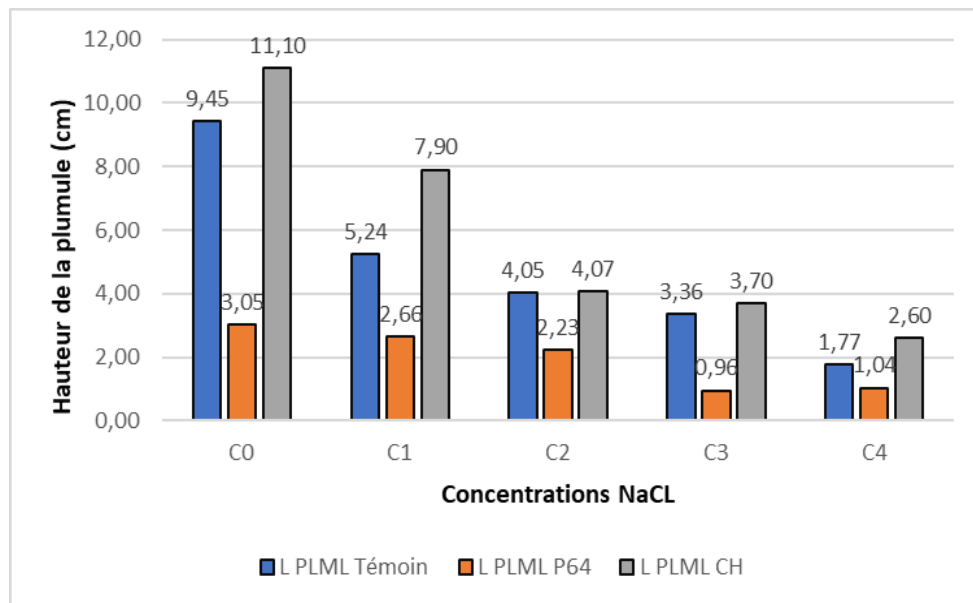


Figure 27: Hauteur de la plumule de blé dur variété Amar soumise à différentes concentrations croissantes de NaCL.

D'après les résultats de notre étude (figure n°25 et 26), l'augmentation de la salinité entraîne une diminution progressive de la longueur de la plumule pour l'ensemble des traitements.

La souche CH se démarque par ses performances supérieures, atteignant la plus grande croissance en conditions optimales (absence du sel) et conservant un net avantage aux niveaux élevés de salinité (C3 et C4), traduisant ainsi une bonne tolérance au stress salin des deux variétés étudiées.

Les longueurs les plus élevées (11,91 et 11,10) ont été obtenues respectivement par les grains de la variété Vitron et Amar bactérisés par la souche CH.

Le témoin, bien qu'affichant une croissance initiale importante, subit une réduction graduelle sous l'effet du sel, se maintenant généralement à un niveau intermédiaire, restant supérieur aux traitements bactérisés par la souche P64 mais inférieur aux grains bactérisés par la souche CH dans la majorité des situations.

Les graines bactérisées par la souche P64, quant à elles, présentent les valeurs les plus faibles à toutes les concentrations, indiquant une croissance limitée et une faible capacité d'adaptation à la salinité.

Sous un stress léger (C1), les valeurs pour la variété Vitron chutent à (4,21 cm), (2,99 cm) et (5,52 cm) respectivement pour les grains témoin et les grains bactérisés par la souche P64 et CH.

Résultats et discussion

Avec une salinité modérée (C2), les longueurs sont de (2,82 cm) pour le témoin, (1,29 cm) pour les grains bactérisés par la souche P64 et (3,22 cm) pour les grains bactérisés par la souche CH, ce dernier demeurant supérieur.

En (C3), la tendance se poursuit avec (1,83 cm), (1,41 cm) et (3,15 cm) respectivement, CH maintenant une valeur nettement plus élevée que le témoin.

Enfin, en stress sévère (C4), les longueurs tombent à (1,70 cm) pour le témoin, (0,75 cm) pour la souche P64 et (1,95 cm) pour la souche CH, ce dernier restant légèrement supérieur au témoin.

Les mêmes résultats ont été enregistrés pour la variété Amar par rapport à la variété Vitron, sauf que les valeurs obtenues par la variété Amar demeurent plus élevées que celles obtenues par la variété Vitron en condition de salinité.

À titre d'exemple, chez la variété Vitron à la (C1), une valeur de (5,52 cm) a été enregistrée par les grains bactérisés par la souche CH et une valeur de (7,90 cm) chez les grains de la variété Amar bactérisés avec la même souche.

Les mêmes constatations ont été obtenues pour le reste des concentrations de NaCl.

En milieu très concentré en sel, les grains de la variété Vitron bactérisés par la souche CH ont enregistré une valeur de (1,95 cm) alors que les grains de la variété Amar ont enregistré une valeur de (2,60 cm), démontrant une meilleure tolérance de cette dernière variété à la salinité.

1.2 Résultats de la biostimulation de la croissance des plants de *Triticum durum*



Figure 28: Croissance de la graine de blé dur variété Vitron, après transplantation.



Figure 29: Croissance de la graine de blé dur variété Vitron, bactériisée par la souche P64, après transplantation.



Figure 30: Croissance de la graine de blé dur variété Vitron, bactériisée par la souche CH, après transplantation.



Figure 31: Croissance de la graine de blé dur variété Amar, après transplantation.



Figure 32: Croissance de la graine de blé dur variété Amar, bactériisée par la souche P64, après transplantation.



Figure 33: Croissance de la graine de blé dur variété Amar, bactériisée par la souche CH, après transplantation.

1.2.1 Poids frais et poids sec de la partie foliaire

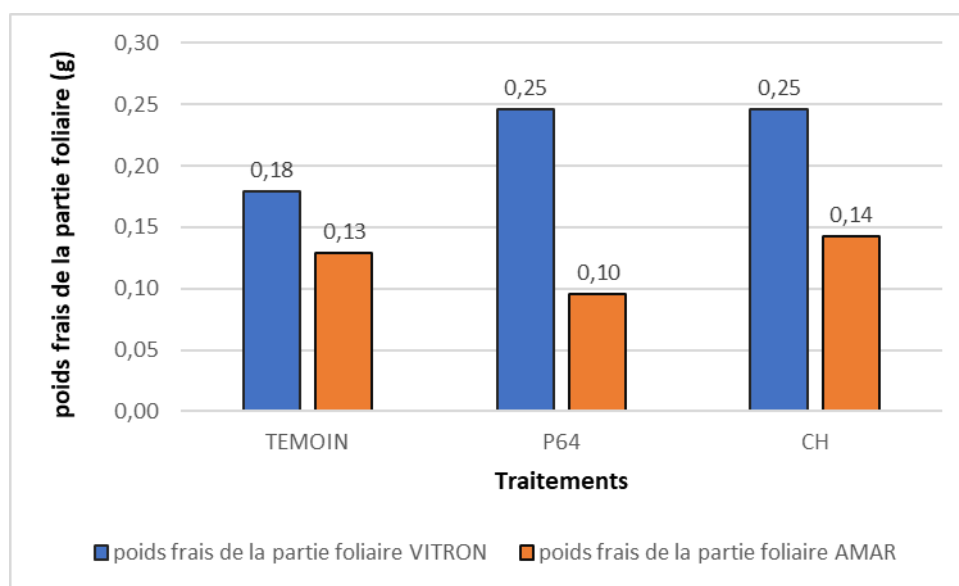


Figure 34: Poids frais de la partie foliaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar).

