الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزار ة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES

Département des sciences de la nature et de la vie

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de Master

Spécialité : Microbiologie appliquée

Thème

UTILISATION POTENTIELLE DE (*ARTHROSPIRA PLATENSIS)* COMME BIOSTIMULANT POUR LA TOLERANCE AUX ANTIBIOTIQUES CHEZ LE BLE (*TRITICUM AESTIVUM L*).

Présenté par :

OUMLABAT FERDAOUSSE

Khirat Feriel

Soutenu le :

25/06/2025

Devant le jury composé de :

Mr. Ait Mouhab Hocine	MCB	U. Médéa	Président
Mme. Chaker Fatma Zohra	MCA	U. Médéa	Examinatrice
Mr. TOUZOUT Nabil	MCA	U. Médéa	Encadrant

Année universitaire 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce travail

Du fond du cœur, et de toute mon âme, je dédie ce mémoire à la personne la plus chère au monde à mes yeux, une femme sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour, une femme qui a pu et su jouer le rôle de tout ce que la vie ne m'a pas offert, une femme qui a supporté mon caractère et m'a soutenu dans les moments les plus durs, une femme dont je remercie dieu tout puissant de me l'avoir offert, à ma mère.

Cher père je me rappel toujours de tous ces moments où tu m'as poussé à travailler et à réussir. Cher père j'avoue que si je suis devenue quelqu'un C'est grâce à tes efforts à tes conseilles et à ta surveillance. Merci et j'espère que vous trouvez dans ce travail l'expression de ma gratitude et mon respect.

A mes frères, mes sœurs et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mon mari et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

Oumlabat ferdaousse

Dédicace

À ceux qui ont semé en moi les graines de la détermination, les ont arrosées de prières, de soutien et d'amour. . .

À mon père, mon soutien dans cette vie, qui m'a appris la patience et la constance,

Et à ma mère, source de compassion, qui a insufflé en mon cœur le goût d'apprendre et de se dépasser. . .

À ma précieuse fille, fleur de ma vie et source d'espoir, Ma source d'inspiration et de motivation pour continuer, puissent-elle un jour être fière de moi. . .

À mes frères et sœurs, mon soutien, ma compagnie et mes sincères encouragements, qui ont partagé mon parcours et m'ont soutenu dans les moments difficiles et joyeux,

Khirat ferial



Remerciement

*À tous ceux qui ont eu un impact significatif sur notre parcours universitaire… Nous adressons nos sincères remerciements et nos profondes gratitudes à notre estimé professeur **Touzout Nabil**, Qui a généreusement offert ses connaissances et ses conseils, et qui a été un exemple de dévouement et de respect. Merci pour votre patience, votre soutien continu et votre confiance en nos capacités.*

Votre diligence et vos conseils ont eu un impact profond sur la réalisation de ce travail Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements et nos reconnaissances

*À nos estimé**Professeurs superviseurs** avec nos plus sincères remerciements.*



UTILISATION POTENTIELLE DE (*ARTHROSPIRA PLATENSIS*)
COMME BIOSTIMULANT POUR LA TOLERANCE AUX ANTIBIOTIQUES
CHEZ LE BLE *(TRITICUM AESTIVUM L)*

Résumé :

La consommation mondiale croissante d'antibiotiques (ANT) représente une préoccupation majeure pour la communauté scientifique, car les résidus rejetés dans l'environnement peuvent s'accumuler dans les plantes et affecter leur croissance. La présente étude visait à examiner l'effet d'un extrait aqueux de spiruline (SPE), appliqué par pulvérisation foliaire, sur la croissance, les pigments photosynthétiques, les mécanismes de défense antioxydants, l'accumulation d'osmolytes, la viabilité cellulaire et les biomarqueurs du stress oxydatif chez des plantules de blé exposées au oxytétracycline (0, 50, 100, 200 mg/L) pendant 10 jours. Le stress induit par l'antibiotique a fortement réduit la croissance, l'état hydrique, la teneur en protéines et le taux net de photosynthèse, tout en augmentant la peroxydation des lipides, la toxicité ionique, la mort cellulaire et la fuite d'électrolytes, en raison d'une accumulation excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans les plantules de blé. La fertilisation foliaire avec le SPE a significativement amélioré les paramètres de croissance, la teneur en chlorophylle, l'accumulation d'osmolytes, la teneur en protéines, les activités enzymatiques antioxydantes et la viabilité cellulaire, tout en réduisant considérablement la toxicité liée aux ROS générées par les ANT. L'application du SPE a permis d'augmenter le poids frais des pousses de 18 ,63%, la longueur des racines de 9,2%, la teneur en chlorophylle a de 1,54 %, la teneur en polyphénols de 32,54 %, et la teneur en flavonoïdes de 48,23 %, tout en réduisant la teneur en peroxyde d'hydrogène de 25,61% et la teneur en malondialdéhyde de 5,21% par rapport au traitement sans ANT (0 mg/L). Nos résultats confirment que l'apport de SPE améliore la tolérance au stress induit par les ANT chez le blé en atténuant les effets délétères du stress oxydatif. Cette découverte suggère que le SPE pourrait constituer un outil biotechnologique alternatif applicable à d'autres types de cultures. Par conséquent, les résultats de cette étude soutiennent l'utilisation du traitement à base d'***Arthrospira platansis***, qui s'est révélé particulièrement efficace pour améliorer la croissance des plants de blé en réduisant les effets néfastes du stress antibiotique dans un sol contaminé.

Mots-clés :

Xénobiotiques ; Phytotoxicité ; Homéostasie redox ; Stress oxydatif ; Espèces réactives de l'oxygène ; Spiruline

POTENTIAL USE OF *(ARTHROSPIRA PLATENSIS)*
AS A BIOSTIMULANT FOR ANTIBIOTIC TOLERANCE
IN WHEAT *(TRITICUM AESTIVUM L).*

A B S T R A C TN:

The increasing global consumption of antibiotics (ANT) is a growing concern for the scientific community since the residues discharged into the environment can accumulate in plants and affect their growth. The present study aimed to examine the effet of leaf-applied Spirulina water extract (SPE) on growth, photosynthetic pigments, antioxidant defense mechanisms, osmolyte accumulation, cell viability, and oxidative stress biomarkers analyses in wheat seedlings exposed to oxytétracycline ANT (0, 50, 100, 200 mg/L) for 10 days. ANT stress drastically decreased growth, water status, protein content and net photosynthetic rate, while increasing lipid peroxidation, ion toxicity, cell death, and electrolyte leakage due to the excessive accumulation of reactive oxygen species (ROS) in wheat seedlings. Foliar fertigation of SPE significantly increased growth traits, chlorophyll content, osmolyte accumulation, protein content, antioxidant enzyme activities, and cell viability, while considerably reducing ANT-generated ROS toxicity in wheat seedling. The SPE application enhanced shoot fresh weight by 18.63%, root length by 9.2%, chlorophyll a content by 1.54%, polyphenol content by 32.54%, and flavonoid content by 48.23%, while decreased hydrogen peroxide content by 25.61% and malondialdehyde content by 5.21% over 0 mg/L ANT treatment. Our data support the notion that SPE supplementation improves ANT stress tolerance in wheat by mitigating the detrimental impacts of oxidative stress. This finding suggests that SPE could serve as an alternative biotechnological tool in other types of crops. Therefore, the results of this study support the use of the *A. platensis* treatment, which was mainly effective in improving the growth of wheat plants by reducing the detrimental effects of antibiotic stress in contaminated soil.

Keywords :

Xenobiotics ; Phytotoxicity ; redox homeostasis ; Oxidative stress ; Reactive oxygen species ; Spirulina

الاستخدام المحتمل لـ *(ARTHROSPIRA PLATENSIS)*كمحفز حيوي لتحمل المضادات الحيوية في القمح *(TRITICUM AESTIVUM L)*

الملخص:

يشكل الاستهلاك العالمي المتزايد للمضادات الحيوية (NTAs) في جميع أنحاء العالم مصدر قلق كبير للمجتمع العلمي، حيث يمكن أن تتراكم المخلفات المنطلقة في البيئة في النباتات وتؤثر على نموها. كان الهدف من هذه الدراسة هو فحص تأثير المستخلص المائي للسبيرولينا(SPE) ، الذي تم تطبيقه عن طريق الرش الورقي، على النمو، والأصباغ الضوئية، وآليات الدفاع المضادة للأكسدة، وتراكم الأسموليت، وحيوية الخلايا، والمؤشرات الحيوية للإجهاد التأكسدي في شتلات القمح المعرضة للأوكسيتتراسيكلين (0، 50، 100، 200 ملغم/لتر) لمدة 10 أيام. أدى الإجهاد الناجم عن المضادات الحيوية إلى انخفاض كبير في النمو وحالة الماء والمحتوى البروتيني ومعدل البناء الضوئي الصافي، مع زيادة بيروكسيد الدهون والسمية الأيونية وموت الخلايا وتسرب الإلكتروليت، بسبب التراكم المفرط لأنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) في شتلات القمح .وقد أدى التسميد الورقي باستخدام البولي فينول المخصب بالحرارة SPE إلى تحسن كبير في معايير النمو، ومحتوى الكلوروفيل، وتراكم الكلوروفيل، وتراكم الأسموليت، ومحتوى البروتين، وأنشطة الإنزيمات المضادة للأكسدة، وحيوية الخلايا، مع تقليل السمية المرتبطة بالأكاسيد الضارة الناتجة عن مركبات NTAs بشكل كبير. أدى استخدام البولي بروبيلين المعزز إلى زيادة الوزن الطازج للبراعم بنسبة 18.63%، وطول الجذور بنسبة 9.2%، ومحتوى الكلوروفيل أ بنسبة 1.54%، ومحتوى البوليفينول بنسبة 32.54%، ومحتوى الفلافونويد بنسبة 48.23%، مع تقليل محتوى بيروكسيد الهيدروجين بنسبة 25.61% ومحتوى المالونديالديهايد بنسبة 5.21% مقارنةً بالمعالجة بدون حمض النيتروزين تيريفثاليك (0 مجم/لتر). تؤكد النتائج التي توصلنا إليها أن إضافة بوليمرات البولي إيثيلين سداسي البروتينات البوليمرية تحسن من قدرة القمح على تحمل الإجهاد الناجم عن حمض النيتروزنتاين تيريفثاليك عن طريق تخفيف الآثار الضارة للإجهاد التأكسدي. تشير هذه النتيجة إلى أن EPS يمكن أن يكون أداة تكنولوجية حيوية بديلة قابلة للتطبيق على أنواع أخرى من المحاصيل. وبالتالي فإن نتائج هذه الدراسة تدعم استخدام المعالجة القائمة على أرثروسبيرا بلاتانسيس التي أثبتت فعاليتها بشكل خاص في تحسين نمو نباتات القمح من خلال الحد من الآثار الضارة للإجهاد الناتج عن المضادات الحيوية في التربة الملوثة.

كلمات مفتاحية:

المواد السمية النباتية؛ السمية النباتية؛ توازن الأكسدة والاختزال؛ الإجهاد التأكسدي؛ أنواع الأكسجين التفاعلية؛ سبيرولينا

Table des matières :

Dédicace..... II

Dédicace..... III

Remerciment..... IV

Résumé.....V

A B S T R A C T ..... Erreur ! Signet non défini.

الملخص **: ..... VIII**

Table des matières..... **Erreur ! Signet non défini.**

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES TABLEAUX XI

Listes des abréviations : XII

INTRODUCTION 2

Première partie 3

Rappel Bibliographique 3

Chapitre I : 4

Généralité sur les cyanobactéries **..... 4**

1- Les algues 5

1.1- Les microalgues 5

1.2 - Les Cyanobactéries 6

1.3- Diversité Morphologique..... 6 1

.4 - Classification 7

1.5- Photosynthèse 8

1.6- Les conditions du contrôle des proliférations des cyanobactéries et réponse au stress environnemental 10

1.7- Conditions pour le contrôle de la prolifération : 10 1

.7.1- Intensité et durée de la lumière 10

1.7.2 - La disponibilité des nutriments 10

1.7.3- PH 10
1.8- Réponse au stress environnemental : 10
1.8.1- Le stress oxydatif 10
Température 10
1.8.2- La sécheresse 10
1.8. 3- Microplastiques (notamment le polyester) 10
1.8.4- Antibiotiques 11
1.8.5- Rayonnement UV 12
1.8.6- Salinité 12
1.8.9- Métaux et métalloïdes..... 12
Chapitre II : Généralité sur les antibiotiques 13
2 - Définition 14
2.1- Types des antibiotiques 14
2 .2 - Le point sur les tétracyclines : 15
2.3 - Mécanisme d'action : 16
2.4- la résistance aux antibiotiques : 16
Chapitre III : 19
L'effet combiné des antibiotiques et Arthrospira platensis sur la croissance des plants de blé. 19
3- Croissance des plantes et biomasse 20
3 .1- Réponse des plantes au stress oxydatif induit par les antibiotiques 20
3.2- Rôle d'*Arthrospira platensis* dans l'amélioration de la résistance du blé à la sécheresse en stimulant les systèmes physiologiques et biochimiques : 21
3 .3- La résistance aux algues comme biocatalyseurs : 22
Deuxième partie : Etude expérimentale 23
Matériels et méthode 24
4 .1-L'importance économique du blè 25
4.2- L'importance de sélectionner l'antibiotique oxytétracycline : 25
4.3- L'origine de la spiruline : 26
4.4- Préparation d'un extrait de la spéruline : 26
4.4.1- Broyage de la biomasse séchée 26
4.5- Test de croissance : 27
4.5.1- protocole de stress des plantes 27
4.6- Milieu nutritif : 29

4.7- Comportement de croissance : 29
4.7.1- Mesures de croissance 29
4.8- Extraction et estimation des pigments photosynthétiques : 30
4.8.1- Chlorophylle et caroténoïdes : 30
4.9- Peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) : 30
4.9.1- Réactifs : 30
4.9.2- Procédure : 30
4.10- Analyse des indices de dommages oxydatifs : 31
4.10.1- Estimation de la peroxydation lipidique : (MDA*)* 31
4.10.2- Réactifs : 31
4.10.3- Procédure : 31
4.11- Activité phénylalanine ammonia-lyase (PAL) 31
4.12- Estimation du système de défense antioxydant non enzymatiques 32
4.12.1- Détermination de la teneur en proline 32
4.13- Analyse des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques : 32
4.13.1- Estimation du système de défense antioxydant 32
4.13.2- Détermination des flavonoïdes totaux : 32
4.13.3- Détermination de la teneur en composés phénoliques totaux 33
4.14- Activité Glutathion-S-transférase (GST) 33
4.14.1- Réactifs : 33
4.14.2- Procédure : 33
4.15- Détermination de la teneur en glutathion réduit (GSH) 34
Résultats 35
5- Caractéristiques morphologiques 36
6- Pigments photosynthétiques 38
7- Biomarqueurs de stress oxydatif : 38
8- Réponses des enzymes antioxydantes 39
9- Glutathion réduit et teneur en proline 40
10- Réponse des métabolites secondaires 41
Discussion 42
Conclusion 48
Références Bibliographiques 50

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cyanobacteries Et Cycles Biogeochimiques A Travers l'histoire De La Terre : Trends In Microbiology (Sanchez-Baracaldo Et Al., 2022) 7
Figure 2: Mecanisme De La Photosynthese (Chow, W. S.,2003). 9
Figure 3: Mecanisme d'action Des Antibiotiques (Josep Sarrion Marin, 2018) 16

Figure 4: Effets De l'ebl Et De l'otc Seuls Ou En Combinaison Sur La Croissance Des Plantes

(A) Et La Biomasse (B) Des Plantules De Colza Apres 7, 14 Et 21 Jours Des Traitements Respectifs. Les Donnees Sont Les Moyennes De Trois Repetitions (± Se). Les Lettres Di 20

Figure 5: Schema Representatrice Du Dispositif Experimental. 28
Figure 6: Effet d'un Traitement Foliaire Au Spe 25 Mg/L, En Presence Et En Absence De Stress Antibiotique (Oxytetracycline), Sur Le Phenotype Du Ble. 36
Figure 7: Effet De l'application Foliaire De Spe En Presence Ou En Absence De Stress A l'oxytetracycline Sur La Longueur Des Tiges Par Plant (A), La Masse Fraiche Des Tiges Par Plant (B), La Longueur Des Racines Par Plant (C), Et La Masse Fraiche Des Racines Par 37
Figure 8: Effet De l'application Foliaire De Spe En Presence Ou En Absence De Stress A l'oxytetracycline Sur La Teneur En Chlorophylle (A) Et La Concentration En Carotenoïdes (B) Du Ble. 38
Figure 9: Effet De l'application Foliaire De Spe En Presence Ou En Absence De Stress d'oxytetracycline Sur La Teneur Peroxyde d'hydrogene (A) Et La Teneur En Malondialdehyde (B) Du Ble. 39
Figure 10: Effet De l'application Foliaire De Spe En Presence Ou En Absence De Stress A l'oxytetracycline Sur Les Activites De Gst (A) Et Pal (B) Du Ble. 40
Figure 11: Effet De l'application Foliaire De Spe En Presence Ou En Absence De Stress A l'oxytetracycline Sur Les Teneurs En Gsh (A) Et Proline (B) Du Ble. 40
Figure 12: Effet De l'application Foliaire De Spe En Presence Ou En Absence De Stress A l'oxytetracycline Sur Les Teneurs En Polyphenols (A) Et La Teneur En Flavonoïdes (B) Du Ble..... 41

LISTE DES TABLEAUX

Table 1: Une première classification taxonomique. Ils proposaient alors une classification en 6 sections principales 8
Table 2: Classes d'antibiotiques couramment utilisés, produits par des microbes Classes (Bhat

K & Bhat Panemangalore, 2022) 17
Table 3: Classification du blé.....25
Table 4: La composition des milieux nutritifs 29

Listes d'abréviations :

