



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahleb – BLIDA 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



Département des Biotechnologies et Agro-Ecologie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Système de Production Agro-Ecologique

Thème

**Effet des hormones exogènes et de PGPR sur la croissance
de blé dur (*Triticum durm*) sous stress hydrique**

Présenté par :

- MOUSSI Mohamed
- REGUIG Abdelaziz

Devant le jury :

M. ZOUAOUI A.	MCA	Univ. BLIDA 1	Président
M. HAMIDI Y.	MCA	Univ. BLIDA 1	Promoteur
Mme. CHELOUFI R.	MCA	Univ. BLIDA 1	Examinateuse

Année Universitaire : 2024/ 2025



Remerciement

*Nous remercions **M.ZOUAOUI A.** De nous avoir fait l'honneur de présider le Jury.*

*Nos remerciements vont également à **M. CHELOUFI R.** d'avoir pris le temps d'examiner*

Notre mémoire et d'avoir accepté de participer à ce jury.

*Nous tenons à remercier plus particulièrement Monsieur **HAMIDI Y.** qui nous a*

régulièrement suivis dans la réalisation de ce travail, pour son soutien, ses conseils, sa simplicité,

Sa générosité scientifique et ses qualités humaines.

Nous remercions également toute l'équipe du laboratoire de notre Université et l'équipe du laboratoire de faculté.

Enfin, nos profonds remerciements s'adressent à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

Résumé

Les céréales, en particulier le blé dur (*Triticum durum*), jouent un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire et l'économie de l'Algérie, mais leur productivité est fortement limitée par le stress hydrique, notamment dans les régions arides et semi-arides. L'eau étant cruciale pour la croissance des plantes, la sécheresse affecte significativement la germination, le développement végétatif, la biomasse et le rendement.

Dans ce contexte, ce travail explore l'effet de biostimulants comme l'acide gibbérellique AG3), l'acide nicotinique (AN) et les bactéries PGPR sur la résilience du blé dur face au déficit hydrique.

Les résultats expérimentaux révèlent que l'AG3 seul ou en association avec le PGPR stimule fortement la croissance des tiges et l'accumulation de biomasse, tandis que la combinaison AN + PGPR favorise davantage le développement racinaire. Le traitement AG3 + PGPR est le plus performant, alors que l'association triple (AG3 + AN + PGPR) montre un effet antagoniste. La teneur en chlorophylle reste relativement stable, atteignant toutefois un maximum sous la combinaison triple. L'application ciblée de ces agents biostimulants, en particulier AG3 et PGPR, représente ainsi une stratégie prometteuse pour améliorer la tolérance à la sécheresse et la productivité du blé dur en conditions difficiles.

Mots-clés : Blé dur, stress hydrique, acide gibbérellique, acide nicotinique, PGPR,

Abstract

Cereals, especially durum wheat (*Triticum durum*), are fundamental to Algeria's Food security and economy, yet their productivity is severely limited by water stress, particularly in arid and semi-arid zones. As water is essential for plant development, drought significantly impacts seed germination, vegetative growth, biomass accumulation, and final yield.

In this context, this research investigates the effects of biostimulants namely gibberellic acid (AG3), nicotinic acid (NA), and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on improving durum wheat tolerance under water deficit.

Experimental findings show that AG3 alone or in combination with PGPR significantly enhances stem growth and biomass accumulation, while NA combined with PGPR stimulates root development. The AG3 + PGPR treatment is the most effective, whereas the triple combination (AG3 + NA + PGPR) shows an antagonistic effect. Chlorophyll content remains relatively stable, but is highest with the triple combination. Thus, targeted application of these biostimulants especially AG3 and PGPR—represents a promising approach to improve durum wheat resilience and productivity under drought stress conditions.

Keywords : Durum wheat, water stress, gibberellic acid, nicotinic acid, PGPR,

ملخص

تشكل الحبوب، وخاصة القمح الصلب عنصراً أساسياً في الأمن الغذائي والاقتصاد الجزائري، إلا أن إنتاجيته تتأثر بشكل كبير بالإجهاد المائي، خصوصاً في المناطق الجافة وبهـ الجافة. ونظراً لأهمية الماء في نمو النبات، فإن الجفاف يؤثر بشكل واضح على إنبات البذور، النمو الخضري، تراكم الكتلة الحيوية، والمردودية النهائية. في هذا السياق، يتناول هذا البحث تأثير بعض المحفزات الحيوية مثل حمض الجيريليك(AG3) ، وحمض النيكوتينيك(AN) ، والبكتيريا المحفزة لنمو النباتات (PGPR) على تحسين مقاومة القمح الصلب لنقص الماء. أظهرت النتائج أن AG3 بمفرده أو مع PGPR يعزز نمو الساقان وتراكم الكتلة الحيوية بشكل كبير، بينما يشجع الجمع بين AN و PGPR نمو الجذور بشكل أوضح. يُعد العلاج AG3 + PGPR هو الأكثر فعالية، في حين أظهرت التركيبة الثلاثية (AG3 + AN + PGPR) تأثيراً عكسيّاً. أما محتوى الكلورو فيل فقد بقي مستقرّاً نسبيّاً، مع ارتفاع طفيف عند التركيبة الثلاثية. وعليه، فإن التطبيق الموجه لهذه المحفزات، وخاصة AG3 و PGPR، يُعد خياراً واعداً لتعزيز مقاومة الجفاف وتحسين إنتاجية القمح الصلب في البيئات الصعبة.

الكلمات المفتاحية القمح الصلب، الإجهاد المائي، حمض الجيريليك، حمض النيكوتينيك، البكتيريا المحفزة للنمو،

Sommaire

I. Introduction générale	p. 01
1. Importance des céréales dans l'alimentation humaine et animale	p. 01
2. Le blé dans le monde et en Algérie	p. 01
3. Le blé dur (<i>Triticum durum</i>) : caractéristiques principales	p. 01
II. Cultures céralières en Algérie	p. 02
1. Répartition géographique et superficies cultivées	p. 02
2. Rendements agricoles et variabilité climatique	p. 03
3. Contraintes de production : stress hydrique et aléas climatiques	p. 03
III. Le stress hydrique chez le blé dur	p. 03
1. Définition et nature du stress hydrique	p. 03
2. Effets physiologiques et morphologiques	p. 04
3. Conséquences sur les rendements et la production agricole	p. 04
IV. Réactions adaptatives des plantes au déficit hydrique	p. 05
1. Réduction de la transpiration et fermeture des stomates	p. 05
2. Réduction foliaire et racinaire	p. 05
3. Adaptation génétique et sélection variétale	p. 05
V. Stratégies d'amélioration de la tolérance au stress	p. 06
1. Besoins alimentaires futurs et enjeux agricoles	p. 06
2. Utilisation de substances de croissance et biofertilisants	p. 06
VI. Rôle des régulateurs de croissance végétale	p. 07
1. Phytohormones et leur classification	p. 07
2. Gibbérellines (AG3) : histoire, structure et rôles	p. 07
3. Fonctions de l'AG3 dans la germination et la croissance	p. 07
VII. L'acide nicotinique et la réponse au stress	p. 08
1. Rôle métabolique et propriétés antioxydantes	p. 08
2. Études expérimentales sur le blé	p. 08
3. Mécanismes moléculaires et physiologiques	p. 08
VIII. PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria)	p. 08
1. Microbiologie de la rhizosphère et diversité bactérienne	p. 08
2. Effets directs : nutrition, hormones, croissance	p. 08
3. Effets indirects : biocontrôle, ISR, antibiose	p. 09
4. Rôle des PGPR en condition de sécheresse	p. 09

IX. Objectifs de l'étude expérimentale..... p. 09

1. Objectif principal p. 09
2. Objectifs spécifiques p. 09
3. Hypothèses et attentes de l'étude p. 09

Discussion

- 1- L'analyse de longueur des tiges p. 19
- 2- L'analyse de longueur des racines p. 20
- 3- L'analyse des poids sec p.21
- 4- Détermination de la chlorophylle..... p. 22
- 5- L'analyse des poids frais p. 23

Conclusion

- Conclusion..... p. 25

Liste des figures

Figure n° 1 : Graines de blé dur (*Triticum durum* Desf.) variété Simeto

Figure n° 2 : Préparation de solution AG3

Figure n° 05 : Préparation de l'inoculum bactérien

Figure n° 06 : Désinfection des graines

Figure n° 07 : Disposition des graines dans les boites de Pétri

Figure n° 07 : chambre froide

Figure n° 08 : Préparation du sol

Figure n° 09 : Semis des graines dans les pots

Figure n° 10 : Mesure de deux parties aérienne et racinaire

Figure n° 11 : Mesure de la chlorophylle par le SPAD

Figure n° 01 : Variation des longueurs de la partie de tige des plantules de blé en fonction de différents traitements

Figure n° 02 : Variation des longueurs de la partie des racines des plantules de blé en fonction de différents traitements

Figure n° 03 : Variations de poids frais des plantules de blé en fonction des différents traitements.

Figure n° 04 : Variations de poids sec des plantules de blé en fonction des différents traitements.