Résultats et discussion

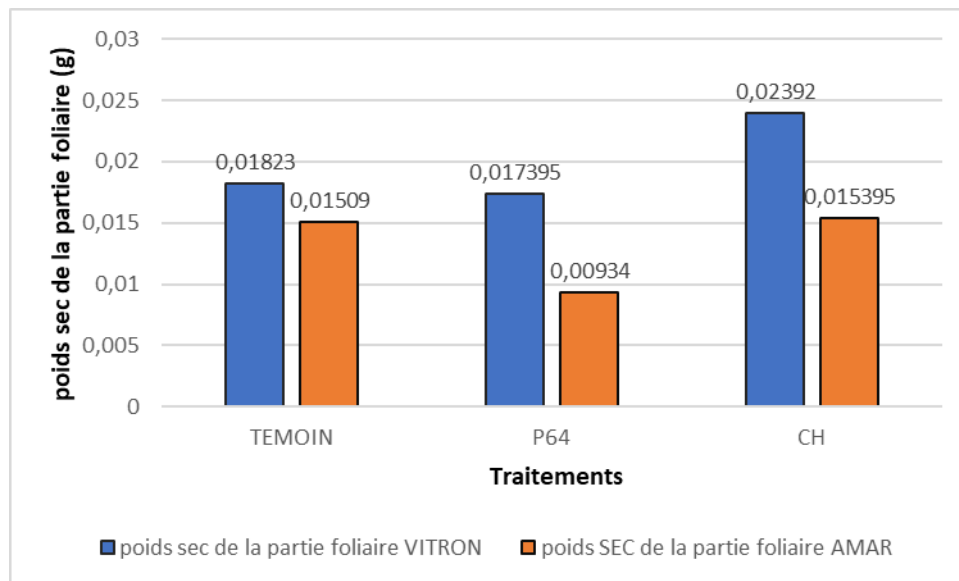


Figure 35: Poids sec de la partie foliaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar).

À travers des résultats obtenus, nous avons remarqué un effet notable de la bactérisation sur l'amélioration de la biomasse aérienne (figure 33). Cet effet bénéfique a été fortement obtenu chez la variété Vitron, en enregistrant la meilleure valeur de (0,25 g) obtenue par les plants bactérisés par la souche CH contre (0,18 g) obtenue par les plants témoins (non bactérisés).

Pour la variété Amar, une légère amélioration de la biomasse foliaire a été obtenue par les plants bactérisés par la souche CH, avec une valeur de (0,13 g).

D'après notre étude, la variété Vitron surpasse nettement Amar dans tous les traitements. L'écart est particulièrement marqué sous la bactérisation par la souche P64 (0,25 g contre 0,10 g) et la souche CH (0,25 g contre 0,14 g), montrant une meilleure capacité de la variété Vitron à exploiter les bénéfices des inoculations bactériennes.

La variété Amar reste plus sensible et moins performante, notamment vis-à-vis de la bactérisation avec la souche P64.

Ces résultats suggèrent que la variété Vitron possède un avantage physiologique ou métabolique lui permettant de mieux valoriser l'apport bactérien, alors qu'Amar montre une réponse plus limitée.

Globalement, la variété Vitron répond positivement et de manière constante aux traitements bactériens, alors qu'Amar affiche une réponse plus variable (voire négative avec la souche P64).

Résultats et discussion

La figure n°34 montre que, chez la variété Vitron, le poids sec foliaire est très similaire entre le témoin (0,01823 g) et les plants bactérisés par la souche P64 (0,017395 g), indiquant que ce dernier n'exerce pas d'effet significatif sur cette variété.

En revanche, les plants bactérisés par la souche CH entraînent une augmentation notable à (0,02392 g), traduisant un impact positif sur l'accumulation de biomasse sèche foliaire.

Chez la variété Amar, le poids sec foliaire est comparable entre les plants témoins (0,01509 g) et les plants bactérisés par la souche CH (0,015395 g), révélant l'absence d'amélioration significative avec cette souche.

En revanche, la bactérisation par la souche P64 entraîne une diminution marquée (0,00934 g), suggérant une sensibilité négative ou un effet inhibiteur de cette souche bactérienne sur la croissance foliaire.

La variété Vitron conserve des valeurs plus élevées que la variété Amar pour tous les traitements (qu'ils soient bactérisés ou non).

La bactérisation par la souche CH présente un gain clair chez la variété Vitron, contrairement à la variété Amar qui reste stable.

La bactérisation par la souche P64 affecte beaucoup plus la variété Amar que la variété Vitron, traduisant une différence de compatibilité variétale aux bactéries testées.

1.2.2 Poids frais et sec de la partie racinaire

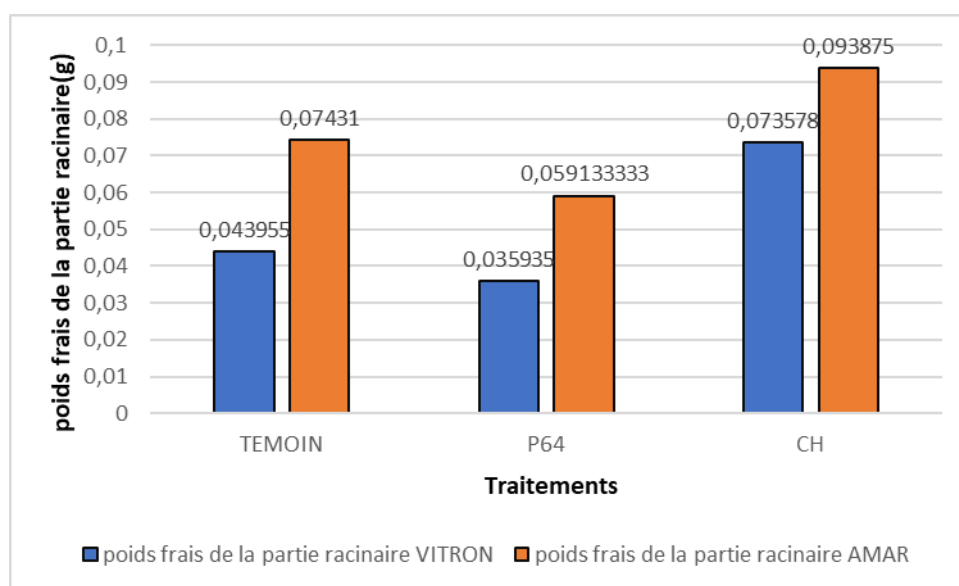


Figure 36: Poids frais de la partie racinaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar).