OTC) : oxytétracycline
(ANT) : antibiotique
(VICH) : Veterinary International Commette on Harmonization
(ATP) : adénosine triphosphate
(RAM) : La résistance aux antimicrobiens
(ARMB): bactéries résistantes aux antimicrobiens
(EBL) : epibrassinolide
(SOD):superoxyde dismutase
(APX):ascorbate peroxydase
(GR): glutathion réductase
(DHAR): déhydroascorbate réductase
(POD): peroxydase
(OAIC) : Bureau Algérien Interprofessionnel des Céréales
(SPE): spirulina platensis
(Car) : caroténoïde
(ATB): Acide Thiobarbiturique
(ACP): Analyse en composantes principales
(RL):Root length (SL):Shoot
length
(SFW):shoot fresh weight
(RFW):Root fresh weight
(TPC): polyphénols totaux (TFC)
: flavonoïdes totaux
(Sh): sulfhydryle réactif
(DO) Densité optique
(CAT) Catalase
(H2O2) hydrogen peroxide
(DTNB) Dithio-bis 2-nitrobenzoïque
(GSH) Glutathionne
(CDNB) 1-chloro-2, 4-dinitrobenzène
(GST) Glutathion-S-transférase
(EDTA) Ethylenediamine tetra acetic acid
(TCA) Trichloroacetic acid
(MDA) Malondialdéhyde
(ROS) Reactive oxygen species
(TBA) : Acide thiobarbiturique
(kI) : Iodure de potassium

(MG) :Milligramme
(Chl a): Chlorophylle a
(Chl b) :Chlorophylle b

(JAS) : jours après la sortie

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La pollution de l'environnement et les problèmes de sécurité écologique causés par l'utilisation massive d'antibiotiques comme agents antibactériens et stimulateurs de croissance dans le bétail, la volaille et l'aquaculture ont suscité des inquiétudes au niveau mondial (Ying et al., 2017). En 2020, l'utilisation mondiale totale d'antibiotiques dans l'élevage a atteint 99 500 000t, avec une augmentation prévue de 8 % d'ici 2030 (Reardon, 2023). Les tétracyclines constituent l'une des classes d'antibiotiques les plus utilisées, représentant environ 37 % de l'utilisation totale d'antibiotiques vétérinaires en Chine (ZHAO et al., 2022b) et 46 % de la consommation annuelle d'antibiotiques dans l'Union européenne (Carvalho et Santos, 2016). En raison d'une absorption et d'un métabolisme limités, 30 à 90 % des antibiotiques administrés aux animaux sont excrétés (Barra Caracciolo et al., 2022) et pénètrent ensuite dans le sol par l'intermédiaire d'engrais organiques (pour le bétail et la volaille) et de l'eau d'irrigation. En tant qu'antibiotique tétracycline le plus couramment utilisé dans l'élevage de bétail et de volaille, l'oxytétracycline (OTC) a été largement détectée dans le sol, avec des concentrations dépassant souvent le seuil d'écotoxicité de 100 (μg.kg-1) établi par le Veterinary International Commette on Harmonization (VICH) (Qin et al., 2024). Les antibiotiques, qui émergent en tant que " pseudo-persistent " et polluant continuellement importé, présentent des effets phytotoxiques et des risques de génération de gènes de résistance (Reardon, 2023). Ils perturbent la physiologie et le métabolisme des plantes, induisant un stress oxydatif (Nafees et al.,2024). Il a été démontré que l'OTC déclenche une production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans les semis de concombre, ce qui entraîne une augmentation des activités des enzymes antioxydantes et des substances détoxifiantes comme le glutathione pour neutraliser les ROS et accélérer la dégradation de l'OTC. Parallèlement, les enzymes du métabolisme secondaire et les métabolites connexes dans les plantules de blé exposées à l'OTC, contribuent de manière significative aux activités antioxydantes en régulant les voies du métabolisme secondaire **(Ahammed et al.,** 2017).

Le blé, deuxième céréale la plus cultivée dans le monde, est particulièrement sensible au stress hydrique, notamment lors des phases de floraison et de remplissage des grains. Bien qu'il existe des variations intraspécifiques, les réponses végétales aux xénobiotiques sont souvent spécifiques à l'espèce. Renforcer la tolérance aux polluants chez le blé est essentiel pour répondre à la demande alimentaire croissante (Farooq et al., 2014).

Face aux stress chimiques, les interactions des plantes avec les microorganismes sont cruciales pour leur adaptation et leur survie. Par exemple, en condition de sécheresse, l'utilisation de cyanobactéries peut améliorer la germination des plantes (velasco-clares et al., 2025).

Triticum aestivum répond favorablement aux biostimulants naturels riches en nutriments, qui améliorent la croissance et la tolérance au stres. Ces biostimulants sont des sources abondantes de micro- et macronutriments, de substances promotrices de croissance, et d'antioxydants, essentiels pour réguler les paramètres biochimiques, physiologiques et de rendement dans des conditions environnementales normales ou stressantes(M. M. Hamouda et al., 2022). L'intérêt croissant pour les biostimulants visant à améliorer la tolérance aux xénobiotiques se manifeste particulièrement par l'utilisation des extraits d'algues(Velasco-Clares et al., 2025). Les traitements à base d'algues et de cyanobactéries renforcent la capacité des plantes à supporter la sécheresse. Par exemple, Arthrospira platensis appliquée à l'arachide a amélioré sa tolérance à la sécheresse(El-Sayed et al., 2020), tandis que *Kappaphycus alvarezii* a renforcé la résistance du blé à ce stress (Patel et al., 2018). La spiruline constitue la base de nombreux produits à base de microalgues. L'analyse des extraits de microalgues et cyanobactéries a révélé la présence de composés responsables de l'amélioration de la croissance, tels que les polyamines, brassinostéroïdes, et bétaïne, ainsi que des vitamines, minéraux, macronutriments, et des hormones comme les gibbérellines, cytokinines et auxines(Parmar et al., 2023). Toutefois, déterminer précisément le mode d'action des biostimulants reste un défi majeur en raison de la diversité des espèces d'algues et de cultures, et de leurs interactions avec les variables abiotiques(Brito-Lopez et al., 2025) .

Les résidus d'antibiotiques vétérinaires constituent un problème mondial de plus en plus préoccupant en raison de leur persistance et de divers effets négatifs sur les organismes, y compris les cultures, et d'une compréhension limitée de leur phytotoxicité (Kacienė et al., 2024). À l'opposé, Spirulina (*A. platensis*) diminue les effets nocifs sur la plante. Toutefois, le processus par lequel la spiruline externe influence la croissance des plants de blé exposés à l'ANT demeure encore largement méconnu. Dans cette étude, (*A. platensis* a été testée pour son action biostimulant sur les processus physiologiques et biochimiques du blé sous stress antibiotique, ainsi que sur la croissance et les activités antioxydantes enzymatiques et non enzymatiques. Cette cyanobactérie a été choisie en raison de son potentiel durable en tant que plate-forme émergente pour la production de bioproduits. L'évaluation de son potentiel en tant que biostimulant pourrait ouvrir la voie à une biotechnologie durable de valorisation de la biomasse produite dans les sols pollués.

Première partie

Rappel Bibliographique

Chapitre I :

Généralité sur les cyanobactéries

1- Les algues

Les algues sont des organismes vivants, eucaryotes majoritairement aquatiques, qui peuvent accomplir la photosynthèse oxygénique que l'on peut assimiler à une réduction de CO_2 et à une oxydation de H_2O grâce à l'énergie lumineuse. Les macroalgues, qui sont des macroorganismes pluricellulaires, et les microalgues, qui sont des micro-organismes unicellulaires, sont divisés en deux grandes catégories (Patterson, 1997 ; Sheath & Wehr, 2015).

1.1- Les microalgues

Les microalgues, organismes autotrophes, puisent leur énergie de la photosynthèse oxygénée en utilisant l'eau comme donneur d'électrons. Cependant, dans certaines conditions environnementales particulières, telles que des concentrations élevées de carbone organique dissous dans l'eau, certaines espèces de microalgues ont la capacité de devenir hétérotrophes ou photohétérotrophes. Les microalgues prolifèrent dans différents environnements, notamment aquatiques, terrestres, et même dans des conditions extrêmes telles que les glaciers et les déserts arides, mais aussi sur divers supports tels que les sols, les roches, les arbres et même les édifices architecturaux. Certaines espèces se développent dans les eaux de fonte des glaciers ou de la neige. Cette capacité d'adaptation est le résultat d'un polymorphisme morphologique et génétique, illustré par une importante diversité comprenant près de 144 313 espèces distinctes et qui rend leur classification taxonomique complexe. Les avancées en phylogénie moléculaire ont contribué à une meilleure compréhension de ces organismes et ont permis des mises à jour constantes dans leur classification.

Dans un contexte mondial visant à réduire l'utilisation des additifs chimiques, la production de microalgues constitue une alternative à fort potentiel dans divers secteurs tels que l'agroalimentaire, la cosmétique et la santé. Leur production présente un certain nombre d'avantages par rapport aux cultures terrestres, notamment une empreinte écologique réduite, une utilisation plus efficace des ressources et une plus grande flexibilité dans la conception du système de production. L'utilisation de la biomasse de microalgues est particulièrement attrayante du fait qu'elles sont caractérisées par une forte productivité sur des terres non arables et non exploitables. Les microalgues s'adaptent également à une variété de conditions environnementales grâce à la production de métabolites d'intérêt, tels que les compléments alimentaires. Leurs vertus comprennent l'amélioration du système immunitaire, la réduction des infections virales, les effets pré-et probiotiques, l'augmentation des concentrations en hémoglobine et la réduction du taux de sucre dans le sang (OUADA ET AMMAR, 2025) .