Figure n° 05 : Quantité de chlorophylle dans les plantules de blé en fonction des différents traitements.

Liste des tableaux

Tableau n°01 : Caractéristiques morphologiques et culturales du blé dur (*Triticum durum* Desf.), variété simeto

Tableau n°02 : Résistance du blé dur (*Triticum durum* Desf.), variété simeto aux facteurs environnementaux

Tableau n°03 : Résistance aux maladies.

Tableau n° 04 : Concentration utilisée dans les différents traitements.

Liste des abréviations

AG3 : acide gibbérellique

AN : acide nicotinique

PGPR : Plant Growth-Promoting Rhizobacteria

CHL : la chlorophylle

PMG : poids de mille graine

Les céréales jouent un rôle crucial dans l'alimentation humaine et animale, représentant une part significative des ressources alimentaires (Karakas et al., 2011). En effet, elles fournissent 54% de l'énergie et 62% des protéines consommées quotidiennement, avec le blé constituant 88% de la consommation céréalière (Kellou, 2008). Cultivé à travers le monde, le blé est non seulement la première céréale en termes de culture, mais aussi une ressource alimentaire majeure pour le pays. Il joue un rôle essentiel, tant sur le plan économique et social que nutritionnel, particulièrement pour les pays en développement (Jouve et al., 2000). Le blé est un aliment de base global, avec 55% de la population mondiale dépendant de cette culture pour environ 20% de leur apport calorique (Al-Kaisi et Broner, 2009), plaçant ainsi l'Algérie en tête de la consommation mondiale de blé (Kellou, 2008).

En Algérie, les céréales, et le blé en particulier, sont au cœur de l'alimentation des consommateurs (Benseddik et Benabdelli, 2000). Elles occupent une place stratégique dans l'économie nationale, un rôle qui se manifeste à chaque étape du secteur céréalier (Selmi, 2000). D'après le ministère américain de l'Agriculture, les importations algériennes de céréales devraient atteindre au moins 8 millions de tonnes pour pallier le déficit de la période 2021-2022. Parmi les variétés de céréales, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est particulièrement prisé dans l'alimentation algérienne (Megherbi et al., 2012). Cette graminée annuelle de taille moyenne est caractérisée par un épi dense et des bractées inversées, se terminant par une longue arête colorée (Louali, 2016). Riche en protéines (El Hadef El Kolli, 2015), le blé dur est largement consommé à travers le monde (Feillet, 2000), et est particulièrement apprécié dans les communautés rurales (El Hadef El Kolli, 2015). Il est transformé en semoule par broyage (Feillet, 2000), et le pain de blé dur est un élément fondamental de l'alimentation quotidienne (El Hadef El Kolli, 2015). Le blé dur est aussi utilisé dans la fabrication des pâtes (Feillet, 2000), et il est le deuxième type de céréale le plus cultivé au monde, après le blé tendre (*Triticum aestivum*) (Morsli, 2010).

La majorité des terres cultivées se trouvent dans le bassin méditerranéen, avec le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord comme centres d'origine et de diversification du blé dur (Vavilov, 1951). En Algérie, cette céréale est cultivée sur une vaste étendue allant des zones subhumides aux régions très arides, couvrant environ 3,6 millions d'hectares annuellement (Madr, 2012). Les superficies cultivées fluctuent entre 900 000 et 1 200 000 hectares, avec une moyenne d'un million d'hectares sur la superficie totale dédiée aux céréales de 3 700 000 hectares (MADR, 2005). Plus des deux tiers de ces zones sont situées dans les terres intérieures du pays (Feliachi, 2002), et on estime que 1 200 000 hectares sont alloués au blé dur (Blottiére, 1930).

Introduction

La production céréalière varie considérablement d'une année à l'autre, influencée par la superficie agricole utilisable, la production et le rendement (Germoni 2009). En fait, la pénurie ou le déficit hydrique représente le stress abiotique le plus grave auquel est confrontée la culture du blé dur dans les conditions de production des régions arides et semi-arides (Shanfi et *al.*, 2006). Ces régions sont souvent affectées par les aléas climatiques, tels que les températures élevées et les faibles précipitations, impactant la croissance et le développement des céréales, ainsi que leur productivité (Bouzerzour et *al.*, 2000).

L'eau est essentielle à la croissance des plantes, constituant les cellules et facilitant la synthèse des glucides par la chlorophylle, tout en transportant les minéraux solubles dans la sève brute (Soltner D, 1990). C'est le principal véhicule pour les substances qui transitent d'un organe à l'autre car elle achemine les éléments nutritifs vers les tissus et les organes (Mouna El fakhria *et al.*, 2011). De plus, le déficit hydrique est un phénomène courant, durant le cycle de développements des plantes, il est lié à la réduction de l'humidité du sol et à l'augmentation de la demande évaporatoire (Blum, 1996). Cela signifie que tout changement du régime hydrique d'un système biologique aura donc des conséquences importantes. D'ailleurs, l'eau est le premier facteur limitant de la croissance et de la productivité de la plupart des cultures végétales (Schulze et *al.*, 1987 ; Araus et *al.*, 2002 ; Chaves et *al.*, 2002).

Il est à noter que dans de nombreux pays, les risques du manque d'eau sont et deviendront de plus en plus fréquents et persistants, à l'avenir, par suite des changements climatiques causés par l'effet de serre. Cette situation est l'une des principales causes naturelles de dégâts agricoles, économiques et environnementaux, et elle apparaît après une longue période sans précipitation (Ameur, 2011). En particulier, en Algérie, la rareté et le caractère irrégulier des précipitations (200 à 600 mm/an) peuvent être les facteurs d'une perte partielle ou totale de production, en particulier dans le cas des céréales (Karaet *et al.*, 2011). Ceci est un problème sérieux dans beaucoup d'environnements arides et semi-arides, où les précipitations changent d'année en année et où les plantes sont soumises à des périodes plus ou moins longues de déficit hydrique (Boyer, 1982).

Le terme stress hydrique peut se définir comme le rapport entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la plante et la quantité d'eau disponible dans son environnement, sachant que la réserve d'eau utile pour la plante est la quantité d'eau du sol accessible par son système racinaire (Laberche, 2004). On utilise le terme sécheresse agricole quand la quantité (et la distribution) des précipitations est assez basse pour causer de sérieuse chutes de rendement des cultures (Hulse, 1989). Les conditions de sécheresse créent un stress osmotique dans les

organismes, qui finit par provoquer un dessèchement et une résistance à l'absorption d'eau par les plantes (Vishwakarma et al., 2017).

Ainsi, les sécheresses variables dans le temps et dans l'espace restent le facteur le plus limitant auquel est confrontée la culture du blé dur (*Triticum durum*) (Annichiarico et al., 2005) et l'une des principales causes de pertes de rendement, qui varient de 10 à 80 % dans le pays. Région méditerranéenne (Nachide et al., 1998). L'origine de ce déficit peut être d'une salinité excessive du sol, d'une sécheresse ou du gel qui par cristallisation des molécules d'eau diminue sa disponibilité ce qui réduit significativement les productions agricoles (Chameil, 2006 ; Bootsma et al., 1996).

L'impact du stress dépend de son degré, sa durée, le stade de développement de la plante, le génotype et son interaction avec l'environnement (Yokota et al., 2006). Sans humidité suffisante, la graine même si elle est correctement placée dans le sol, elle n'évolue pas, retardant ainsi, la levée de la culture et en cas de persistance de sécheresse la situation peut se traduire par une absence de levée (Feliachi et al., 2001). La réaction principale de la plante soumise à un manque d'eau est de réduire de manière active sa transpiration, par la fermeture de ses stomates dès que le déficit hydrique apparaît et par une réduction de sa surface foliaire : réduction de la vitesse de croissance des feuilles ou de leur nombre, sénescence accélérée des feuilles (INRA, 2006).

Dans le cas du blé dur, le déficit en eau affecte son développement et ralentit son taux de croissance, ceci engendre un faible tallage, une réduction de la surface foliaire, ceci se traduit par réduction de biomasse finale (Villegas et al., 2001). En outre, une diminution importante de la longueur et le nombre des racines, cette diminution est due probablement à un arrêt de la division et de l'elongation cellulaire au niveau de la racine (Bendarradji et al., 2016). Dans ces conditions, l'adaptation est un mécanisme nécessaire pour les variétés à adopter dans les régions arides et semi-arides, pour tolérer la sécheresse (Slama et al., 2005). La tolérance d'une plante à une contrainte hydrique peut être définie, du point de vue physiologique, par sa capacité à survivre et à croître et, du point de vue agronomique, par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles (Slama et al., 2005). Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (2016), la demande mondiale de blé devrait augmenter de plus de 40% d'ici 2050. Pour satisfaire cette hausse de la demande, en particulier dans la région méditerranéenne, la production de blé dur doit croître de 5,85% annuellement de 2017 à 2023. D'après le Trade Data Monitor, l'Algérie a importé 7,5 millions de tonnes de blé durant l'année

Introduction

commerciale 2020-2021, comme indiqué dans le rapport du Département américain de l’Agriculture (Maktour, 2022).