Résultats et discussion

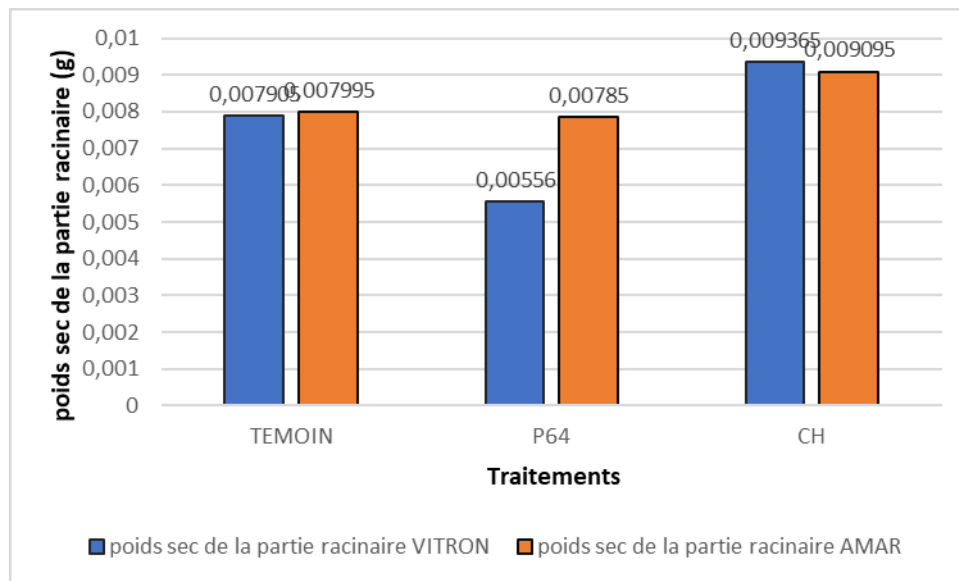


Figure 37: Poids sec de la partie racinaire des deux variétés de blé dur (Vitron et Amar).

D'après la figure n°35, nous remarquons un effet bénéfique de la bactérisation sur le poids frais des racines. Le poids frais le plus élevé a été enregistré avec la souche CH, atteignant (0,073578 g) pour la variété Vitron et (0,093875 g) pour la variété Amar. Cette dernière valeur indique que l'inoculation avec la souche CH entraîne une augmentation notable du poids frais des racines, révélant ainsi un effet positif marqué sur le développement racinaire des plants de la variété Amar.

En revanche, la bactérisation par la souche P64 n'a pas montré d'effet significatif sur le poids frais des racines des deux variétés étudiées.

De manière générale, la variété Amar possède un système racinaire plus développé que celui de la variété Vitron, indépendamment du traitement appliqué. Toutefois, Amar réagit très positivement à l'inoculation avec la souche CH, tandis que la variété Vitron n'enregistre un gain significatif qu'après une bactérisation avec la souche CH.

D'après la figure n°36, la bactérisation a induit un effet très notable sur le poids sec des racines. Cet effet est très appréciable sur les deux variétés bactérisées par la souche CH. Cette dernière a engendré un poids sec des racines de (0,009365 g), nettement supérieur par rapport au témoin (0,00790 g).

La souche P64 a provoqué des résultats presque similaires avec le témoin chez la variété Amar, alors que chez la variété Vitron, nous avons constaté un effet négatif de la souche P64 sur le poids sec (0,00556 g).

Les deux variétés répondent positivement à la bactérisation CH, avec une amélioration par rapport au témoin. La bactérisation avec la souche CH favorise le poids sec racinaire chez les deux variétés, tandis que P64 peut être défavorable, en particulier pour la variété Vitron.

2 Discussions

Les résultats de cette étude confirment que la salinité constitue un facteur limitant majeur pour la germination et la croissance initiale du blé dur, tout en révélant des différences marquées liées à la variété et à l'inoculation bactérienne des deux souches CH et P64 de *Pseudomonas fluorescens*.

Les résultats indiquent que la germination du blé dur est particulièrement sensible à la salinité, comme le rapportent Munns & Tester (2008) et Ashraf & Harris (2013). L'augmentation de la concentration en NaCl dans le sol abaisse le potentiel hydrique, rendant l'eau moins disponible. La graine absorbe moins d'eau, ce qui retarde ou bloque l'activation des enzymes nécessaires à la germination (Ismail, 1990 ; Flowers & Colmer, 2008). Également, les ions Na⁺ et Cl⁻ pénètrent dans les cellules, perturbent l'équilibre ionique, remplacent des nutriments essentiels et endommagent les membranes. Cela bloque la mobilisation des réserves et freine ou empêche la germination (Jacoby, 1994 ; Rejili et al., 2006).

Chez la variété Vitron, la bactérisation par la souche CH a permis de maintenir des taux élevés de germination aux stress modérés à sévères (C2–C4), probablement grâce à la production d'auxines (AIA) et à l'activité ACC (acide aminocyclopropane carboxylique) désaminase réduisant l'éthylène (Glick et al., 2007). La souche P64, en revanche, a montré un effet neutre et parfois négatif.

Chez la variété Amar, les faibles niveaux de salinité ont pu influencé la germination, mais la souche CH a nettement amélioré les performances à partir de C2, possiblement par stimulation de la production d'osmoprotecteurs (proline, glycine bétaïne) stabilisant les membranes et maintenant l'hydratation (Bohnert & Shen, 1999 ; Egamberdieva et al., 2017).

La salinité diminue la croissance des tiges, le nombre de feuilles et la biomasse totale (Mohammad et al., 1998 ; Wang & Nil, 2000). Chez la variété Vitron, la vigueur est restée supérieure dans les grains non bactérisés, et cela est probablement dû à une forte teneur initiale en sucres solubles (Kirouani et al., 2019) favorisant une tolérance naturelle.

Chez la variété Amar, la souche CH a significativement stimulé la vigueur sous stress, possiblement via l'induction de résistance systémique (ISR) (Pieterse et al., 2014) et la

Résultats et discussion

régulation hormonale, renforçant la protection antioxydante et la stabilité photosynthétique (Ashraf & Harris, 2004).

En outre, la salinité entraîne une réduction marquée de la longueur des racines et des pousses, limitant ainsi l'absorption d'eau et de nutriments (Munns et al., 2020). Cette inhibition est accentuée par le stress hormonal lié à l'accumulation d'acide abscissique (Munns & Termaat, 1986) et par les contraintes osmotiques et ioniques (Munns & Tester, 2008).

Cependant, la souche CH a exercé un effet protecteur notable, particulièrement sur le système racinaire de la variété Amar, probablement en stimulant le développement de racines latérales (Vacheron et al., 2013). Chez la variété Vitron, CH améliore de manière constante la biomasse foliaire et racinaire (fraîche et sèche), tandis que chez Amar, elle stimule surtout la biomasse racinaire, avec un effet plus limité sur la partie aérienne.