Ces espèces peuvent être classées en différents groupes tels que les cyanobactéries, les chlorophyta, les rodhophyta, les ochrophyta, les haptophyta, les eglènes et les glaucophyta. Depuis quelques dizaines d'années, ces micro-organismes suscitent de plus en plus d'intérêt dans différents domaines applicatifs. Effectivement, en raison de la diminution des terres arables et de l'augmentation

de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère, elles peuvent être utilisées pour la production de denrées alimentaires. Les solutions alternatives peuvent être proposées afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone. Pour se développer, les microalgues n'ont besoin que d'eau, de CO_2 et de lumière. Aujourd'hui, plus de la moitié de l'O_2 atmosphérique serait produite par tous les micro-organismes photosynthétiques. Les plants Terrestres constitueront l'autre moitié (Bernard, 2014 ; Rastogi, 2021).

1.2 - Les Cyanobactéries

Les cyanobactéries (algue bleu-vert) sont une espèce de bactéries qui fait partie de l'arbre du vivant. Il s'agit d'organismes très anciens, de type procaryotes Gram négatifs, qui vivent dans divers écosystèmes (Bernard, 2014 ; Franche & Reynaud, 1986 ; Rastogi, 2021).

Les cyanobactéries présentent une grande variété morphologique, allant des petites formes unicellulaires (pico plancton, inférieures à 2-3 µm) aux formes plus grandes, coloniales, filamenteuses ou ramifiées. D'autres groupes possèdent des cellules spécialisées, telles que les hétérocystes (endroit où l'azote atmosphérique est fixé, N_2) et les akinètes (envisagées comme des granules). La particularité des cyanobactéries est qu'elles possèdent des caractéristiques communes à la fois aux organismes photosynthétiques eucaryotes (connus sous le nom de « microalgues ») et/ou aux bactéries. On retrouve des similitudes entre les cyanobactéries et les bactéries : i) l'absence de membranes nucléaires et plastidiales, de mitochondries, de réticulum endoplasmique et de dictyosome, et ii) la présence d'une paroi cellulaire typique des bactéries Gram-, avec de la muréine (Bernard, 2014 ; Poveda, 2021).

1.3- Diversité Morphologique

Les formes et les tailles des cyanobactéries sont très variées. Toutefois, elles sont classées en trois grandes catégories d'organisation morphologique :

a) monocellulaire, b) coloniale et, c) pluricellulaire filamenteuse. Les formes des cyanobactéries unicellulaires peuvent être sphérique, cylindrique ou ovoïde. Les cellules de ces individus se multiplient par fission binaire (Bernard, 2014 ; Rastogi, 2021).

1 .4 - Classification

Cette conception de la classification reposait principalement sur leurs caractéristiques morphologiques et les caractéristiques du développement (Rastogi, 2021).

D'après cette classification, les cyanobactéries ont été officiellement classées en cinq parties :

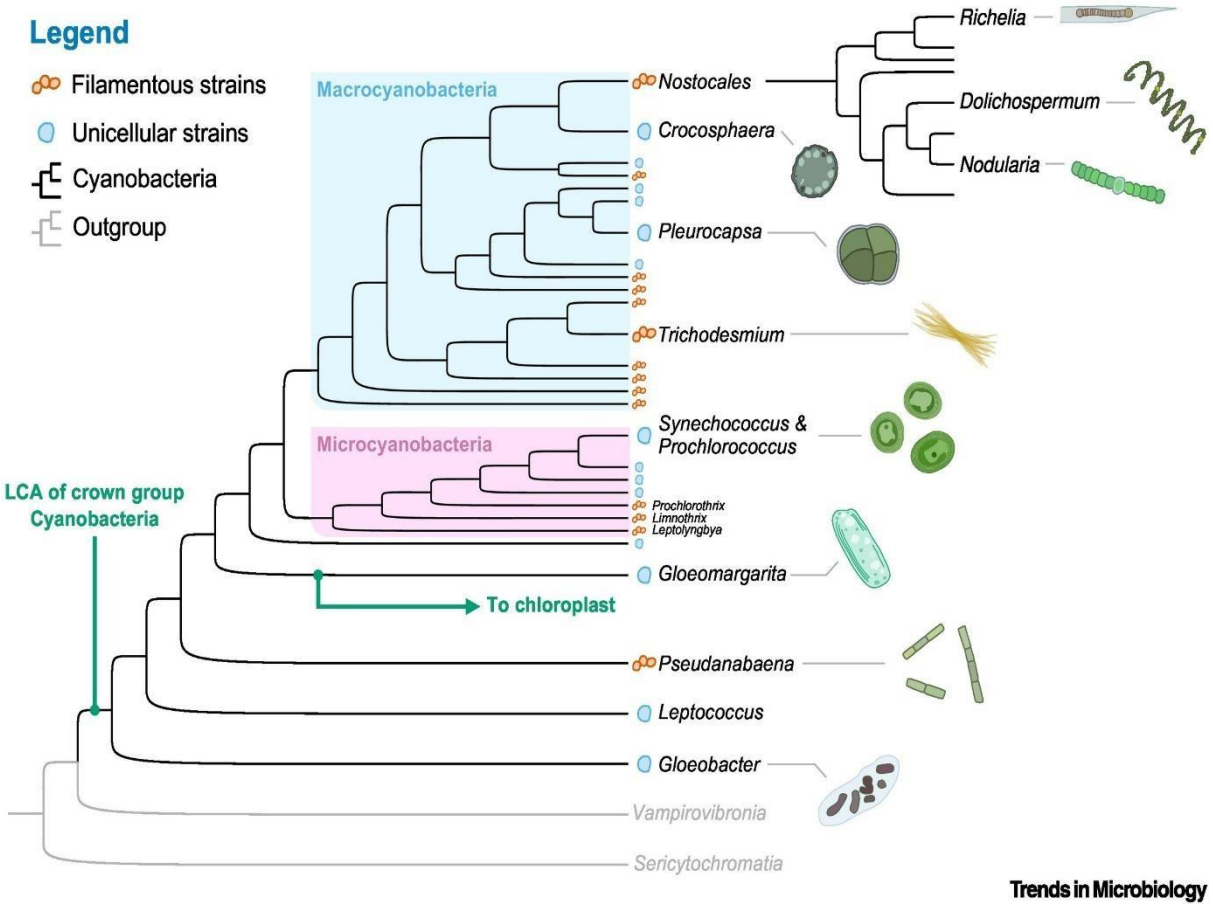


Figure 1: CYANOBACTERIES ET CYCLES BIOGEOCHIMIQUES A TRAVERS L'HISTOIRE DE LA TERRE : TRENDS IN MICROBIOLOGY (SANCHEZ-BARACALDO ET AL., 2022) .

La typologie botanique repose sur la structure des cellules, la présence d'enveloppes ou de gaines, le type de division cellulaire et des informations de phylogénétique moléculaire. Selon Hoffman et ses collègues, la classification de 2005 est l'une des plus récentes ; elle admet 6 ordres, 30 familles et plus de 250 genres (Bernard, 2014).

La typologie des procaryotes prend en compte les traits morphologiques et certaines caractéristiques physiologiques, cytologiques et biochimiques des cultures de cyanobactéries axéniques, sans se baser sur le concept d'espèce (Bernard, 2014).

Table 1: Une première classification taxonomique. Ils proposaient alors une classification en 6 sections principales (Dutheil&Synechocystis, 2014 ; Asselman, 2014 ; Pau et al. 2022)

Section I	Les Chrocooccales	Forme unicellulaire, coque ou bacille
Section II	Les Pleurocapsules	Forme unicellulaire ou en agrégat non filamenteuse, par de paroi externe partages ou une matrice gélatineuse
Section III	Les Oscillatoniales	Forme filamenteuse ne forme pas hétérocystes
Section IV	Les Nostocales	Forme filamenteuse de largeur égale à hétérocystes
Section V	Les Rivulariales	Forme filamenteuse de largeur variable à hétérocystes
Section VI	Les Stignonematales	Forme filamenteuse branchés à hétérocystes

1.5- Photosynthèse

Seules les cyanobactéries sont des procaryotes capables de photosynthèse oxygénique. L'énergie solaire est utilisée pour hydrolyser des molécules d'eau, ce qui génère de l'oxygène nécessaire à la respiration des organismes appelés « aérobiques », de l'énergie sous forme d'ATP et du pouvoir réducteur sous forme de NAD(P)H, ce qui leur permet d'assimiler des minéraux (NO_3, SO_4, PO_4, etc.) et du carbone à partir du CO_2 atmosphérique essentiels à leur développement. L'objectif de cette section est de démontrer que les cyanobactéries, grâce à leur capacité métabolique à réaliser la photosynthèse oxygénique et à leur grande diversité morphologique et physiologique, ont eu et ont encore aujourd'hui un impact écologique global sur la biosphère. Elles ont joué un rôle essentiel dans l'explication des mécanismes biochimiques liés à la photosynthèse (Kammerscheit, 2019).