L’application exogène de régulateurs de croissance des plantes est une stratégie visant à augmenter le rendement, à améliorer la qualité des cultures et à réguler l’absorption et l’accumulation de nutriments minéraux dans les plantes (Younesi et *al.*, 2014). C’est pourquoi l’adoption de bactéries bénéfiques connues sous le nom de PGPR et acide nicotinique et de l’hormone végétale AG3 constitue une approche avant-gardiste pour améliorer la rusticité et la résilience du blé dur dans des conditions de sécheresse.

L’amorçage hormonal des graines peut améliorer considérablement la germination et la croissance du blé soumis à un stress abiotique (Hamidi et *al.*, 2023). L’acide gibbérellique joue un rôle essentiel dans l’atténuation des perturbations induites par le stress abiotique chez les plantes en modulant divers processus physio-biochimiques et moléculaires (Shah et *al.*, 2023), (AG) est reconnu pour augmenter la teneur en chlorophylle des feuilles et faciliter l’absorption des nutriments minéraux en réponse au stress abiotique (Singh et *al.*, 2005, et Kang et *al.*, 2014). De plus, il améliore la capacité photosynthétique, réduit la sénescence des feuilles et favorise la production de graines en cas de stress hydrique (Li et *al.*, 2010).

Les phytohormones ou hormones végétales sont des substances chimiques organiques de poids moléculaires moyen ; diffusables et cristallisables ; produites par certaines cellules dans la plante, elles régulent la croissance et le développement ou qui interviennent dans la communication entre les individus végétaux différents. Certains agissent en tant vecteur d’information pour réagir aux stress environnementaux (Aya et *al.*, 2011). Ou comme (Heller et *al.*, 2000) les définit comme des composés organiques synthétisés par la plante avec de très faibles concentrations. Ils ont une action sur le métabolisme et le développement généralement dans des tissus différents du lieu de production. Les hormones végétales, comme les hormones animales, sont impliquées dans les communications intercellulaires. La découverte initiale d’une hormone végétale remonte à 1926 avec les recherches de WENT sur l’auxine. Jusqu’en 1950, l’auxine était considérée comme la seule phytohormone connue. Cependant, après cette année, d’autres hormones végétales ont été identifiées, et leur importance a été confirmée au fil du temps. En suivant une chronologie, on peut citer les gibbérellines (1950), les cytokinines (1955), l’éthylène (1960), l’acide abscissique (1965) et les brassinostéroïdes (1995) (Moore, 1989). Les gibbérellines, une famille de 136 diterpènes tétracycliques (composés de 20 atomes de carbone), formés par quatre unités isoprène, dont seuls certains sont actifs en tant qu’hormones et varient selon les espèces considérées (Thomas et *al.*, 2005 *in* Yakoobi, 2014)

Les gibbérellines sont une famille de phytohormones et l'acide gibbérellique est le composé actif. Les gibbérellines sont désignées par G ou AG suivi d'un chiffre (de 1 à 110), l'AG3 étant la mieux connue (Richardset *al.*, 2001). Ces composés ont été découverts lors des études scientifiques sur les maladies du riz causées par le champignon (*Gibberella fujikuroi*). Leur rôle en tant qu'hormone dans la régulation de la croissance des plantes était déjà connu dans les années 1950 (Brian et *al.*, 1954). Les gibbérellines sont impliquées dans divers processus de croissance et de développement des plantes, tels que la germination des graines, l'elongation de la tige et de l'hypocotyle, l'expansion des feuilles, l'initiation florale, le développement des organes floraux, le développement des fruits et l'induction de certaines enzymes hydrolytiques dans l'aleurone des céréales (Matsuoka et *al.*, 2003).

Le AG3 est facilement extrait de cultures de champignons, il est également la forme commercialement la plus disponible et donc la gibbérelline la plus étudiée (Hopkins, 2003 *in* Yakoibi, 2014). Les gibbérellines sont des acteurs essentiels dans plusieurs processus physiologiques chez les plantes, depuis leur croissance jusqu'à la maturation des fruits. Leurs effets ont été minutieusement scrutés et documentés au travers de diverses recherches.

L'une des contributions majeures des gibbérellines réside dans leur capacité à stimuler la croissance. Contrairement aux auxines, l'application d'acide gibbérellique (AG) induit une augmentation des entrenœuds chez les plantes naines. Cependant, toutes les espèces végétales ne réagissent pas de la même manière à ces hormones. En effet, seules quelques variétés naines de certaines espèces peuvent atteindre des tailles normales en réponse à l'AG, tandis que la majorité des variétés naines ne manifestent pas cet effet d'elongation (Gokani et Thaker, 2002 ; Sorrells et *al.*, 1990).

Par ailleurs, les gibbérellines participent activement à la stimulation de la floraison, bien que leur rôle ne soit pas toujours clair. Généralement, elles favorisent l'allongement de la tige avant l'épanouissement des fleurs. Cependant, il a été constaté que dans certaines situations, l'AG peut substituer les conditions de jour long et de froid (vernalisation) pour induire la floraison. Cependant, des inhibiteurs de gibbérellines peuvent entraver l'allongement des tiges provoqué par la photopériode, sans altérer le processus de floraison (La Mantia et *al.*, 1998 ; Patil et Rudriah, 1980 ; Bodson et *al.*, 2003).

De plus, les gibbérellines jouent un rôle crucial dans la germination des graines. Elles interviennent dans la levée de dormance des graines et favorisent la mobilisation des réserves de l'endosperme lors de la germination. Par ailleurs, elles stimulent la production d'alpha-

amylase, une enzyme indispensable à la dégradation de l'amidon. Chez certaines espèces, l'action des gibbérellines peut se substituer aux signaux lumineux ou de froid nécessaire pour briser la dormance des graines. Elles facilitent également l'allongement de la radicule et l'ouverture du tégument des graines (Bruinsma et Karssen, 1987 ; Swain et Kamiya, 1997). Enfin, les gibbérellines participent au processus de mûrissement des fruits. Par exemple, le GA retarde la sénescence chez le citron, prolongeant ainsi sa période de commercialisation sur l'arbre (Chudasama et Thaker, 2007). Ces différentes fonctions des gibbérellines mettent en lumière leur importance capitale dans la croissance et le développement des plantes, ainsi que dans la régulation de nombreux processus physiologiques clés. »

L'acide nicotinique est une vitamine hydrosoluble essentielle au métabolisme énergétique, intervenant comme précurseur du NAD+/NADH dans les réactions redox (Hasanuzzaman et al., 2020). Chez les plantes, il joue un rôle modulateur dans la réponse aux stress abiotiques, notamment le stress hydrique, en influençant la signalisation hormonale et l'homéostasie oxydative (Agtuca et al., 2020).

Des études ont montré que l'application exogène d'acide nicotinique améliore la germination et la croissance du blé (**Triticum aestivum**) sous stress hydrique en renforçant l'activité des enzymes antioxydantes (SOD, CAT, POD), en régulant la biosynthèse de la proline et en stabilisant l'intégrité membranaire (Ibrahim et al., 2021). Par exemple, une étude de Ma et al. (2022) a démontré que le traitement des graines de blé avec de l'acide nicotinique (50–100 µM) augmente significativement le taux de germination et la longueur des radicules sous conditions de déficit hydrique, en réduisant l'accumulation de ROS (espèces réactives de l'oxygène).

Ces effets pourraient être liés à une modulation de l'expression des gènes impliqués dans la réponse au stress (comme **LEA** et **P5CS**) et à une meilleure efficacité photosynthétique (Khan et al., 2023). Ainsi, l'acide nicotinique émerge comme un agent biostimulant potentiel pour atténuer les effets du stress hydrique lors des phases critiques de germination et d'établissement des cultures céréalières.

En complément des hormones végétales, on utilise les bactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR) comme agents biologiques pour accroître la résilience des plantes face à la sécheresse, notamment dans les cultures de blé dur. Le sol abrite une multitude de microorganismes, parmi lesquels on trouve des virus, des bactéries, des champignons, des protozoaires et des algues (Paul et Clark, 1996). Les bactéries sont prédominantes, avec une

densité moyenne de (10^8) cellules par gramme de sol et une biomasse de 10 000 kg/ha, représentant environ 5 % du poids sec des matières organiques du sol (Klopper, 1993).

La rhizosphère, définie par Hiltner en 1904, est la zone du sol entourant les racines et affectée par celles-ci. Elle constitue un microécosystème riche en microorganismes, principalement composé d'algues microscopiques, de protozoaires, de champignons et de bactéries. Certains de ces organismes sont pathogènes pour les plantes, tandis que d'autres leur sont bénéfiques (Raaijmakers, 2009). La rhizosphère est le théâtre d'interactions réciproques entre le sol, ses microorganismes et la plante. Le terme rhizosphère vient étymologiquement de « *rhiza* », signifiant « racine », et « *sphera* », signifiant « ce qui entoure » (Hiltner, 1904).