À l'inverse, la souche P64 n'apporte aucun bénéfice significatif et réduit parfois fortement la croissance. Ceci peut être expliqué par l'efficacité des inoculations bactériennes, dépendant étroitement de la compatibilité souche × variété. et de l'interaction entre les microorganismes de la rhizosphère .

La bactérisation a également permis une meilleure résistance de la plumule, possiblement grâce à la réduction des espèces réactives de l'oxygène (ROS) via l'activation d'enzymes antioxydantes telles que la catalase, la peroxydase et la superoxyde dismutase (Bharti et al., 2016). Cet effet protecteur, observé pour les deux variétés et plus prononcé aux fortes salinités, pourrait être lié à une meilleure absorption des nutriments et à une diminution du stress oxydatif (Kumar et al., 2020).

La souche CH a stimulé la biomasse foliaire fraîche, particulièrement en conditions de stress modéré à sévère, ce qui corrobore les observations d'études antérieures montrant le rôle des PGPR dans le maintien de la photosynthèse et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Egamberdieva et al., 2017).

L'inoculation de la souche CH a significativement augmenté le poids sec racinaire des deux variétés, ce qui suggère une meilleure intégrité membranaire et une limitation des pertes hydriques sous stress salin (Vurukonda et al., 2016 ; Kumar et al., 2020).

D'après les résultats obtenus au cours de notre expérimentation, nous avons remarqué que les souches bactériennes ont un effet remarquable sur tous les paramètres de croissance étudiés. Cette phytostimulation peut être attribuée à plusieurs mécanismes exercés par les souches de *Pseudomonas* spp. fluorescents.

Résultats et discussion

Les *Pseudomonas* spp. fluorescents sont très impliqués dans la biostimulation des plantes, en améliorant la nutrition minérale de ces dernières, en colonisant la rhizosphère, en produisant des phytohormones et en protégeant les végétaux contre les maladies. En effet, leurs propriétés d'augmentation de la disponibilité de différents nutriments vitaux : le phosphore, le fer et l'azote dans la rhizosphère, reposent sur leur capacité à solubiliser les composés minéraux insolubles et à fixer l'azote atmosphérique. Les *Pseudomonas* spp. fluorescents solubilisent le phosphore principalement grâce à l'excrétion d'acides organiques qui permettent la libération du phosphore fixé dans le sol et donc son incorporation par les racines, ce qui améliore les conditions de nutrition minérales et de croissance des plantes (Kloepper & Schroth, 1978; Lifshitz et al., 1987; Beneduzi et al., 2012). D'autre part, grâce à la production de sidérophores, les *Pseudomonas* spp. fluorescents chélatent le fer, un élément physiologique vital pour le développement de la plante, mais qui devient par ce biais difficilement accessible pour les agents pathogènes, et participe à la fois aux conditions de nutrition et de protection des végétaux (Neilands, 1995; Khan et al., 2009; Cornelis & Dingemans, 2013).

Également, l'efficacité des *Pseudomonas* spp. fluorescents dans la compétition pour l'espace au niveau racinaire est illustrée par leur capacité à coloniser rapidement et durablement la rhizosphère, mettant ainsi en place des biofilms qui leur permettent de s'ancrer. Cette forte colonisation leur permet de s'implanter dans la zone racinaire au détriment de leurs rivaux limitant ainsi l'installation d'agents pathogènes et les risques infectieux consécutifs. Sa capacité à produire des antibiotiques naturels et des enzymes hydrolytiques contribue à la suppression de microbes néfastes pour les plantes et participe indirectement à leur bien-être. Cette compétition spatiale et métabolique se constitue comme une grande défense biologique dans l'écosystème rhizosphérique (Scher & Baker, 1982 ; Haas & Defago, 2005 ; Beneduzi et al., 2012).

En outre, les *Pseudomonas* spp. fluorescents sont capables de stimuler les activités de croissance végétale via la sécrétion de phytohormones de type indole-3-acétique (AIA), les auxines, qui joue un rôle central dans plusieurs processus végétatifs clés, incluant la division cellulaire, l'élongation du système racinaire et la formation des racines latérales. Par conséquent, cette régulation hormonale génère un système racinaire plus développé et opérationnel pour extraire les nutriments utiles, particulièrement en conditions de stress environnemental (Gutierrez-Manero et al., 2001 ; Weyens et al., 2009 ; Ricci et al., 2019). Par ailleurs, leur capacité à maintenir des concentrations d'éthylène faibles grâce à l'activité de l'enzyme ACC désaminase génère une réduction des impacts néfastes du stress sur la croissance

Résultats et discussion

racinaire, contribuant à sa part dans la meilleure adaptation au stress abiotique (Glick et *al.*, 1999 ; Pieterse et *al.*, 2014).

Enfin, du point de vue du biocontrôle, ces rhizobactéries produisent des antibiotiques et des enzymes variés qui inhibent le développement des pathogènes fongiques et bactériens dans la rhizosphère. Parmi ces métabolites on considère le 2,4-diacétylphloroglucinol, les phénazines et les chitinases, des enzymes qui dégradent la paroi cellulaire des champignons pathogènes. D'autre part, *Pseudomonas* spp. fluorescents induit une résistance systémique chez la plante, favorisant ainsi le renforcement de la défense des végétaux contre les agressions biotiques ou abiotiques, entre autres à travers une modulation des voies de signalisation hormonale. Ce mécanisme d'immunité acquise du végétal confère une protection durable ainsi une agriculture durable respectueuse de l'environnement (van Loon et *al.*, 1998 ; Shanmugaiah et *al.*, 2008 ; Pieterse et *al.*, 2014).

Ainsi, l'ensemble de ces mécanismes permet de mettre en évidence que les *Pseudomonas* spp. fluorescents représentent un réel atout dans les stratégies de biostimulation destinées à améliorer la croissance, la nutrition et des cultures de blé dur (*Triticum durum*), aussi bien en conditions de stress, telles que la forte salinité. Leur incorporation dans les pratiques agronomiques constitue un moyen prometteur d'optimiser la production végétale afin de réduire l'apport d'intrants chimiques (Kloepper & Schroth, 1978 ; Pieterse et *al.*, 2014).

Conclusion générale

Conclusion générale

Les résultats obtenus confirment les effets délétères majeurs du stress salin sur le taux de germination, l'index vigor, la croissance racinaire et foliaire, ainsi que sur la biomasse fraîche et sèche. Ces impacts négatifs sont liés aux stress osmotique, ionique, nutritionnel et oxydatif induits par l'excès de NaCl, provoquant une réduction de la turgescence cellulaire, des déséquilibres ioniques et une accumulation toxique d'espèces réactives de l'oxygène. La variété Amar a montré une tolérance supérieure au stress par rapport à la variété Vitron, ce qui souligne l'importance de la sélection variétale face aux conditions pédoclimatiques difficiles.