La réaction chlorophyllienne des Cyanobactéries est illustrée par cette équation :

$$6CO_2\,(aq) + 6H_2O\,(l) + \text{Lumière} + \text{Chaleur} \longrightarrow C_6H_{12}O_6\,(aq) + 6O_2\,(g)$$

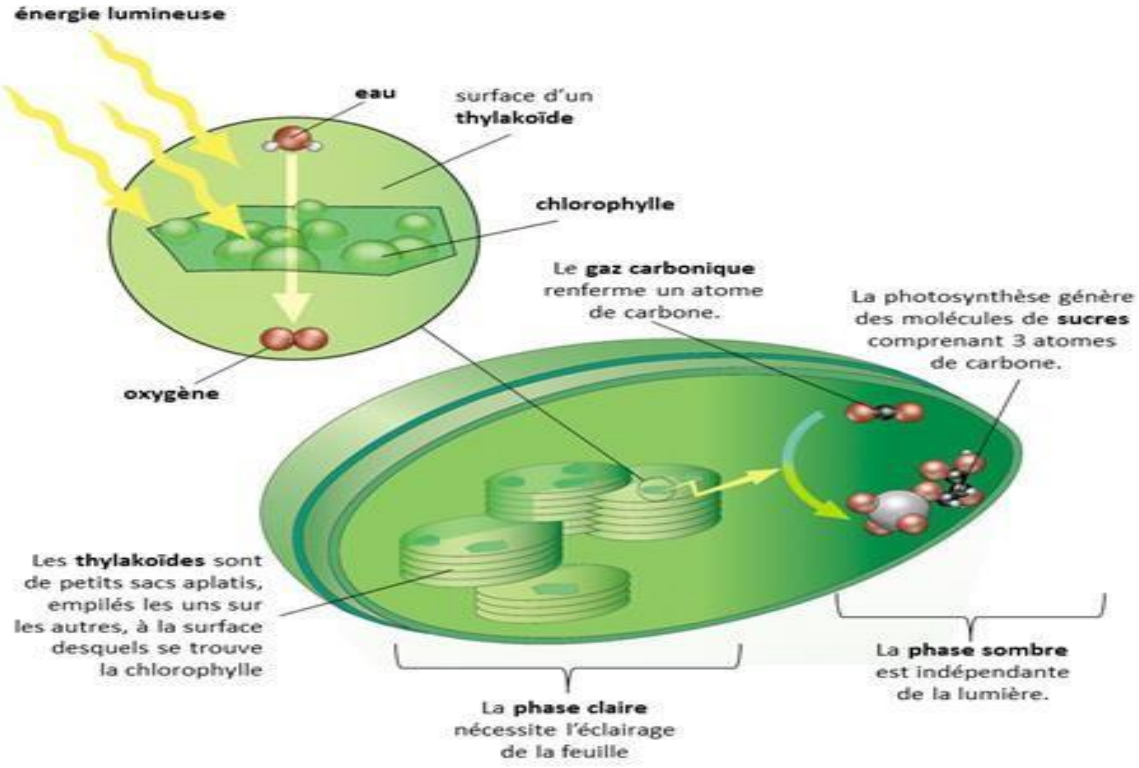


Figure 2: MECANISME DE LA PHOTOSYNTHESE (CHOW, W. S.,2003).

1.6- Les conditions du contrôle des proliférations des cyanobactéries et réponse au stress environnemental

Les cyanobactéries sont très répandues sur le plan géographique et écologique. Leur prolifération massive entraîne la formation de "blooms", de fleurs d'eau ou encore d'efflorescences. Des recherches paléontologiques ont démontré que le processus d'efflorescence des cyanobactéries ne se limite pas à la période actuelle (Bernard 2014).

1.7- Conditions pour le contrôle de la prolifération :

1 .7.1- Intensité et durée de la lumière

Les cyanobactéries sont très dépendantes de la lumière pour leur croissance et leur photosynthèse. Une exposition prolongée et une intensité lumineuse élevée peuvent entraîner une inhibition de la photo et entraîner une diminution de la croissance (Kim Tiam et al., 2022).

1.7.2 - La disponibilité des nutriments

Pour se développer, les cyanobactéries nécessitent des nutriments particuliers tels que l'azote, le phosphore et le fer. Le taux de croissance des organismes peut être impacté par une disponibilité excessive ou limitée de ces nutriments (Bernard, 2014 ; Rastogi, 2021).

1.7.3- PH

Le développement optimal des cyanobactéries se produit à des pH neutres (environ 7), mais leur croissance peut être entravée à des PH extrêmes (Rezayian et al., 2019).

1.8- Réponse au stress environnemental :

1.8.1- Le stress oxydatif

En cas de stress oxydatif, les cyanobactéries ont la capacité de générer des espèces réactives de l'oxygène (ROS), ce qui peut causer des dommages cellulaires et même la mort (Dupuis et al., 2018 ; Rastogi, 2021).

Température

En règle générale, les cyanobactéries peuvent s'adapter à une variété de températures, cependant, les variations de température extrêmes peuvent causer un stress et entraver la croissance (Rezayian et al., 2019).

1.8.2- La sécheresse

Les conditions de sécheresse peuvent engendrer un manque d'eau chez les cyanobactéries, ce qui peut entraîner une diminution de leur croissance et l'expression de gènes de réponse au stress (Poveda ,2021)

1.8. 3- Microplastiques (notamment le polyester)

La présence de microplastiques dans l'environnement peut entraîner des dommages physiques et une toxicité chez les cyanobactéries (Hidalgo-Ruz et al. (2012).

1.8.4- Antibiotiques

Les antibiotiques peuvent être résistants à certaines souches de cyanobactéries, tandis que d'autres peuvent y être sensibles. Le type et la concentration de l'antibiotique, ainsi que la souche spécifique de cyanobactéries, peuvent jouer un rôle dans l'effet des antibiotiques sur la croissance des cyanobactéries (McCorquodale-Bauer et al., 2023 ; Wright, 2010 ; X. Zhang et al., 2022)

1.8.5- Rayonnement UV

Dans leurs habitats naturels, les cyanobactéries sont des organismes photosynthétiques qui sont donc soumis à des niveaux élevés de rayonnement UV. Divers mécanismes ont été mis au point pour lutter contre les effets néfastes du rayonnement UV, tels que la synthèse de pigments comme les phycobiliprotéines, qui absorbent et perdent l'énergie du rayonnement UV. De plus, quelques cyanobactéries génèrent des substances absorbant les rayons UV, appelées acides aminés de type mycosporine, qui protègent l'ADN des dommages causés par les rayons UV (Rezayian et al., 2019 ; Xie et al., 2021).

1.8.6- Salinité

Les cyanobactéries peuvent vivre et se développer dans différentes salinités, allant de l'eau douce aux milieux très salins. En régulant les ions et les osmolytes, ils réussissent à maintenir l'équilibre cellulaire en produisant des solutés compatibles tels que les bétaïnes et l'ectoine (Rezayian et al., 2019).

1.8.9- Métaux et métalloïdes

Les cyanobactéries peuvent être exposées à des concentrations élevées de métaux et de métalloïdes tels que le cadmium, le mercure et l'arsenic. Ils ont la capacité de faire face au stress métallique en stimulant la synthèse de composés liants aux métaux, comme les phytochélatines et les métallothionéines, qui empêchent et détoxifient les ions métalliques. (Rezayian *et al*. 2019), il est possible que les cyanobactéries puissent également développer une résistance aux métaux en altérant les systèmes de transport et de détoxification des métaux. Globalement, les cyanobactéries se sont adaptées au stress environnemental en développant divers mécanismes, tels que des modifications de l'expression génétique, de la synthèse protéique et des voies métaboliques. Selon (Sinha et Häder.,2021), la compréhension de ces réponses peut apporter des renseignements essentiels sur la survie et la croissance des cyanobactéries dans diverses situations environnementales.

Chapitre II : Généralité sur les antibiotiques

2 - Définition

Les antibiotiques sont des substances provenant de la nature, de la synthèse ou de la semisynthèse, qui ont la capacité de stopper ou de ralentir la croissance ou l'activité métabolique des microorganismes, ces composés sont des molécules biologiquement actives qui possèdent des propriétés antibactériennes, antifongiques et antiparasitaires. Ils ont été spécialement conçus comme médicaments pour traiter les infections bactériennes chez l'homme et l'animal, ainsi que comme additifs alimentaires ou pour prévenir les maladies dans les élevages *(Kovalakova et al., 2020)* .

Les premiers médicaments antibiotiques provenaient de sources naturelles, comme la pénicilline, qui est issue du champignon Penicillium. Aujourd'hui, on obtient des antibiotiques en synthétisant chimiquement ou en modifiant chimiquement des composés naturels (Daghrir & Drogui, 2013). Les antibiotiques peuvent être classés selon leur mécanisme d'action (bactéricide, mort des bactéries) et bactériostatique (inhibition de la croissance bactérienne) ou leur composition chimique (b-lactames, quinolones, tétracyclines, macrolides, sulfamides, etc.). Aujourd'hui, il y a une grande diversité de médicaments antibiotiques enregistrés (Y. Chen et al., 2017). Deux raisons principales ont entraîné une augmentation de la consommation mondiale d'antibiotiques. La première est la croissance démographique à l'échelle mondiale, ce qui a conduit à une augmentation de la consommation. De plus, la richesse croissante liée à une facilité d'accès aux médicaments a également encouragé l'usage des antibiotiques (Van Boeckel et al. 2014), la demande croissante de protéines animales entraîne une augmentation de la production alimentaire, ce qui nécessite une utilisation accrue de promoteurs de croissance et d'antibiotiques. Des quantités importantes d'antibiotiques sont employées par les êtres humains ainsi que dans le secteur de l'alimentation et de l'agriculture. La présence du bétail dans l'environnement peut entraîner des conséquences néfastes sur les organismes non ciblés présents dans les écosystèmes aquatiques, tels que les algues d'eau douce, les microphytes, les macrophytes, le zooplancton et les poissons (Kovalakova *et al.*, 2020a ; Yu *et al*., 2022a).