Les rhizobactéries, également connues sous l'acronyme « PGPR », regroupent les bactéries capables de coloniser la rhizosphère. Elles favorisent la croissance et le développement des plantes grâce à leur position stratégique à l'interface entre le sol et la racine (Orozco et al., 2021). Ces bactéries, présentes naturellement dans la rhizosphère, peuvent s'attacher aux racines spontanément, soit par la formation de biofilms, soit en développant des organites symbiotiques. Leur influence peut être directe ou indirecte, en fonction de la présence ou de l'absence de pathogènes. Les PGPR comprennent les genres *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Alcaligenes*, *Arthobacter*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Serratia* (Ahmad et al., 2008), *Acetinobacter*, *Flavobacterium* et *Erwinia* (Rodriguez et Fraga, 1999).

Les bactéries PGPR améliorent directement la croissance des plantes en facilitant l'acquisition de ressources telles que l'azote, le phosphore et les minéraux essentiels, ou en modulant les niveaux d'hormones végétales (Munees et Mulugeta, 2014). La fixation de l'azote par les micro-organismes est la principale source d'azote dans un écosystème terrestre (Burgmann et al., 2004). Ces micro-organismes ont la capacité de convertir l'azote atmosphérique (N₂) en ammoniac (NH₃), une forme que les plantes peuvent utiliser grâce à un système enzymatique complexe appelé nitrogénase (Kim et Rees, 1994). Les PGPR connus pour stimuler la croissance des plantes grâce à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique incluent *Azoarcusspp.*, *Burkholderia sp.*, *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum*, *Azotobacter*, *Paenibacillus* et *Azospirillum brasiliense*, qui convertissent l'azote atmosphérique en ammoniac via un système enzymatique complexe appeler nitrogénase (Weyens et al., 2010 ; Arora et al., 2012). Les rhizobia, un large groupe de rhizobactéries, sont capables d'établir des interactions symbiotiques en colonisant les racines des plantes et en formant des nodules racinaires où l'azote est fixé en ammoniac, rapidement transformé en nitrates et rendu

disponible pour la plante hôte. La bactérie pénètre d'abord dans la racine puis dans les nodules où se déroule la fixation de l'azote (Munees et Mulugeta, 2013).

Le potassium est le troisième nutriment majeur essentiel pour les plantes. Les concentrations solubles de potassium dans le sol sont généralement très faibles, et plus de 90% du potassium du sol se trouve sous forme de roches et de minéraux de silicate insolubles (Parmar et Sindhu, 2013). De plus, la carence en potassium, souvent due à l'application déséquilibrée d'engrais, est une contrainte majeure dans la production végétale. Sans une quantité adéquate de potassium, les plantes développent mal leurs racines, poussent lentement, produisent de petites graines et ont des rendements inférieurs (Kumar et Dubey, 2012). Il a été rapporté que les microorganismes du sol jouent un rôle clé dans le cycle naturel du potassium, et donc, les microorganismes solubilisant le potassium présent dans le sol pourraient offrir une technologie alternative pour rendre le potassium disponible à l'absorption par les plantes (Rogers et al., 1998).

Une variété de microorganismes présents dans la rhizosphère est capable de produire des substances qui régulent la croissance et le développement des plantes. Les rhizobactéries qui favorisent la croissance des plantes produisent des phytohormones telles que les auxines, les cytokines, les gibberellines et l'éthylène, qui peuvent influencer la prolifération cellulaire dans l'architecture racinaire en induisant la surproduction de racines latérales et d'autres racines, augmentant ainsi l'absorption des nutriments et de l'eau (Arora, 2013).

Les PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) ont des effets indirects qui incluent le biocontrôle, c'est-à-dire la protection des plantes contre les phytopathogènes. Ils utilisent plusieurs méthodes telles que la compétition pour les nutriments dans la rhizosphère, la production de substances antagonistes comme les antibiotiques, l'induction de la résistance systémique (ISR) et la production d'enzymes hydrolytiques (Basu, A. ; Prasad, P et al., 2021).

Les PGPR peuvent réduire la maladie en colonisant les racines, limitant ainsi les sites disponibles pour les pathogènes et améliorant indirectement la croissance des plantes (Piano et al., 1997). Ils peuvent aussi éliminer les pathogènes fongiques en compétition pour le carbone et les sources d'énergie (Kamilova et al., 2005). Ils sécrètent des sidérophores qui lient le fer, le rendant indisponible pour les pathogènes et inhibant leur croissance (Tabassum et al., 2017).

L'antibiose est l'inhibition d'un organisme par les produits métaboliques d'un autre. Les PGPR produisent des antibiotiques pour combattre les infections pathogènes dans la rhizosphère (Hakim et al., 2021).

Introduction

La résistance systémique induite (ISR) est une résistance active dépendant des barrières chimiques ou physiques de la plante, stimulée par les PGPR. Elle est difficile à distinguer de la résistance systémique acquise (SAR), mais l'ISR est induite par divers microorganismes, en particulier les rhizobactéries, qui produisent un signal augmentant la défense de la plante (Jourdan et al., 2008 ; Benhamou et Rey, 2012).

Les PGPR produisent des enzymes lytiques qui dégradent les parois cellulaires des pathogènes, protégeant ainsi les plantes (Raafat et Sahl, 2009). *Bacillus cereus* et *Bacillus cepacia* produisent des enzymes comme l'amylase et la β -1,3-glucanase, qui rompent les parois cellulaires de plusieurs microbes pathogènes du sol (Hakim et al., 2021).

L'application de PGPR atténue les effets négatifs de la sécheresse sur les plantes grâce à un processus appelé endurance et résilience à la sécheresse induites par les rhizobactéries, qui implique une pléthore de processus physiologiques et biochimiques chez les plantes, notamment des modifications des niveaux de phytohormones, l'activation du système de défense antioxydant et l'accumulation de plusieurs solutés organiques compatibles comme les sucres, les acides aminés et les polyamines. (Kaushal et Wani, 2016)

L'objectif principal de notre travail est d'évaluer l'influence du PGPR (*pseudomonas*) et de l'acide gibbérellique (AG3) et l'acide nicotinique (AN) sur la croissance et le développement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en condition de stress hydrique induit par l'arrêt d'arrosage. Plus précisément, notre expérimentation vise à :

- Examiner l'effet du PGPR et de l'AG3 et AN sur la tolérance du blé dur au stress hydrique.
- Étudier les modifications morphologiques et physiologiques des parties racinaires et aériennes des plants suite à ces traitements.
- Élucider les mécanismes d'action du PGPR et de l'AG3 et AN qui pourraient améliorer la résilience des plants de blé dur en cas de déficit hydrique.

1- Objectif de l'étude

Notre expérimentation vise à étudier l'effet de l'application externe d'une souche de *Pseudomonas* et de l'acide gibbérellique (AG3) et l'acide nicotinique (AN) sur la germination et la croissance du blé dur dans des conditions de stress hydrique provoqué par un arrêt d'arrosage.

2- Lieu de l'expérimentation

L'expérimentation a été menée au Laboratoire d'Amélioration des Plantes et au Laboratoire de Microbiologie du Département des Biotechnologies et Agroécologie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Blida1.

3- Matériel biologique

Dans notre expérimentation nous avons la souche de référence *Pseudomonas*, comme PGPR pour la promotion de la croissance des plantules du blé dur, la bactérie a été procurée par le Laboratoire de microbiologie du Département des Biotechnologies, une souche locale isolée des racines de blé de la région de l'Est de l'Algérie.

4- Matériel végétal

L'expérience a été réalisée sur le blé dur (*Triticum durum* Desf.) Variété Simeto, dont les graines proviennent de l'ITGC (El-Harrach), ayant une pureté spécifique et une faculté germinative de 80%.

Cette variété présente les caractéristiques mentionnées dans les tableaux ci-dessous :



Figure n° 01 : Graines de blé dur (*Triticum durum* Desf.) variété Simeto (photo originale. 2025).

Tableau n°01 : Caractéristiques morphologiques et culturelles du blé dur (*Triticum durum* Desf.), variété simeto

Origine	Italie
Précocité	Précoce à semi-précoce
Tallage	Moyen à bon
PMG	Elevé (40-50g)
Compacité de l'épi	Moyennement compacte
Couleur de l'épi	Blanche à crème
Hauteur de la plante à la maturité	Moyenne (90-100cm)
Alternativité	Rintanier
Cycle végétatif	Court à moyen (env.110-120 jours)

(ITGC.2006)

Tableau n°02 : Résistance du blé dur (*Triticum durum* Desf.), variété simeto aux facteurs environnementaux

Au froid	Faible à moyenne
A la verse	Moyenne
A la sécheresse	Bonne
Egrenage	Moyenne à bonne
Gelées	Sensible

(ITGC.2006)

Tableau n°03 : Résistance aux maladies.

Rouille jaune	Moyenne à faible
Rouille brune	Moyenne à bonne
Piétin verse	Moyenne
Piétin échaudage	Faible
Oïdium	Moyenne
Septoriose	Faible à moyenne
Fusariose	Moyenne

(ITGC.2006)

5- Protocol expérimental

5-1- Description des différents traitements testés

Tableau n° 04 : Concentration utilisée dans les différents traitements.