Par ailleurs, l'inoculation des graines par les souches CH et P64 de *Pseudomonas fluorescents* a révélé des effets positifs notables, notamment avec la souche CH qui a permis une meilleure conservation et même une amélioration de la germination sous stress modéré à sévère. Cette souche a favorisé la croissance des racines, des parties aériennes et elle a augmenté la biomasse contribuant ainsi à une meilleure exploitation du sol. Ces bienfaits sont dus aux multiples mécanismes d'action des PGPR tels que la production d'hormones de croissance comme l'acide indole acétique, modulation des réponses antioxydantes. La souche P64 a montré une tolérance moindre et des effets variables selon la variété, ce qui traduit une certaine spécificité de l'interaction plante-microorganisme.

Les mécanismes physiologiques impliqués dans la tolérance au stress salin par ces bactéries incluent l'accumulation de solutés compatibles (glycine bétaine, proline), l'osmorgulation ionique, la modulation de la perméabilité membranaire pour limiter la perte d'eau cellulaire, ainsi que la détoxification des espèces réactives de l'oxygène grâce à des systèmes enzymatiques antioxydants. Ces stratégies permettent aux souches fluorescentes de survivre et de soutenir les plantes dans un environnement stressé, contribuant à une meilleure résilience des cultures.

En somme, cette étude démontre clairement le potentiel prometteur des souches de *Pseudomonas fluorescents* comme bio-inoculants pour améliorer la performance de variétés de blé dur sous stress salin, offrant une alternative écologique et efficace aux intrants chimiques. Leur utilisation pourrait ainsi contribuer à renforcer la durabilité des systèmes agricoles dans les zones arides et semi-arides particulièrement menacées par l'augmentation de la salinité des sols. D'après les résultats de notre travail nous avons constaté que les souches bactériennes ont

Conclusion générale

un effet positif non seulement sur les paramètres de germination mais également sur les paramètres de la croissance au stade plantule.

Pour approfondir ces travaux, il serait pertinent de réaliser des essais en conditions de terrain, afin de confirmer l'efficacité des souches bactériennes dans des environnements plus variables et complexes. De plus, l'investigation de souches supplémentaires, la combinaison avec d'autres biofertilisants ou amendements organiques, ainsi que l'étude fine des interactions moléculaires et physiologiques entre plantes et bactéries, permettraient d'optimiser ces biotechnologies. Par ailleurs, la sélection variétale couplée à ces bio-inoculants ouvrirait la voie à des stratégies intégrées efficaces pour la production durable du blé dur face aux défis climatiques actuels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

Aher, N., Belkadi, B., & Abid, M. (2018). Effets des pratiques culturales sur la qualité du blé dur en Algérie. *Revue d'Agronomie Méditerranéenne*, 53(1), 41-56.

Ahmad, F., Khan, M. S., & Ahanger, M. A. (2008). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their role in sustainable agriculture. *Journal of Agricultural Science*, 10(2), 125-140.

Ait Kaki, A. (2007). Les pratiques culturales du blé dur en Algérie. *Revue Algérienne d'Agriculture*, 8(1), 15-23.

Alström, S. (1991). Interaction between *Pseudomonas fluorescens* and plants: Stimulating seed germination and seedling growth. *Microbial Ecology*, 21(3), 227-237. <https://doi.org/10.1007/BF02539156>

ARVALIS-Institut du végétal. (2012). *Variétés de blé dur : Région Provence-Languedoc, variétés et traitements d'automne des céréales*. ARVALIS - Institut du végétal.

Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2004). Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*, 166(1), 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.024>

Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2013). Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163–190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>

Ashraf, M., Hasnain, S., & Berge, O. (2004). Inoculating wheat seedlings with exopolysaccharide-producing bacteria restricts sodium uptake and stimulates plant growth under salt stress. *Biology and Fertility of Soils*, 40(2), 157-162.

Ayadi-Bounegab, I. (2020). Effets du stress osmotique sur les plantes cultivées. *Revue Scientifique*, 15(4), 67-80.

Avni, R., Nave, M., Barad, O., Baruch, K., Twardziok, S. O., Gundlach, H., & Distelfeld, A. (2017). Wild emmer genome architecture and diversity elucidate wheat evolution and domestication. *Science*, 357(6346), 93-97. <https://doi.org/10.1126/science.aan0032>

B

Bakker, P. A. H. M., Pieterse, C. M. J., & Berendsen, R. L. (2013). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478-486.

Banque d'Algérie. (2023). *Rapport économique annuel*.

Barron, C., Surget, A., & Rouau, X. (2007). Relative amounts of tissues in mature wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition. *Journal of Cereal Science*, 45(1), 88-96.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.07.004>(<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.07.004>)

Benbelkacem, A., & Kellou, M. (2001). Coûts de production et mécanisation en agriculture algérienne. *Cahiers d'Agronomie*, 12(3), 45-52.

Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35(4), 1044-1051.

Ben Hassine, A., & Lutts, S. (2010). Accumulation of glycine betaine confers tolerance to salt stress in halophytes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(2-3), 229-235.

Benmoussa, M., Haddad, M., & Djenane, D. (2023). Adaptation des variétés locales de blé dur à la sécheresse en Algérie. *Journal of Arid Environments*, 185, 104530.

Bentrad, S. (2016). Osmoprotecteurs et adaptation des plantes au stress abiotiques. *Revue de Biotechnologie*, 22(2), 75-83.

Bharti, N., Pandey, S. S., Barnawal, D., Patel, V. K., & Kalra, A. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria *Dietzia natronolimnaea* modulates the expression of stress-responsive genes providing protection of wheat from salinity stress. *Scientific Reports*, 6, 34768.
<https://doi.org/10.1038/srep34768>

Biskri, A. (2023). Evaluation agronomique de la variété Vitron en zones semi-arides. *Bulletin de la Recherche Agricole Algérienne*, 18(2), 120-130.

Bohnert, H. J., & Shen, B. (1999). Transformation of plants to confer tolerance to salt and osmotic stress. *Plant Physiology*, 123(3), 723-729.

Bonjean, A. P., & Picard, F. (1990). Durum wheat: botany and breeding. In *Durum Wheat* (pp. 1-36). Springer.

Bonjean, A. P., Angus, W. J., & Van Ginkel, M. (2016). *Durum Wheat: Production, Processing and Pasta Quality*. Woodhead Publishing.

Boukachabia, N. (1993). Effets de la salinité sur la croissance des plantes. *Annales Agronomiques*, 23(1), 10-15.

Bozzini, A. (1988). Les caractéristiques morphologiques des céréales à paille. *Agronomie*, 8(1), 33-45.

Brouillet, L., Coursol, F., & Hamilton, M. (2006). *Flora of North America North of Mexico* (Vol. 24). Oxford University Press.

Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2000). *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists.

C

Chenafi, A., & Hartani, T. (2022). Variabilité des rendements du blé dur dans les Hauts Plateaux algériens. *Cereal Research Communications*, 50(1), 150-160.

Chourgehal, I., & Hartani, T. (2020).

Clarke, F. R., Knox, R. E., Singh, A. K., & Kalischuk, M. J. (2002). Root morphology of wheat cultivars. *Crop Science*, 42(4), 1011-1016.