2.1- Types des antibiotiques

La plupart des antibiotiques actuellement employés sont principalement des métabolites secondaires produits par divers micro-organismes (Bhat K et Bhat Panemangalore 2022). Les antagonistes de ces microbes contre les bactéries pathogènes sont principalement issus de cultures de sol. De nos jours, il est possible de fabriquer des antibiotiques en utilisant la semi-synthèse et/ou la synthèse chimique d'analogues qui utilisent des structures naturelles à partir de produits naturels. Le sol est un milieu complexe et varié pour les microbes qui produisent des antibiotiques. Frost a été l'un des premiers chercheurs à réaliser une étude approfondie sur le rôle des micro-organismes du sol dans

la suppression/destruction du développement des pathogènes en 1904 (Bhat K et Bhat Panemangalore 2022).

On peut classer les antibiotiques en différents groupes en fonction de leur mécanisme d'action, tels que :

- Les antibiotiques à action bactéricide (comme la pénicilline, les aminoglycosides) ;
- Les antibiotiques à action bactériostatique (comme les tétracyclines, les macrolides) ;
- Les antibiotiques à spectre étroit (comme la pénicilline) ;
- Les antibiotiques à large spectre (comme les aminoglycosides, les fluoroquinolones) (Brown & Wright, 2016 ; Fischbach & Walsh, 2009 ; Tahlan & Jensen, 2013).

2 .2 - Le point sur les tétracyclines :

La surveillance environnementale englobe l'identification des sources de contamination, l'évaluation de la concentration des polluants, l'appréciation de leur toxicité et écotoxicité, ainsi que leur bioaccumulation au sein des êtres vivants (Artiola et Brusseau, 2019).

L'augmentation de la vente et de l'utilisation des antibiotiques (30 % sur les dix dernières années) est étroitement associée à leur présence dans l'environnement. La présence continue de substances pharmaceutiques actives dans l'environnement favorise la résistance aux médicaments, ce qui a des conséquences néfastes pour les animaux et les êtres humains (Bengtsson-Palme et Larsson, 2016 ; Rodriguez-Mozaz et al., 2020a). Les tétracyclines constituent une ancienne catégorie d'antibiotiques, qui présentent un large éventail d'efficacité et une faible toxicité. Ces dernières présentent une vaste distribution dans les tissus, notamment dans les organes ayant une fonction sécrétoire. Elles sont expulsées par les reins. Elles ont une action de bactériostase, entravant la synthèse des protéines chez les bactéries. On les emploie dans divers domaines de la médecine vétérinaire, en particulier en ophtalmologie (C. Maringue et S. Chahory ,2019).

La pollution environnementale et les enjeux de sûreté écologique, résultant de l'emploi intensif d'antibiotiques en tant que moyens antibactériens et stimulateurs de croissance dans l'élevage du bétail, des volailles et de la pisciculture, suscitent une préoccupation mondiale(Ying *et al*., 2017) .

L'oxytétracycline (OTC), un antibiotique tétracycline fréquemment prescrit dans l'élevage du bétail et de la volaille, a été largement identifiée dans le sol, ses concentrations dépassant fréquemment le niveau d'écotoxicité de 100 µg.kg -1 fixé par le Comité international vétérinaire d'harmonisation (VICH) (Qin et al., 2020) .

2.3 - Mécanisme d’action :

Les cyclines pénètrent dans le cytoplasme et inhibent la sous unité 30S des ribosomes. Les tétracyclines sont des antibiotiques bactériostatiques (Mammeri, H., & Amiens, 2013) .

2.4- la résistance aux antibiotiques :

La résistance aux antimicrobiens (RAM) constitue une menace majeure pour la santé humaine à l'échelle mondiale, entravant notre capacité à traiter un nombre croissant d'infections (OMS 2014). De plus, cela entraîne une augmentation significative des coûts de traitement, car la résistance nécessite l'utilisation de molécules de dernière génération coûteuses et implique des frais d'hospitalisation supplémentaires. L'AMR représente également un enjeu majeur en agriculture car il complique la gestion de la santé animale domestique, engendrant des coûts économiques supplémentaires. De plus, des données existantes indiquent que plusieurs espèces de la faune portent des bactéries résistantes aux antimicrobiens (AMRB) dans divers habitats, ce qui soulève la question de leur contribution à la dynamique des AMRB aux frontières entre les populations humaines, les animaux domestiques et les écosystèmes naturels (marion et all., 2016).

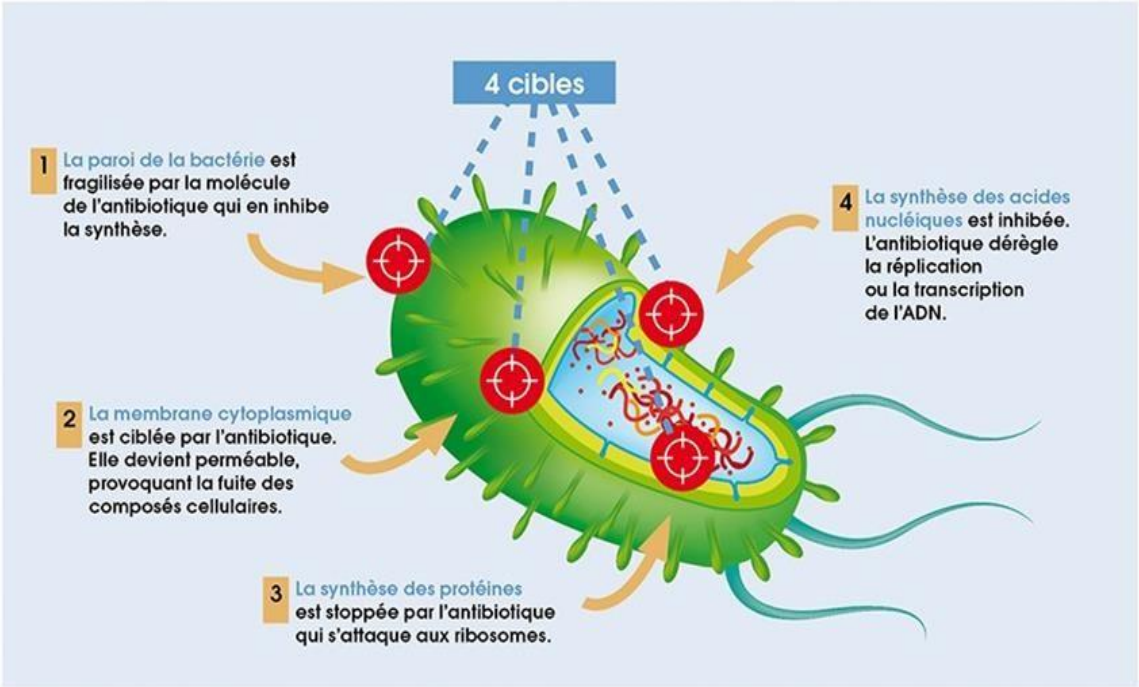


Figure 3: MECANISME D'ACTION DES ANTIBIOTIQUES (JOSEP SARRION MARIN, 2018).

La résistance antimicrobienne est présente naturellement dans les communautés de sol, notamment grâce à la production d'antibiotiques par certaines bactéries et champignons du sol (Keen et Montforts 2012). Toutefois, la présence d'AMRB dans le sol peut également découler de dépôts directs de matières fécales ou d'urine (par exemple, dans les pâturages), de l'utilisation de fumier (Heuer, Schmitt et Smalla 2011) ou des écoulements d'effluents (Wellington et al., 2013). Cela

pourrait représenter une voie de transmission cruciale pour maîtriser la propagation de la RAM (Heuer, Schmitt et Smalla 2011). On a également suggéré que la transmission aérienne pourrait jouer un rôle dans la dispersion de l'AMRB (Allen et al., 2011). Le vent pourrait favoriser la dispersion de petites particules de sol contaminées par des antibiotiques ou des AMRB.

Table 2: Classes d'antibiotiques couramment utilisés, produits par des microbes Classes (Bhat K & Bhat Panemangalore, 2022)

Classes	Mode action	Exemples	Espèces productrices
β-Lactams	Inhibe la synthèse de la paroi cellulaire bactérienne.	Penicillin Cephalosporin	Penicillium sp. Acremonium sp. (Précisément connu sous le nom de Cephalosporium sp.)
β-Lactams (Carbapenems)	Inhibe la synthèse de la paroi cellulaire bactérienne.	Thienamycin	Streptomyces cattleya
Tetracyclines	Inhibe la synthèse des protéines	Chlortetracycline Oxytetracycline	Streptomyces aureofaciens Streptomyces rimosus
Quinolones	Interfère avec la réplication et la transcription de l'ADN bactérien.		Pseudomonas sp Streptomyces
Lincosamide	Empêche la synthèse des protéines bactériennes.	Lincomycin	Streptomyces lincolnensis
Macrolides	Empêche la synthèse des protéines bactériennes	Erythromycin	*Saccharopolyspora erythraea* *Arthrobacter sp* Streptomyces antibioticus

Glycopeptides	Inhibe la synthése de la paroi cellulaire bactérienne.	Vancomycin	Amycolatopsis orientalis (anciennement connu sous le nom de Streptomyces orientalis)
		Neomycin	Streptomyces fradiae
Chloramphenicol	Inhibe la synthèse des protéines bactériennes, entraînant ainsi une croissance stagnante.	Chloramphenicol	Streptomyces venezuelae

Chapitre III :
L’effet combiné des antibiotiques

et Arthrospira platensis sur la croissance des plants de blé.