Traitement	Concentration
T0 : Eau distillée (témoin)	////
T1 : Acide gibbérellique AG3	50 mg/l
T2 : Acide nicotinique AN	50mg/l
T3 : PGPR Pseudomonas	0.7 CFU/ml
T4 : AG3 + AN +PGPR	50 mg/l+50mg/l + 0.7 CFU/ml
T5 : AG3 + PGPR	50 mg/l + 0.7 CFU/ml
T6 : AN + PGPR	50 mg/l + 0.7 CFU/ml

5-2- Préparation de solution AG3 :

Nous avons pesé 50 mg d'acide gibbérellique pur et l'avons placé dans un bécher propre et sec. Ensuite, nous avons ajouté de l'eau distillée et utilisé un agitateur magnétique pour mélanger jusqu'à dissolution complète de l'acide, rendant la solution claire et sans particules. Une fois l'acide dissous, nous avons ajouté progressivement de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume total d'un litre. La solution d'acide gibbérellique est ensuite conservée à l'obscurité.



Figure n° 02 : Préparation de solution AG3 (photo originale. 2025)

5-3- Préparation de solution AN :

Nous avons pesé 50 mg d'acide nicotinique pur et l'avons placé dans un bécher propre et sec. Ensuite, nous avons ajouté de l'eau distillée et utilisé un agitateur magnétique pour

mélanger jusqu'à dissolution complète de l'acide, rendant la solution claire et sans particules. Une fois l'acide dissous, nous avons ajouté progressivement de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume total d'un litre. La solution d'acide gibberellique est ensuite conservée à l'obscurité.



Figure n° 03 : acide nicotinique

5-4- Préparation de l'inoculum bactérien

Pour préparer l'inoculum bactérien, nous avons d'abord placé le milieu de culture TSA gélosé dans un bain-marie pour le faire couler et le stériliser. Ensuite, nous avons versé le milieu dans des boîtes de Pétri à proximité d'un bec Bunsen pour éviter toute contamination. Nous avons laissé le milieu sécher légèrement, puis nous avons inoculé les colonies bactériennes en utilisant une anse stérilisée. Les boîtes de Pétri ont ensuite été placées dans un incubateur à 37°C pour une durée de 36 à 48 heures.

Après incubation, l'inoculum a été préparé à partir de colonies viables récemment identifiées. Les suspensions bactériennes ont été réalisées dans des flacons contenant de l'eau distillée stérile, et les concentrations ajustées à 0,7 CFU/ml à l'aide d'un spectrophotomètre réglé à une longueur d'onde de 600 nm. (Bashan et al ; 2014)



Figure n° 04 : Préparation de l'inoculum bactérien (photo originale. 2025).

5-5- Préparation des graines pour les tests de germination

Dans notre étude, nous avons utilisé des graines saines de blé dur (*Var. Semeto*). Ces graines ont été sélectionnées en fonction de leur taille et de leur forme, puis désinfectées en les trempant dans de l'hypochlorite de sodium à 2,5% pendant 10 minutes. Ensuite, elles ont été rincées trois fois avec de l'eau distillée stérile pour éliminer tout résidu de chlore.

Après désinfection, les graines de blé ont été mises à germer dans des boîtes de Pétri de 90 mm de diamètre, avec 10 graines par boîte et 10 boîtes pour chaque traitement (T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6), sur un papier absorbant humidifié régulièrement. L'inoculation avec la souche de *Bacillus subtilis* a été effectuée lors de la germination, à l'aide d'une seringue contenant 20 ml de la suspension bactérienne. Les boîtes ont ensuite été placées dans une étuve ventilée à température ambiante de 25°C.



Figure n° 05 : Désinfection des graines (photo originale, 2025).

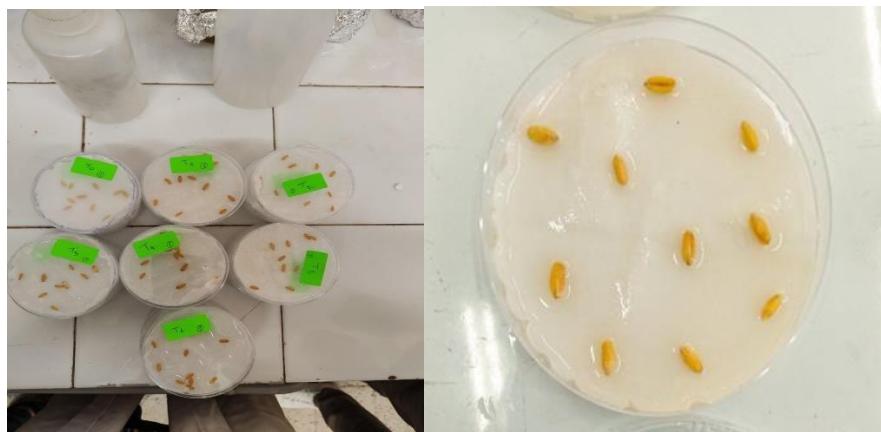


Figure n° 06 : Disposition des graines dans les boîtes de Pétri (photo originale, 2025).

5-6- Chambre de culture :

L'appareil maintient la température à 25°C dès le premier jour jusqu'à ce que la tige pousse et que nous sortions les boîtes à la lumière.



Figure n° 07 : Chambre de culture (photo originale 2025)

5-7- Préparation du substrat

Le sol que nous avons utilisé a été prélevé d'un terrain de la station expérimentale du département de Biotechnologie et Agro-Ecologie. Ce sol a été séché, tamisé, puis désinfecté dans une étuve à 120°C pendant deux heures.

Une fois désinfecté, le sol a été mélangé avec de la tourbe stérile dans une proportion d'un tiers de tourbe pour deux tiers de sol. Ce mélange a ensuite été réparti dans des pots d'une capacité de 01 litre.



Figure n° 08 : Préparation du sol (photo originale, 2025).

5-8- Le repiquage des plantules

Après la germination des graines, le repiquage des plantules a été réalisé dans des pots préalablement arrosés, à raison de 2 à 3 plantules par pot et à une profondeur de 1 cm.

Les pots sont mis à une température ambiante de 25°C dans une chambre de culture. Avant l'application du stress hydrique et durant les 20 premiers jours de croissance, l'arrosage des pots a été effectué de manière à satisfaire les besoins de la plante en eau.



Figure n° 09 : Semis des graines dans les pots (photo originale. 2025).

5-9- Application du stress hydrique

Le stress hydrique a été appliqué du 05 mai 2025 au 23 mai 2025, en arrêtant complètement l'arrosage, et les paramètres ont été étudiés après la fin de l'expérimentation.

6- Paramètres étudiés

6-8- Longueur de la partie aérienne et racinaire

Les mesures de la longueur des deux parties, aérienne et racinaire, ont été effectués en (cm) à l'aide d'un papier millimétré.

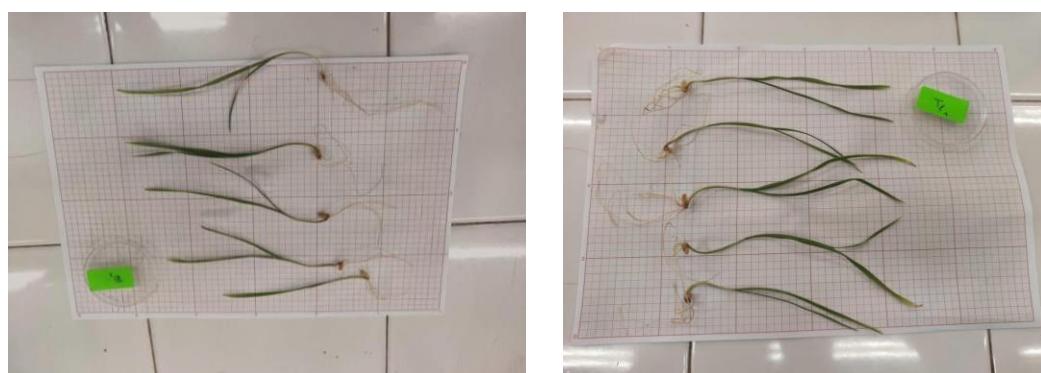


Figure n° 10 : Mesure de deux parties aérienne et racinaire (photo originale. 2025).

6-9- Mesure de la chlorophylle

Dans nos essais expérimentaux, le taux de chlorophylle a été déterminé en unité de SPAD à l'aide d'un chlorophylle mètre, model MINOLTA de type SPAD-502.

Le "ChlorophyllMeter SPAD-502 Plus" est un instrument qui mesure la teneur en chlorophylle, directement sur les feuilles des plantes et indique les valeurs SPAD en analysant la lumière transmise par le limbe dans le rouge et le proche infrarouge. SPAD est l'abréviation de « Soil And Plant Analyse Développements » (développements pour l'analyse du sol et des plantes). Le SPAD donne une mesure numérique comprise entre 0,0 et 99,9 (unités SPAD) qui est corrélée à la teneur en chlorophylle, elle-même corrélée à la teneur en azote.

L'appareil a la forme d'une pince, facile à utiliser, il suffit de fixer l'appareil sur les tissus feuillus pour obtenir une lecture de la teneur en chlorophylle.