Clément, C., & Prat, D. (1970). Morphologie des racines chez le blé dur. *Annales de Physiologie Végétale*, 12(2), 85-94.

Colmer, T., Flowers, T., & Munns, R. (1995). Use of wild relatives to improve salt tolerance in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 46(3), 370-381.

Colledge, S., Conolly, J., & Shennan, S. (2004). Human Responses to Climatic Change in the Prehistoric Eastern Mediterranean. *Antiquity*, 78(301), 1043-1049.

Cornelis, P., & Dingemans, J. (2013). *Pseudomonas* siderophores: structures, functions, biosynthesis, regulations, and role in pathogenicity. *Microbiology Spectrum*, 1(1).

Coda, R., Melama, L., & Menga, V. (2015). Wheat quality for pasta and couscous production in the Mediterranean basin. *Foods*, 4(4), 471-487.

Cutter, E. G. (2021). Water Relations and Leaf Anatomy. In *Plant Anatomy*. Edward Arnold.

Csonka, L. N. (1989). Physiological and genetic responses of bacteria to osmotic stress. *Microbiological Reviews*, 53(1), 121–147. <https://doi.org/10.1128/mr.53.1.121-147>

D

Diaw, D., Fall-Ndiaye, M. A., Ali, O. Y., & Sare, I. C. (2018). Effet de la salinité sur la densité des isolats de *Pseudomonas* spp. fluorescents de rhizosphère de plants de tomate, d'aubergine et d'oignon au Sénégal. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(4), 1914.

Digat, B. (1994). Effects of fluorescent pseudomonads on seed germination. *Plant and Soil*, 158(2), 229-234.

Doan Trung Luu. (2020, 17 septembre). Comment les plantes supportent-elles un régime salé ? *Encyclopédie de l'Environnement*. <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/comment-plantes-supportent-regime-sale/>

Dubcovsky, J., & Dvorak, J. (2007). Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication. *Science*, 316(5833), 1862-1866.

Dupont, F. M., & Guignard, C. (2012). Morphology and physiology of durum wheat. In *Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region* (pp. 11-34). Springer.

E

Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Shurigin, V., & Hashem, A. (2017). Plant-associated bacteria ameliorate abiotic stress in crop plants: mechanisms and applications. *Frontiers in Plant Science*, 8, 161.

Encyclopédie de l'environnement. (2020). *Comment les plantes supportent un régime salé?*

F

Fairbairn, A. S., Peake, C. E., & Villarosa-Chapman, E. (2005). Early foods and diets in ancient Egypt. *Journal of Archaeological Science*, 32(10), 1587-1596.

Fathalli, A., & Bizid, E. (1986). Effets de la salinité sur la morphogenèse racinaire du blé. *Annales Agronomiques*, 10(2), 67-74.

Feillet, P. (2000). *Les céréales: Morphologie, physiologie et production*. Institut National de la Recherche Agronomique.

Feldman, M., & Levy, A. A. (2015). Allopolyploidy - a shaping force in the evolution of wheat genomes. *Cytogenetic and Genome Research*, 142(2-3), 571-584.

Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179(4), 945–963.

G

Garcia, V., Latour, X., & Andreu, J. (2003). Sidrophores and Pseudomonas fluorescence in biocontrol of pathogens. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63(3), 384-389.

GIE Blé Dur. (2023). *Rapport annuel sur la production et le commerce du blé dur*.

Glick, B. R., Cheng, Z., Czarny, J., & Duan, J. (2007). Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(5–6), 227–242.

Glick, B. R., Patten, C. L., Holguín, G., & Penrose, D. M. (1999). *Biochemical and genetic mechanisms used by plant growth-promoting bacteria*. Imperial College Press.

Godon, J. J., Nazaret, S., & Cameleyre, X. (1991). Morphologie du grain de blé dur. *Cereal Chemistry*, 68(5), 541-549.

Gorham, J., Campbell, B., & Buchanan, B. B. (1990). Salinity effects on crop productivity. *Plant Physiology*, 43(5), 817-821.

Gregory, P. J., George, T. S., & Hallett, P. D. (2021). Stomatal density variation in wheat under drought stress. *Field Crops Research*, 263, 108074.

Gutierrez-Manero, F. J., Ramos-Solano, B., Probanza, A., & Mehouchi, J. (2001). Auxin production by *Pseudomonas fluorescens* and stimulation of plant growth. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(3), 315-320.

H

Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology*, 3(4), 307-319.

Haudry, A., Plomion, C., & Kremer, A. (2007). Diversité génétique chez le blé dur et ses implications. *Genetics Selection Evolution*, 39(5), 621-634.

Hemery, Y., Jacquet, F., & Bonnet, J. (2007). Anatomie du grain et propriétés du blé dur. *Cereal Chemistry*, 84(3), 252-259.

Himi, E., Slaoui, A., & Loukil, S. (2021). Endosperm vitreux du blé dur: caractéristiques et impacts. *Journal of Cereal Science*, 96, 103156.

Hofte, M., De Vleeschauwer, D., & Laubach, U. (1991). Rhizobacteria and seedling enhancement effects. *Plant and Soil*, 135(2), 229-236.

Huang, S., Sirikhachornkit, A., Su, X., Faris, J. D., Gill, B. S., Haselkorn, R., & Gornicki, P. (2002). Genes encoding plastid acetyl-CoA carboxylase and 3-phosphoglycerate kinase in wheat. *Genetics*, 160(4), 1631-1644.

I

Ishikawa, G., Sakamoto, S., Murai, K., & Tsunewaki, K. (2013). Molecular markers controlling grain size in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 126(7), 2115-2128.

Ismail, A. M. A. (1990). Vegetation composition of a maritime salt marsh in Qatar in relation to edaphic features. *Journal of Vegetation Science*, 1, 85–88.

Ismail, A. M. (2003). Physiological traits associated with salt tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and Soil*, 235(2), 155-161.

J

Jacoby, B. (1994). Effects of mineral nutrition on salt stress. *Agronomy Journal*, 86(3), 451-455.

K

Kefu, C., Xue-Xian, L., & Bo, Z. (1991). Effects of abscisic acid on salt stress in wheat seedlings. *Acta Agronomica Sinica*, 17(3), 204-210.

Kellogg, E. A. (2020). *Flowering Plants. Monocots: Systematics and Evolution*. Springer.

Kent, N. L., & Evers, A. D. (1994). *Technology of Cereals: An Introduction for Students of Food Science and Agriculture*. Elsevier.

Khan, M. S., Zaidi, A., & Javed, M. (2009). *Microbial strategies for crop improvement*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01979-1>

Kirouani, A., Belaid, K., & Bensaid, S. (2019). Adaptation des variétés de blé dur en Algérie face au stress hydrique. *Revue d'Agronomie Méditerranéenne*, 49(1), 23-36.

Kloepper, J. W., & Schroth, M. N. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. In *Proceedings of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria* (Vol. 2, pp. 879-882).