3- Croissance des plantes et biomasse

Figure 5 illustre la phénologie des plantes et la biomasse du colza sous les traitements EBL et OTC, appliqués individuellement ou combinés, pendant 7,14, et 21 jours. La taille des plantes et la biomasse ont montré une croissance significative avec l'augmentation du temps d'exposition dans les groupes de contrôle et de traitement. L'analyse de nos résultats était basée sur les différences entre les différents groupes de traitement des plantes au même moment. L'exposition prolongée au traitement OTC a significativement inhibé la taille et la biomasse des plantes par rapport au contrôle. Inversement, l'EBL exogène a légèrement favorisé la croissance des semis de colza. Après 7 et 14 jours, le traitement EBL+OTC a montré une augmentation de la taille et de la biomasse des plantes par rapport au contrôle, rétablissant efficacement la croissance du colza. Au 21e jour, la taille des plantes et la biomasse étaient significativement plus élevées dans le traitement EBL+OTC que dans le traitement OTC seul (Chen et al., 2025).

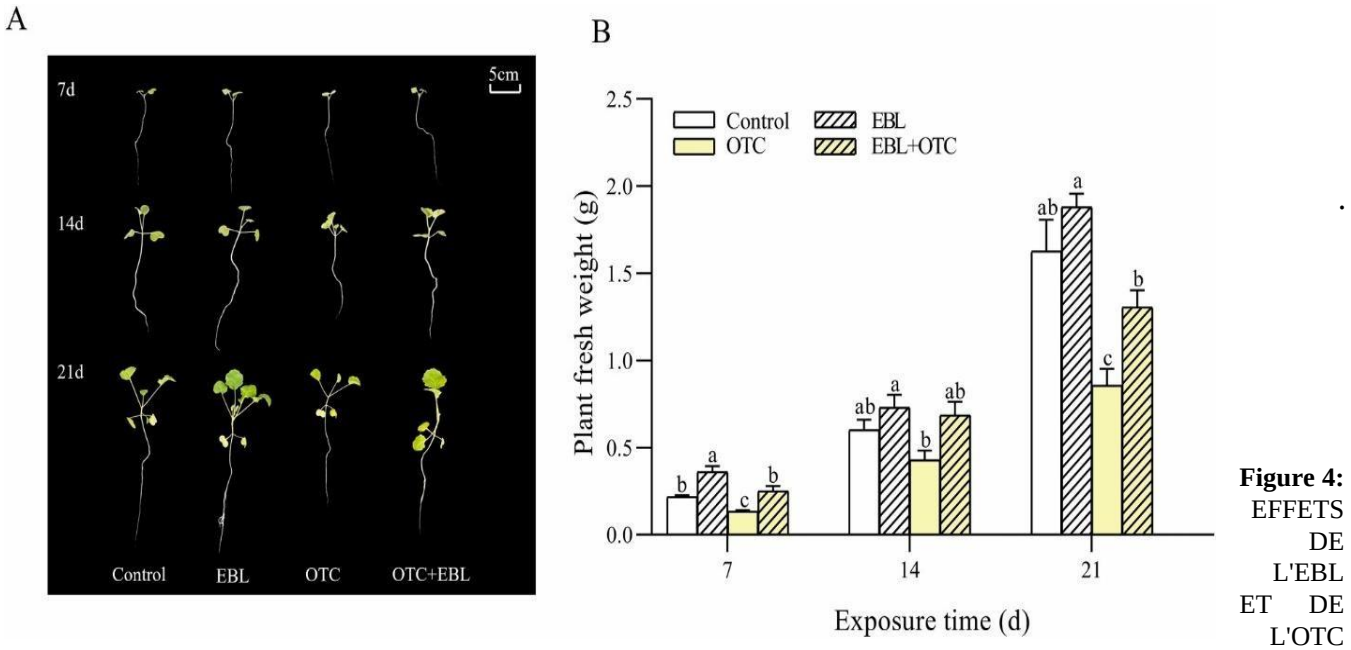


Figure 4: EFFETS DE L'EBL ET DE L'OTC SEULS OU EN COMBINAISON SUR LA CROISSANCE DES PLANTES (A) ET LA BIOMASSE (B) DES PLANTULES DE COLZA APRES 7, 14 ET 21 JOURS DES TRAITEMENTS RESPECTIFS. LES DONNEES SONT LES MOYENNES DE TROIS REPETITIONS (± SE).

3 .1- Réponse des plantes au stress oxydatif induit par les antibiotiques

L'antibiotique tétracycline est largement utilisé pour traiter les maladies humaines et animales et favoriser la croissance des animaux. Il est généralement trouvé dans le sol à des concentrations allant de µg/kg à mg/kg. Lorsqu'il est absorbé par les plantes, l'OTC peut nuire considérablement à leur croissance et à leur développement (Nguyen et al., 2024). Notre expérience a comparé des plantes exposées à une concentration environnementale d'OTC de 0,4 mg/L avec des plantes témoins. Les résultats ont montré que l'exposition à l'OTC induit une peroxydation des lipides des membranes cellulaires, inhibant ainsi la croissance des plantes et le développement. Parmi eux, le stress oxydatif diminue la biomasse végétale tout en augmentant la teneur en ROS et en MDA sous l'effet de l'exposition à l'OTC. La suraccumulation de ROS sur le site résulte de l'altération de l'état redox des cellules induite par l'exposition à l'OTC, conduisant à la production d'antioxydants induite par le stress et à l'activation des mécanismes antioxydants (Yang et al., 2024). Malgré une augmentation des activations des enzymes antioxydantes (SOD, GPX et APX) dues au stress de l'OTC, l'accumulation excessive de ROS est restée non corrigée. (Batish et al., 2006) ont montré que les niveaux élevés de métabolites secondaires sur le site pouvaient renforcer l'activité de l'enzyme antioxydante, améliorant ainsi la capacité de piégeage des ROS de l'organisme. Lorsque les plantes sont confrontées à un stress, les enzymes liées au métabolisme secondaire et leurs produits augmentent, car les plantes ont besoin de plus de substances secondaires de type métabolite pour se défendre contre les menaces de survie liées à un stress prolongé (Bajguz et Hayat, 2009).

3.2- Rôle d'*Arthrospira platensis* dans l'amélioration de la résistance du blé à la sécheresse en stimulant les systèmes physiologiques et biochimiques :

Les plantes peuvent être affectées par une variété de facteurs de stress abiotiques, incluant des facteurs météorologiques, tels que la sécheresse, le vent, et l'inondation à des facteurs saisonniers, tels que la lumière et la température, et des facteurs du sol, tels que le sol acide, les métaux lourds, et la salinité (Gr et al. 2021). Le stress de la sécheresse est un facteur de stress abiotique critique qui influence la croissance, le développement, et le rendement des plantes (Qi et al. 2018). Divers mécanismes biochimiques et physiologiques, y compris la fermeture des stomates, la réduction de l'activité antioxydante, la transpiration et la teneur en chlorophylle, sont généralement causés par le stress de la sécheresse (Fu et al. 2023). Dans les environnements de croissance normale, les plantes génèrent des espèces réactives de l'oxygène (ROS), telles que l'oxygène singulet (O_2), le radical superoxyde (O_2), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le radical hydroxyle (OH), mais leurs

concentrations sont généralement faibles (Abdelaal et al. 2022). Le stress dû à la sécheresse entraîne une augmentation de Les ROS ont une activité chimique élevée et provoquent la mort des cellules en raison du stress oxydatif sur l'ADN, les protéines, les hydrates de carbone, et les lipides (Saad-Allah et al. 2021). Le stress oxydatif peut empêcher la croissance des plantes en inhibant la respiration et les processus de photosynthèse. La peroxydation des lipides membranaires se produit lorsque l'équilibre entre l'accumulation des ROS et les systèmes de piégeage des radicaux libres est perturbé, ce qui entraîne des dommages membranaires et un déséquilibre dans le métabolisme des plantes (Gao et al. 2018). De faibles concentrations de ROS peuvent être utilisées comme des molécules de signalisation significatives dans des situations de sécheresse stress, bien que leur accumulation puisse conduire à la phytotoxicité et à la mortalité cellulaire. Les ROS sont un indicateur important dans les processus physiologiques des semences, tels que la germination et la dormance (Ahmad et al. 2022) production de ROS (Zhang et al. 2022b, a). Les plantes ont développé un système de défense antioxydant extrêmement efficace qui comprend une variété de types enzymatiques et non enzymatiques pour réduire les espèces réactives de l'oxygène (Laxa et al. 2019). La glutathion réductase (GR), la déhydroascorbate réductase (DHAR), l'ascorbate peroxydase (APX), la catalase (CAT), la peroxydase (POD) et la superoxyde dismutase (SOD) sont des exemples d'enzymes qui agissent en tant qu'antioxydants, tandis que les antioxydants non enzymatiques comprennent les tocophérols, les flavonoïdes, les phénols, les caroténoïdes et l'ascorbate (Huseynova 2012).