Figure n° 13 : Mesure de la chlorophylle par le SPAD (photo originale. 2025).

7- Analyse des données

Les résultats obtenus ont été traités par analyse de la variance multifactorielle avec le logiciel STATGRAPHICS-Centurion XIX (version 19.4.04) et les moyennes significativement différentes ont été séparées par le test de Fisher (LSD) au seuil de probabilité de 5%.

1- Longueur de tige

La figure (01) montre la longueur de la partie des tiges des jeunes plantules en condition de stress hydrique.

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative du facteur traitement sur la longueur de la partie des tiges de blé dur. Selon le test il existe trois groupes homogènes (a, b, c).

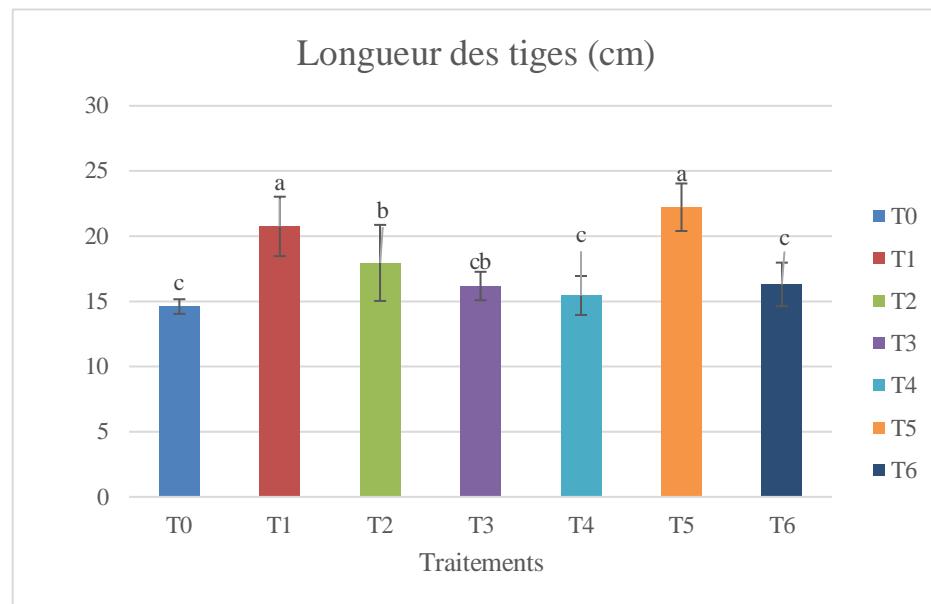


Figure n° 01 : Variation des longueurs de la partie de tige des plantules de blé en fonction de différents traitements

Les traitements T1 (AG3) et T5 (AG3 + PGPR) présentent la plus grande longueur des tiges, avec une moyenne autour de 22–23 cm. Ces deux traitements sont statistiquement similaires (même groupe "a") et significativement supérieurs aux autres. Cela montre que l'AG3 seul ou combiné avec le PGPR stimule fortement la croissance des tiges. T2 (AN) a aussi un effet positif, mais inférieur à celui de l'AG3. Il est statistiquement différent de T1 et T5, avec une groupe "b", indiquant une croissance modérée. T3 (PGPR seul) présente une longueur de tige intermédiaire avec groupe "cb", montrant un effet positif mais moins marqué que lorsqu'il est combiné avec AG3. T0 (Témoin), T4 (AG3 + AN + PGPR), et T6 (AN + PGPR) ont des longueurs de tiges significativement plus faibles (groupe "c" ou "cb") et statistiquement similaires entre eux. Cela suggère que la triple combinaison ou l'association AN + PGPR n'est pas plus efficace que les traitements simples.

L'acide gibbérellique (AG3) seul ou en combinaison avec PGPR est le plus efficace pour favoriser l'allongement des tiges.

2- Longueur des racines

La figure (02) montre la longueur de la partie des racines des jeunes plantules en condition de stress hydrique.

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative du facteur traitement sur la longueur de la partie des racines de blé dur. Selon le test LSD il existe plusieurs groupes homogènes.

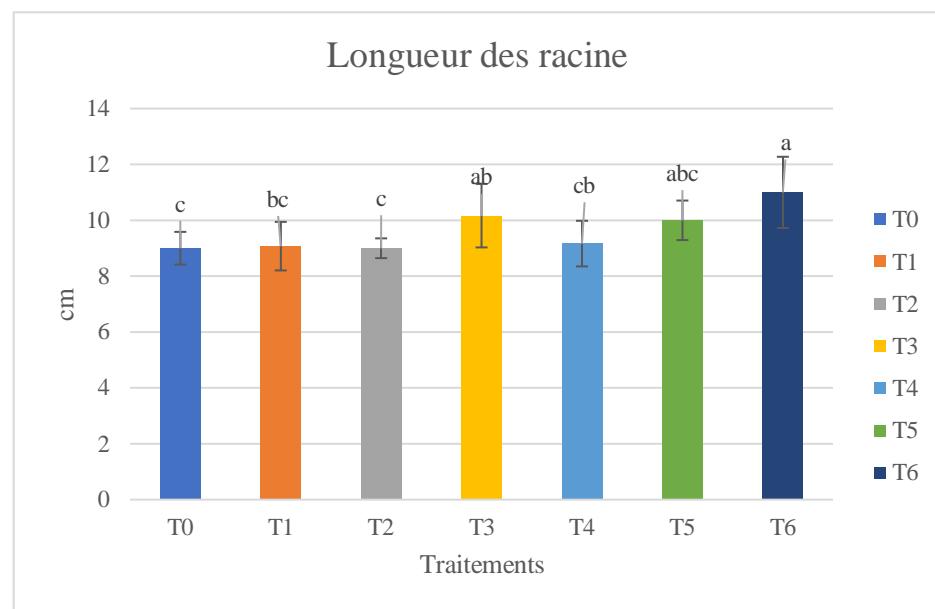


Figure n° 02 : Variation des longueurs de la partie des racines des plantules de blé en fonction de différents traitements

Le traitement T6 (AN + PGPR) affiche la plus grande longueur de racines, avec environ 11,5 cm, statistiquement supérieure à tous les autres traitements (lettre a). Cela indique une synergie positive entre les nutriments minéraux (AN) et les microorganismes (PGPR) pour favoriser la croissance racinaire. T3 (PGPR seul) et T5 (AG3 + PGPR) montrent aussi des longueurs de racines élevées, mais inférieures à T6. Ils partagent les lettres "ab" et "abc", indiquant une différence non significative entre eux, mais une amélioration par rapport au témoin. T1 (AG3 seul), T4 (AG3 + AN + PGPR) et T2 (AN seul) ont des résultats intermédiaires, statistiquement comparables entre eux (lettres cb ou c), et légèrement supérieurs ou équivalents au témoin. T0 (Témoin) et T2 (AN seul) ont les plus faibles longueurs racinaires (lettre c), suggérant que l'AN seul ou l'absence de traitement ne stimule pas efficacement la croissance des racines.

3- Poids frais

Concernant le poids frais de plantule de blé, Les résultats de ce paramètre sont représentés dans la figure (03).

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative du facteur traitement sur la Biomasse fraîche (poids frais) de blé dur. Le test de Fisher (LSD) montre l'existence de six groupes homogènes (a), (b), (bc),(d),(cd), (c).

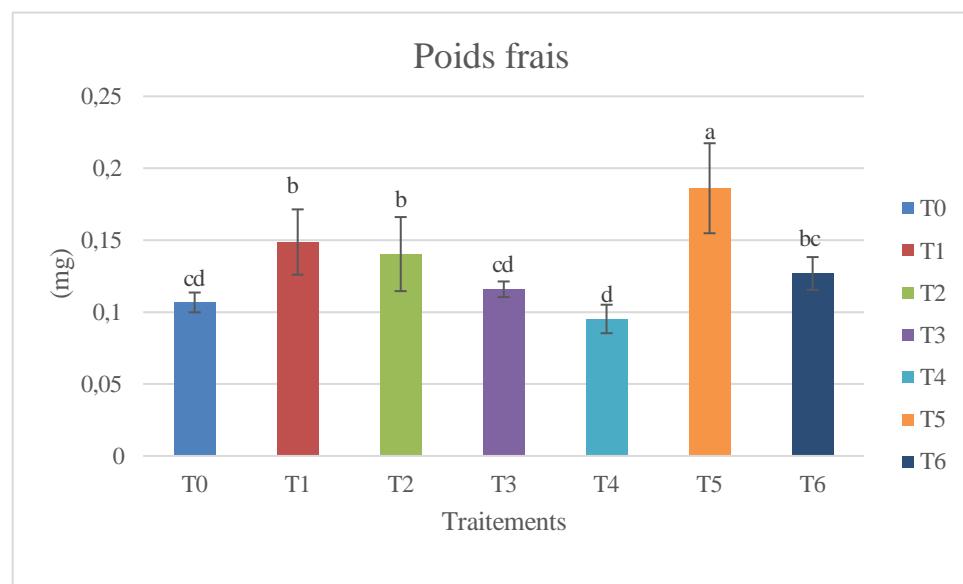


Figure n° 03 : Variations de poids frais des plantules de blé en fonction des différents traitements.