Köhl, J., Kolnaar, R., & Ravensberg, W. J. (2019). Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: Relevance beyond efficacy. *Frontiers in Plant Science*, 10, 845. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845>

Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., & Srivastava, R. (2020). Plant growth-promoting bacteria: Biological tools for the mitigation of salinity stress in plants. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1216. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01216>

L

Lafiandra, D., Riccardi, G., & Sissons, M. (2014). Improving the nutritional and functional properties of durum wheat for pasta and couscous production. *Food Research International*, 65, 23-33.

Larbaoui-Dahoumane, A., & Benchabane, M. (2023). Effet des souches de *Pseudomonas* spp. fluorescents sur la germination in vitro de la graine. *Agrobiologia*, 13(1), 3373–3383.

Larguet, C. (1998). *Les osmoprotecteurs chez les végétaux*. Éditions Quae.

Lemanceau, P. (1992). Stimulation de la nodulation par les bactéries rhizosphériques. *Biologie et Pathologie Végétales*, 2, 35-42.

Les Céréales. (2023). Protéines et caroténoïdes dans le blé dur. *Bulletin de la Nutrition Céréalière*, 29, (5), 12-15.

Levy, A., Conway, J. M., Dangl, J. L., & Woyke, T. (2018). Elucidating bacterial gene functions in the plant microbiome. *Cell Host & Microbe*, 24(4), 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2018.09.005>

Lifshitz, R., Kloepper, J. W., Kozlowski, M., & Zaleska, I. (1987). Growth promotion of canola (rapeseed) seedlings by a strain of *Pseudomonas putida* under gnotobiotic conditions. *Canadian Journal of Microbiology*, 33(5), 390–395. <https://doi.org/10.1139/m87-068>

M

Mahfoud, F., & Lasbahani, H. (2015).

Marcussen, T., Sandve, S. R., Heier, L., Spannagl, M., Pfeifer, M., Jakobsen, K. S., ... & Wulff, B. B. (2014). Ancient hybridizations among the ancestral genomes of bread wheat. *Science*, 345 (6194), 1250092.

Martínez-Moreno, F., Ammar, K., & Solís, I. (2022). Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date: A historical review. *Agronomy*, 12(5), 1135. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051135>

Mavrodi, D. V., Bonsall, R. F., Delaney, S. F., Soule, M. J., Phillips, G., & Thomashow, L. S. (2006). Role of phenazine antibiotics. *Microbiology*, *152*, 3507-3518.

Mekhlouf, H., Bensaadi-Djelloul, A., & Benkahla, A. (2006). Impact des vagues de chaleur sur la fertilité des grains de blé dur en Algérie. *Agrochimica*, *50*(1), 22-29.

Ministère de l'Agriculture, Algérie. (2023). *Rapport annuel sur la recherche agricole*.

Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. (2021). *Plan national d'autosuffisance en céréales 2021–2025*. Alger, Algérie.

Mohammad, A., Bajji, M., & Lutts, S. (1998). Salt tolerance in wheat seedlings. *Plant and Soil*, *201*(1), 95-103.

Munns, R. (1993). Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell & Environment*, *16*(1), 15-24.

Munns, R., James, R. A., Xu, B., Athman, A., Conn, S. J., Jordans, C., ... (2020). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, *71*(12), 3403–3418.

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, *59*, 651-681.

Munns, R., & Termaat, A. (1986). Whole-plant response to salinity. *Australian Journal of Plant Physiology*, *13*(1), 143-160.

N

Naik, G. R., Chandrasekar, R., & Dinesh, R. (2008). Phosphate solubilization by soil bacteria. *Indian Journal of Microbiology*, *48*(2), 215-220.

Neilands, J. B. (1995). Siderophores: structure and function of microbial iron transport compounds. *Journal of Biological Chemistry*, *270*(45), 26723–26726.

O

Olmedo, G. (1995). Morphological differences between durum and bread wheat. *Journal of Cereal Science*, 22(2), 123-130.

ONFA. (2017). *Rapport national sur la production céréalière*.

Ongena, M., Jacques, P., & Toure, Y. (2002). Role of siderophores in immunomodulation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 60(4), 403-410.

P

Palleroni, N. J. (2005). The Pseudomonas story. *Environmental Microbiology*, 7(12), 1686-1688.

Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349.

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.

Peng, Y., Chen, L., & Zhang, H. (2022). Silica accumulation and its role in drought resistance of cereals. *Journal of Plant Physiology*, 259, 153410.

Perez-Montano, F., Alías-Villegas, C., Bellogín, R. A., del Cerro, P., Espuny, M. R., Jiménez-Guerrero, I., & Ollero, F. J. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous plants: Rhizobacteria role. *Microbiological Research*, 169(1), 325-336.

Perrin, R. M., Clark, G. S., Van Volkenburgh, E., & Cleland, R. E. (1984). Effects of salinity on plant growth. *Plant Physiology*, 74(3), 498-501.

R

Rejili, M., Karlidag, H., Bouzid, S., & Ozturk, L. (2006). Effects of salinity on seed germination enzymes in durum wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 29(3), 485-503.

Rhodes, D., & Hanson, A. D. (1993). Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 44, 357-384.

Ricci, J., Fiorini, M., & Rizzi, L. (2019). Production of auxins by PGPR and effects on wheat growth. *Agronomy Research*, 17(1), 254-263.

S

Sauvage, L. (2024, 26 novembre). Les prix du blé dur pourraient ne pas bouger jusqu'à la fin de la campagne. *Terre-net*. <https://www.terre-net.fr/prix-des-cereales/article/874924/les-prix-du-ble-dur-pourraient-ne-pas-bouger-jusqu-a-la-fin-de-la-campagne>

Saum, S. H., & Müller, V. (2007). Adaptation of membrane permeability in bacteria under stress. *Journal of Bacteriology*, 189(6), 2113-2120.

Shanmugaiah, V., Jebaraj, C. R., & Samiyappan, R. (2008). Biocontrol potential of *Pseudomonas fluorescens* producing protease and chitinase. *Biocontrol Science and Technology*, 18(1), 55-69.

Scales, B. S., Dickson, R. P., LiPuma, J. J., & Huffnagle, G. B. (2014). Microbiology, genomics, and clinical significance of the *Pseudomonas fluorescens* species complex, an unappreciated colonizer of humans. *Clinical Microbiology Reviews*, 27(4), 927-948. <https://doi.org/10.1128/CMR.00044-14>

Scher, F. M., & Baker, K. F. (1982). Effect of *Pseudomonas putida* on root development of certain host plant species. *Phytopathology*, 72, 914-919.

Simon, M., Bervas, E., & Morot-Gaudry, J. F. (1989). Morphological features of durum wheat ears. *Cereal Science Today*, 34(2), 87-93.

Sleator, R. D., & Hill, C. (2001). Bacterial osmoadaptation: the role of osmoprotectants. *FEMS Microbiology Letters*, 224(1), 1-7.