L'analyse des effets des différents traitements sur le poids frais des plantules révèle des variations significatives. Le traitement T5 (AG3 + PGPR) affiche la valeur la plus élevée avec 0,185 mg, correspondant au groupe statistique a, indiquant une amélioration significative par rapport à tous les autres traitements. Cette synergie entre l'acide gibbérelllique (AG3) et les bactéries PGPR semble stimuler efficacement l'accumulation de biomasse fraîche. Les traitements T1 (AG3 seul) et T2 (AN seul) ont également induit une augmentation notable du poids frais avec respectivement 0,150 mg et 0,140 mg, appartenant tous deux au groupe b, ce qui témoigne de leur efficacité à stimuler la croissance, bien qu'à un degré moindre. Le traitement T6 (AN + PGPR) atteint 0,130 mg et se situe dans le groupe cb, tandis que T3 (PGPR seul) et T0 (témoin) présentent des valeurs similaires (0,120 mg et 0,110 mg), classées dc, et ne montrent pas de différence significative entre elles. Enfin, T4 (AG3 + AN + PGPR) enregistre la valeur la plus basse (0,095 mg, groupe d), suggérant une possible interaction négative entre

Résultats et Discussion

les trois agents lorsqu'ils sont combinés. Ces résultats indiquent que l'association AG3 + PGPR est la plus efficace pour améliorer la biomasse fraîche, contrairement à l'association tripartite qui pourrait induire un effet antagoniste.

4- Poids sec

Concernant le poids sec des plantules de blé, les résultats de ce paramètre sont représentés dans la figure (04).

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative du facteur traitement sur la Biomasse sèche (poids sec) de blé dur. Le test des étendus multiples montre l'existence plusieurs groupes homogènes (a), (b), (bc), (d),(cd).

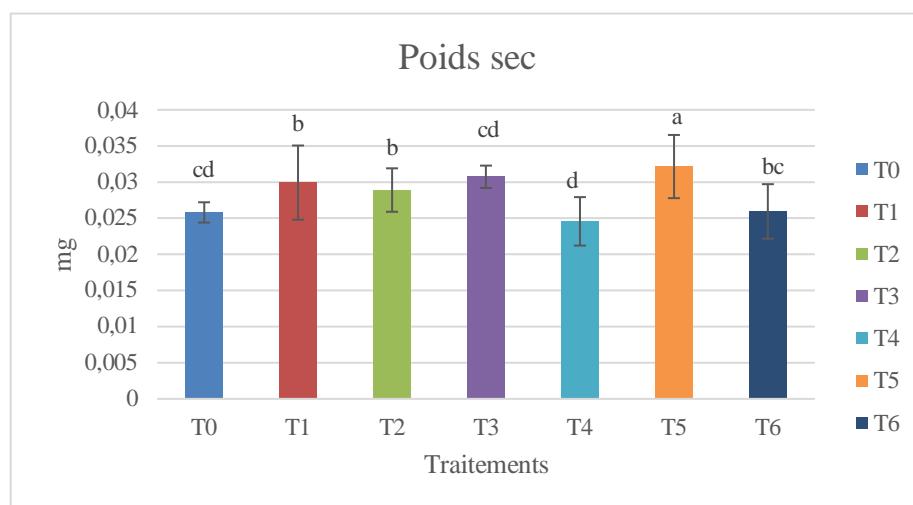


Figure n° 04 : Variations de poids sec des plantules de blé en fonction des différents traitements.

L'analyse des résultats révèle des variations marquées du poids sec sous l'influence des différents traitements. Le traitement T5 (AG3 + PGPR) se distingue nettement avec la valeur la plus élevée (, groupe statistique a), démontrant une synergie optimale entre l'acide gibbérellique et les bactéries PGPR pour stimuler l'accumulation de matière sèche. Les traitements T1 (AG3 seul) et T2 (AN seul) présentent des performances intermédiaires (groupe b), confirmant leur efficacité individuelle, bien que moindre que leur combinaison avec les PGPR. Le traitement T6 (AN + PGPR) (, groupe cb) montre un effet additif modéré, tandis que T3 (PGPR seul) et T0 (témoin) (groupe dc) ne diffèrent pas significativement, suggérant que les PGPR seules ne suffisent pas à augmenter le poids sec sans autres stimulants. En revanche, le traitement T4 (AG3 + AN + PGPR) enregistre une valeur faible (groupe d),

Résultats et Discussion

potentiellement due à une interaction antagoniste entre les trois composants, peut-être liée à une compétition métabolique ou à un déséquilibre physiologique.

Ces résultats soulignent l'importance des interactions entre biostimulants : si l'association AG3 + PGPR (T5) est la plus efficace, la combinaison tripartite (T4) semble contre-productive, nécessitant des investigations supplémentaires pour en élucider les mécanismes. Ces données pourraient guider l'optimisation des protocoles de biofertilisation en ciblant des synergies spécifiques.

5- Détermination de la chlorophylle

L'analyse de la variance montre un effet non significatif du facteur traitement sur la teneur des feuilles de blé dur en chlorophylle. Le teste montre l'existence de six groupes homogènes (a), (ab), (b), (bc), (c), (d), (e).

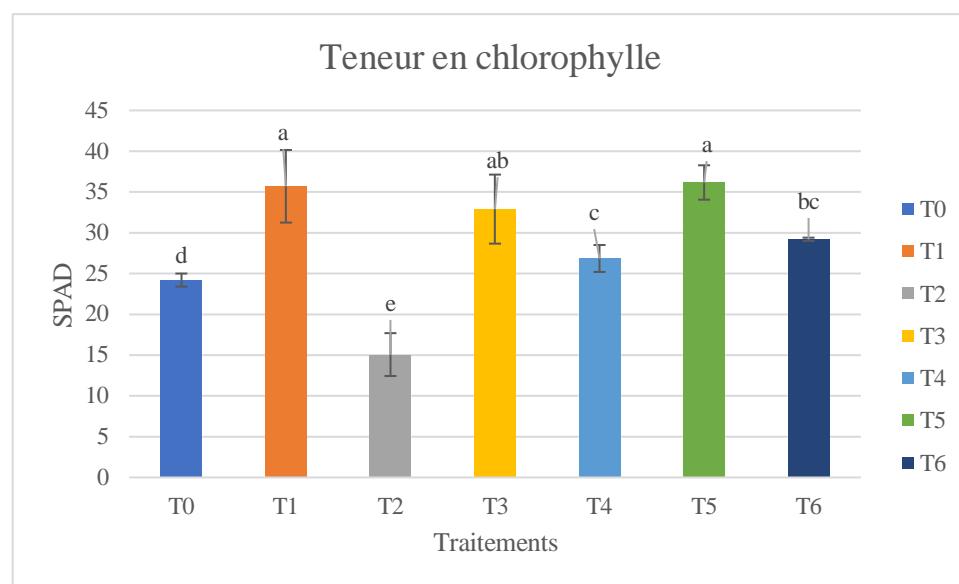


Figure n° 05 : Quantité de chlorophylle dans les plantules de blé en fonction des différents traitements.

L'analyse de l'histogramme de la teneur en chlorophylle (CHL) met en évidence des différences significatives entre les traitements appliqués au blé dur sous stress hydrique. Le traitement **T5** (association de l'acide gibbérellique AG3 et des PGPR) présente la valeur la plus élevée en chlorophylle, indiquant un effet synergique puissant entre les deux agents. Cette combinaison semble stimuler efficacement la photosynthèse et renforcer l'état physiologique des plantes face au stress. Le traitement T1 (AG3 seul) suit de près avec une teneur également élevée, ce qui confirme le rôle stimulant de l'AG3 sur la synthèse chlorophyllienne. Le traitement T3 (PGPR

Résultats et Discussion

seul) a montré une bonne efficacité, avec une teneur significative, statistiquement proche de T1, mettant en avant le rôle bénéfique des bactéries PGPR dans l'amélioration des paramètres physiologiques. En revanche, le traitement T2 (acide nicotinique seul) a enregistré la plus faible teneur en CHL, suggérant un effet inhibiteur ou stressant. L'ajout de PGPR dans le traitement **T6** (AN + PGPR) a permis d'améliorer la situation par rapport à T2, bien que le résultat reste inférieur à T3, T1 et T5. Le témoin T0 et le traitement T4 montrent des teneurs intermédiaires. En résumé, ces résultats démontrent que l'application combinée de biostimulants (AG3 + PGPR) est la stratégie la plus efficace pour préserver la teneur en chlorophylle et donc la performance photosynthétique du blé en conditions de stress hydrique

Conclusion

Cette étude sur la réponse du blé dur au stress hydrique sous différents traitements bio-stimulants révèle des résultats significatifs et contrastés. L'analyse des paramètres morphologiques et physiologiques montre que chaque traitement influence différemment la croissance et le développement des plantules.