Surget, A., & Barron, C. (2005). Grain morphology of durum wheat. *Journal of Cereal Science*, 42(2), 127-136.

T

Taguet, V., Benny, R., & Mazauric, J. P. (2015). Root colonization and growth promotion of wheat by *Pseudomonas fluorescens*. *Applied Soil Ecology*, *94*, 59-67.

Tanno, K., & Willcox, G. (2006). The origins of cultivation in the Near East: archaeobotanical evidence. *Science*, *312*(5780), 1568-1570.

Tengberg, M. (2022). De l'invention de l'agriculture à la domestication du blé. In J.-D. Vigne & B. David (dir.), *La Terre, le vivant, les humains* (pp. 270-271). Muséum national d'Histoire naturelle / La Découverte.

Trinh, H. T., Nguyen, T. V., & Le, D. T. (2021). Responses of durum wheat to salinity stress. *Plant Stress Physiology Journal*, *4*(3), 112-125.

U

U.S. Department of Agriculture. (2025). *World durum wheat production and shares of major producing countries, 2025–2026*. USDA Foreign Agricultural Service.

V

Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M.-L., Touraine, B., Moëgne-Loccoz, Y., Muller, D., & Prigent-Combaret, C. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science*, *4*, 356. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356>

van Loon, L. C., Bakker, P. A. H. M., & Pieterse, C. M. J. (1998). Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annual Review of Phytopathology*, *36*, 453–483. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.36.1.453>

Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & Sk, Z. A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, *184*, 13–24.

W

Wang, B., & Nil, H. (2000). Effect of salt stress on growth of seedlings and ion accumulation in wheat. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, *6*(4), 250-256.

Watt, M., Moosavi, S., Cunningham, S. C., Kirkegaard, J. A., Rebetzke, G., & Richards, R. A. (2020). Trait-based analysis of root system architecture in wheat. *Plant, Cell & Environment*, 43(1), 79-90.

Weller, D. M. (2007). Pseudomonas biocontrol agents of soilborne pathogens: looking back over 30 years. *Phytopathology*, 97(2), 250-256.

Weller, D. M., Raaijmakers, J. M., McSpadden Gardener, B. B., & Thomashow, L. S. (2007). Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 44, 309-348.

Weyens, N., van der Lelie, D., Taghavi, S., & Vangronsveld, J. (2009). Phytoremediation: plant–endophyte partnerships take the challenge. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(2), 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.02.012>

Wu, H., Zhang, X., & Wu, L. (1998). Changes in membrane fatty acids as salt tolerance develops in wheat. *Physiologia Plantarum*, 104(3), 367-373.

Z

Zhang, Y., Shi, Y., Wang, W., & Chen, J. (2022). Root traits of wheat for drought adaptation. *Functional Plant Biology*, 49(4), 345-357.

Zidane, A., Hanafi, M., & Tarchoun, S. (2018). Effet du stress salin sur la croissance du blé dur. *Journal of Plant Physiology*, 223, 45-53.

Webographie

Commission européenne. *Statistiques sur les céréales*. Observatoires des marchés des cultures. https://agriculture.ec.europa.eu/data-and-analysis/markets/overviews/market-observatories/crops/cereals-statistics_fr

FAO. (2022). *World food and agriculture - Statistical yearbook 2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0c372c04-8b29-4093-bba6-8674b1d237c7/content>

International Grains Council. (2013, avril). *Grain Market Report: Durum wheat trade and production statistics*. IGC. <https://www.igc.int>

International Trade Centre. *Market Analysis*. <https://marketanalysis.intracen.org>

Muséum national d'Histoire naturelle. *De l'invention de l'agriculture à la domestication du blé*. <https://www.mnhn.fr/fr/de-l-invention-de-l-agriculture-a-la-domestication-du-ble>

ANNEXES

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 : Milieux de culture.

King B

Ce milieu est utilisé pour la caractérisation des bactéries fluorescentes, telles que les espèces de *Pseudomonas*.

La composition exacte du milieu de culture King B, pour 1 litre, est la suivante :

- Peptone : 15 g.
- Protéose peptone : 10 g.
- Lactose : 10 g.
- Chlorure de sodium (NaCl) : 5 g.
- Phosphate monopotassique : 1 g.
- Phosphate disodique : 1 g.
- Rouge de phénol : 0,025 g.
- Agar : 15 g (si le milieu est destiné à être solide).

Après mélange des ingrédients, le pH du milieu est ajusté à environ 7,4 à l'aide de solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'acide chlorhydrique (HCl) si nécessaire.

RÉSUMÉ

Les *Pseudomonas* spp. Fluorescents sont des rhizobactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) qui interviennent dans la stimulation de la germination et la résistance des plantes au stress salin. Ce mémoire se concentre sur l'évaluation des effets de deux souches bactériennes du genre de *Pseudomonas* spp. Fluorescents P64 et CH, sur la germination et la croissance de deux variétés de blé dur (*Triticum durum*), Vitron et Amar, soumises à différentes concentrations de chlorure de sodium (NaCl).

L'étude démontre que la salinité réduit significativement le taux de germination, l'index vigor, ainsi que la croissance racinaire et foliaire des deux variétés. La souche CH améliore nettement ces paramètres en augmentant l'index vigor et en favorisant le développement racinaire, contribuant ainsi à une meilleure tolérance au stress salin. En revanche, la souche P64 présente des effets moins significatifs voire négatifs selon la variété testée. Les mécanismes d'action bénéfiques incluent la production d'hormones végétales, la solubilisation des nutriments et la modulation des défenses antioxydantes.

Ce travail met en lumière le potentiel des souches de *Pseudomonas fluorescens* comme bio-inoculants pour renforcer la résistance du blé dur aux conditions salines, offrant une alternative biologique durable pour améliorer la productivité et la résilience des cultures en zones affectées par la salinité.

Mots-clés : Blé dur, stress salin, *Pseudomonas*, PGPR.

ABSTRACT

Pseudomonas spp. fluorescens, are plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) involved in enhancing seed germination and improving plant tolerance to salt stress. This dissertation focuses on evaluating the effects of two bacterial strains of *Pseudomonas* spp. fluorescens, P64 and CH, on the germination and growth of two durum wheat (*Triticum durum*) varieties, Vitron and Amar, subjected to different concentrations of sodium chloride (NaCl).

The study demonstrates that salinity significantly reduces germination rate, vigor index, as well as root and shoot growth in both varieties. The CH strain markedly improves these parameters by increasing the vigor index and promoting root development, thereby contributing to enhanced tolerance to salt stress. In contrast, the P64 strain shows less significant or even negative effects depending on the variety tested. The beneficial mechanisms of action include phytohormone production, nutrient solubilization, and modulation of antioxidant defenses.

This work highlights the potential of *Pseudomonas fluorescens* strains as bio-inoculants to strengthen durum wheat resistance under saline conditions, offering a sustainable biological alternative to improve crop productivity and resilience in salt-affected areas.

Keywords: Durum wheat, salt stress, *Pseudomonas*, PGPR.