Les résultats démontrent que l'acide gibbérellique (AG3) seul ou combiné avec des PGPR (T1 et T5) stimule particulièrement efficacement la croissance des tiges, tandis que la combinaison AN + PGPR (T6) favorise le développement racinaire. Concernant la biomasse, le traitement AG3 + PGPR (T5) se distingue par son effet positif sur le poids frais et sec, alors que la triple combinaison AG3 + AN + PGPR (T4) montre des résultats inattendus avec une réduction de la biomasse mais une augmentation notable de la teneur en chlorophylle.

Ces observations suggèrent que :

1. Les mécanismes d'action des différents traitements sont spécifiques à chaque organe végétal (tiges, racines) et paramètre physiologique
2. Certaines combinaisons présentent des effets synergiques (comme AG3+PGPR pour la biomasse)
3. D'autres associations peuvent entraîner des interactions complexes, parfois antagonistes

La teneur en chlorophylle, moins affectée par les traitements, semble répondre favorablement principalement à la combinaison complète des trois éléments (AG3 + AN + PGPR), indiquant un possible effet protecteur contre le stress oxydatif.

Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'amélioration de la résilience du blé dur face au stress hydrique. Ils suggèrent que l'optimisation des protocoles de traitement devrait prendre en compte :

- L'objectif spécifique recherché (développement racinaire, croissance aérienne, biomasse)
- Les interactions potentielles entre les différents composants
- La possibilité d'appliquer des traitements séquentiels plutôt que simultanés

Des recherches complémentaires seraient nécessaires pour élucider les mécanismes moléculaires sous-jacents à ces interactions et pour tester ces traitements en conditions réelles de culture. Cette étude fournit cependant des bases solides pour le développement de stratégies de bio-stimulation ciblées visant à améliorer la tolérance du blé dur aux conditions de sécheresse.

Perspectives

1. Optimisation des traitements :

- Adapter les combinaisons de biostimulants (AG3, AN, PGPR) en fonction de l'objectif spécifique (biomasse, croissance racinaire, etc.).
- Tester l'efficacité de traitements séquentiels plutôt que simultanés afin d'éviter des effets antagonistes observés dans certaines combinaisons (ex. AG3 + AN + PGPR).

2. Applications en conditions réelles :

- Réaliser des essais en plein champ pour évaluer la stabilité des résultats dans des environnements agroclimatiques variés.
- Intégrer ces pratiques dans les itinéraires techniques de cultures du blé dur en zones arides.

3. Approfondissement des mécanismes biologiques :

- Étudier les mécanismes moléculaires et biochimiques sous-jacents à l'interaction entre biostimulants et physiologie végétale.
- Identifier les gènes de réponse au stress modulés par les traitements hormonaux et microbiens.

4. Sélection variétale et interaction génotype x traitement :

- Évaluer l'effet des biostimulants sur d'autres cultivars de blé dur, afin de déterminer les réponses spécifiques selon le génotype.

5. Perspectives agronomiques et durabilité :

- Promouvoir des approches de biofertilisation durable, réduisant l'usage d'engrais chimiques.
- Intégrer ces solutions dans une stratégie globale d'agriculture résiliente au changement climatique.

Les références

1. Karakas et al., 2011 – Sur l'importance énergétique et protéique des céréales.
2. Kellou, 2008 – Données sur la consommation céréalière en Algérie.
3. Jouve et al., 2000 – Sur l'importance du blé dans les pays en développement.
4. Al-Kaisi et Broner, 2009 – Données globales sur la dépendance au blé.
5. Benseddik et Benabdelli, 2000 – Rôle du blé dans l'alimentation algérienne.
6. Selmi, 2000 – Rôle économique des céréales en Algérie.
7. Megherbi et al., 2012 – Variété Simeto dans l'alimentation.
8. Louali, 2016 – Caractéristiques du blé dur.
9. El Hadef El Kolli, 2015 – Valeur nutritionnelle et transformation du blé.
10. Feillet, 2000 – Broyage et utilisation du blé.
11. Morsli, 2010 – Classement mondial du blé dur.
12. Vavilov, 1951 – Origine du blé dur.
13. MADR, 2005, 2012 – Superficies cultivées en Algérie.
14. Feliachi, 2002 – Localisation des zones céréalières.
15. Blottièvre, 1930 – Estimation des superficies de blé dur.
16. Germoni, 2009 – Variabilité de production céréalière.
17. Shanfi et al., 2006 – Impact du stress hydrique sur le blé.
18. Bouzerzour et al., 2000 – Contraintes climatiques.
19. Soltner, 1990 – Importance de l'eau dans la croissance végétale.
20. Mouna El Fakhria et al., 2011 – Rôle de l'eau dans la plante.
21. Blum, 1996 – Déficit hydrique.
22. Schulze et al., 1987 ; Araus et al., 2002 ; Chaves et al., 2002 – Limitation de la croissance par l'eau.
23. Ameur, 2011 – Sécheresse et changements climatiques.
24. Kara et al., 2011 – Précipitations en Algérie.
25. Boyer, 1982 – Stress hydrique et production.
26. Laberche, 2004 – Définition du stress hydrique.
27. Hulse, 1989 – Sécheresse agricole.
28. Vishwakarma et al., 2017 – Stress osmotique.
29. Annichiarico et al., 2005 – Pertes de rendement causées par la sécheresse.
30. Nachide et al., 1998 – Pertes en région méditerranéenne.
31. Chameil, 2006 ; Bootsma et al., 1996 – Impact du gel et de la salinité.
32. Yokota et al., 2006 – Facteurs influençant l'impact du stress.
33. Feliachi et al., 2001 – Levée et germination du blé.
34. INRA, 2006 – Réactions des plantes à la sécheresse.
35. Villegas et al., 2001 – Réduction de la biomasse.
36. Bendarradji et al., 2016 – Effets du stress sur les racines.
37. Slama et al., 2005 – Définition de la tolérance au stress hydrique.
38. FAO, 2016 – Prévision de la demande mondiale en blé.
39. Maktour, 2022 – Importations de blé en Algérie.
40. Younesi et al., 2014 – Utilisation des régulateurs de croissance.
41. Hamidi et al., 2023 – Amorçage hormonal des graines.
42. Shah et al., 2023 – Rôle du GA dans le stress abiotique.
43. Singh et al., 2005 ; Kang et al., 2014 – GA3 et absorption minérale.
44. Li et al., 2010 – GA3 et photosynthèse.
45. Aya et al., 2011 ; Heller et al., 2000 – Phytohormones.
46. Moore, 1989 ; Thomas et al., 2005 – Historique des hormones végétales.
47. Richards et al., 2001 ; Brian et al., 1954 ; Matsuoka et al., 2003 – Gibbérellines.



48. Gokani et Thaker, 2002 ; Sorrells et al., 1990 – Croissance par GA3.
49. La Mantia et al., 1998 ; Patil et Rudriah, 1980 ; Bodson et al., 2003 – GA3 et floraison.
50. Bruinsma et Karssen, 1987 ; Swain et Kamiya, 1997 – Germination et alpha-amylase.
51. Chudasama et Thaker, 2007 – GA et maturation des fruits.
52. Hasanuzzaman et al., 2020 ; Agtuca et al., 2020 ; Khan et al., 2023 – Acide nicotinique et stress.
53. Ibrahim et al., 2021 ; Ma et al., 2022 – Effets du NA sur la germination.
54. Paul et Clark, 1996 ; Kloepper, 1993 ; Hiltner, 1904 ; Raaijmakers, 2009 – Rhizosphère et PGPR.
55. Orozco et al., 2021 ; Ahmad et al., 2008 ; Rodriguez et Fraga, 1999 – Genres bactériens PGPR.
56. Munees et Mulugeta, 2013–2014 ; Kim et Rees, 1994 ; Weyens et al., 2010 ; Arora et al., 2012 – Fixation de l'azote.
57. Parmar et Sindhu, 2013 ; Kumar et Dubey, 2012 ; Rogers et al., 1998 – Potassium et PGPR.
58. Arora, 2013 ; Basu et al., 2021 ; Piano et al., 1997 ; Kamilova et al., 2005 ; Tabassum et al., 2017 – PGPR et protection des plantes.
59. Hakim et al., 2021 ; Raafat et Sahl, 2009 ; Benhamou et Rey, 2012 ; Jourdan et al., 2008 – Antibiotiques, ISR, enzymes lytiques.
60. Kaushal et Wani, 2016 – Résistance à la sécheresse induite par PGPR.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère De L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab – BLIDA 1

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



Département des Biotechnologies et Agro-Ecologie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Système de Production Agro-Ecologique

Thème

**Effet des hormones exogènes et de PGPR sur la croissance
de blé dur (*Triticum durm*) sous stress hydrique**

Présenté par :

- MOUSSI Mohamed
- REGUIG Abdelaziz

Devant le jury :

M. ZOUAOUI A.	MCA	Univ. BLIDA 1	Président
M. HAMIDI Y.	MCA	Univ. BLIDA 1	Promoteur
Mme. CHELOUFI R.	MCA	Univ. BLIDA 1	Examinateuse

Année Universitaire : 2024/ 2025