Diverses méthodes ont été utilisées pour améliorer la tolérance des plantes à la sécheresse. Ces stratégies dépendent de la capacité et de la sensibilité des plantes établies génétiquement, comme ainsi que de l'intensité et de la durée du stress (Laxa et al.2019).

3 .3- La résistance aux algues comme biocatalyseurs :

L'intérêt pour les biostimulants afin d'améliorer la tolérance à la sécheresse est croissant et l'utilisation d'extraits d'algues à cette fin devient de plus en plus populaire (Michalak et al. 2015). Les traitements avec des algues et des cyanobactéries peuvent augmenter la capacité des plantes à résister à la sécheresse. Par exemple, l'application de Spirulina platensis sur des plants d'arachide a amélioré leur capacité à résister au stress de la sécheresse (El Sayed et al., 2020) et *Kappaphycus alvarezii* a amélioré la résistance du blé à la sécheresse (Patel et al.2018). La spiruline sert de base à de nombreux produits à base de microalgues. L'analyse des extraits de microalgues et de cyanobactéries a permis d'identifier des composés probablement responsables de l'amélioration de la croissance, tels que les polyamines, les brassinostéroïdes et la bétaïne, en plus des vitamines et des micro, macronutriments, ainsi que des hormones telles que les gibbérellines, les cytokinines et les auxines (Grzesik et al. 2017

; Elgubbi et al.2019 ; Poveda 2021). La détermination du mode d'activité biostimulante de bioactifs spécifiques reste une question importante en raison de la variété des espèces d'algues et de cultures et de leurs interactions avec les variables abiotiques (Bulgari et al.
2019).

Deuxième partie : Etude expérimentale

Matériels et méthodes

Le blé figure parmi les cultures céréalières les plus cruciales à l'échelle mondiale. *Triticum aestivum L* (blé tendre) a été sélectionnée comme plante expérimentale pour la présente étude. Les graines de blé (type oued el bared) ont été acquises de l'OAIC (Bureau Algérien Interprofessionnel des Céréales) en Algérie.

4 .1- L'importance économique du blé :

L'importance économique du blé est considérable à l'échelle mondiale, nationale et locale. En tant que l'une des principales céréales cultivées dans le monde, le blé joue un rôle stratégique dans l'économie agricole, l'industrie agroalimentaire, le commerce international et la sécurité alimentaire.

Le blé est la matière première pour des produits de base comme le pain, les pâtes, les biscuits, la semoule et la farine.

Sa **valeur commerciale** est élevée, ce qui en fait un levier pour les balances commerciales nationales.

Il est souvent au cœur de négociations économiques et géopolitiques (sanctions, aides alimentaires, dépendances).

4.2- L'importance de sélectionner l'antibiotique oxytétracycline :

1. Présence fréquente dans l'environnement agricole :

L'oxytétracycline est largement utilisée en agriculture et en médecine vétérinaire. Elle peut se retrouver dans le sol via les eaux d'irrigation, les fumiers ou les déchets animaux. Il est donc pertinent d'évaluer son impact sur les cultures comme le blé.

2. Stabilité relative dans le sol :

Ce composé présente une stabilité modérée à élevée, ce qui lui permet de persister dans l'environnement et d'interagir avec les plantes durant de longues périodes.

3. Influence potentielle sur les processus physiologiques des plantes :

En tant qu'antibiotique, l'oxytétracycline peut perturber le microbiome autour des racines, affectant ainsi l'absorption des nutriments ou provoquant des effets directs sur la croissance du blé.

4. Facilité d'observation de ses effets :

Ses effets phytotoxiques peuvent être suivis à travers divers indicateurs :

* Ralentissement de la croissance (taille, biomasse)
* Décoloration ou nécrose des feuilles
* Modifications dans l'absorption de l'eau ou des nutriments
* Diminution de l'efficacité photosynthétique (chlorophylle)

5. Représentativité pour la famille des tétracyclines :

L'oxytétracycline est un bon représentant de la famille des tétracyclines, ce qui permet d'élargir les conclusions de l'étude à d'autres composés similaires.

Pour Conclure, l'utilisation d'oxytétracycline comme modèle pour tester la toxicité des antibiotiques sur le blé est justifiée. Elle permet une meilleure compréhension des risques environnementaux liés à la présence de résidus pharmaceutiques dans les systèmes agricoles (Han et al., 2021).

4.3- L'origine de la spiruline :

La spiruline Arthrospira platensis FOX BEHATAM, a été fournie par la ferme biologique ALKIRAM à Biskra en Algérie. Il a été cultivé par Dr Abd El Razakkiram. Des échantillons d'algues ont été prélevés le 22janvier 2025 et le 22avril 2025.

4.4- Préparation d'un extrait de la spéruline :

4.4.1- Broyage de la biomasse séchée

Pour une extraction uniforme, on réduit la poudre de spéruline en poudre fine dans un mortier, puis on pèse 8,7 g de poudre sur une balance analytique et on la transfère dans un bécher pour ajouter 330 ml d'eau distillée. On utilise alors un homogénéisateur ou un mixeur pour mélanger jusqu'à ce que la poudre soit entièrement dispersée et que la suspension soit uniforme et lisse. La suspension

homogénéisée est ensuite transférée dans des tubes à centrifuger de 50 ml, puis mise dans une centrifugeuse à 6000 rpm pendant 10 minutes. On recueille délicatement le surnageant par la suite, en évitant de perturber le culot, puis on l'utilise pour arroser les feuilles. Cette méthode permet de préparer efficacement l'extrait aqueux de Spirulina platensis (SPE) sans lyophilisateur, tout en préservant les composés bioactifs. Elle convient aux études biologiques, pharmaceutiques et antioxydantes (Parimi et al., 2015) .

4.5- Test de croissance :

4.5.1- protocole de stress des plantes

Les graines du cultivar de blé *(Triticum aestivum)* ont été désinfectées à l'aide d'une solution de chlorure mercurique (0,01 %) puis rincées à l'eau d'ionisée. Ensuite, les graines de blé ont été trempées dans l'eau pendant 8 à 12 heures (ou toute la nuit), puis égouttées. Les graines de blé ont ensuite été placées dans des boîtes dont le fond est percé de trous et dans lesquelles du papier humide a été placé pour retenir l'humidité dans un environnement chaud et lumineux, mais pas en plein soleil. Enfin, le papier a été aspergé d'eau tous les jours pour le maintenir humide. En quelques jours (2 à 3), les graines vont commencer à germer. Environ 10 à 15jours plus tard, nous aurons de jeunes pousses vertes. Les Semis de blé ont été semées dans des flacons de 250 ml contenant 50ml d'une solution nutritive de Hoagland diluée à 50 % (formule présentée dans le Tableau 3) enrichie en antibiotique (ANT). Chaque flacon contenait cinq plantules. Les plantules ont été exposées à différentes concentrations d'ANT : 0 (témoin, solution de Hoagland à 50 %), 50, 100 et 200 mg/L, afin d'étudier les effets d'un stress élevé induit par l'antibiotique (OTC) dans une culture hydroponique. Par la suite, On garde des exemplaires avec le traitement uniquement (CK, 50, 100, 200) et on ajoute d'autres avec un pulvérisateur de spéruline SPE à (0 mg/L ou 25 mg/L)(CK+SPE, 50+SPE, 100+SPE, 200+SPE).La concentration d'oxytétracycline a été déterminée en se basant sur sa concentration dans l'environnement ainsi que sur les concentrations utilisées dans des études phytotoxicologiques similaires(Mukhtar et al., 2020). La solution a été ajustée à un pH d'environ 7,0. La culture a été conduite en chambre de croissance contrôlée avec un photopériode 16/8 h (lumière/obscurité) et une intensité lumineuse de 6000 lux pendant la phase lumineuse. Les températures étaient de 25 °C (jour) et 18 °C (nuit), avec une humidité relative maintenue à 70 %. La concentration de 25 mg/L de SPE a été choisie sur la base de l'étude de El-Shazoly et al. (2024).

L'expérimentation a été conduite selon un dispositif factoriel totalement randomisé avec sept répétitions par traitement. Chaque bac hydroponique représentait une répétition, soit sept bacs par traitement, chacun contenant cinq plantules, soit un total de 35 plantules par traitement. Pour les mesures des paramètres de croissance, une plantule par bac a été prélevée. Une autre a été utilisée pour

les mesures physiologiques, tandis que les trois restantes ont servi à l'analyse des paramètres biochimiques. L'échantillonnage a été réalisé à 30 JAS afin d'évaluer l'effet du stress antibiotique seul ou en combinaison avec le SPE sur divers paramètres, incluant la croissance, la photosynthèse, les biomarqueurs de stress oxydatif, les systèmes de défense antioxydants, ainsi que l'accumulation d'osmolytes. Un schéma représentatif du dispositif expérimental est présenté à la Figure 6.

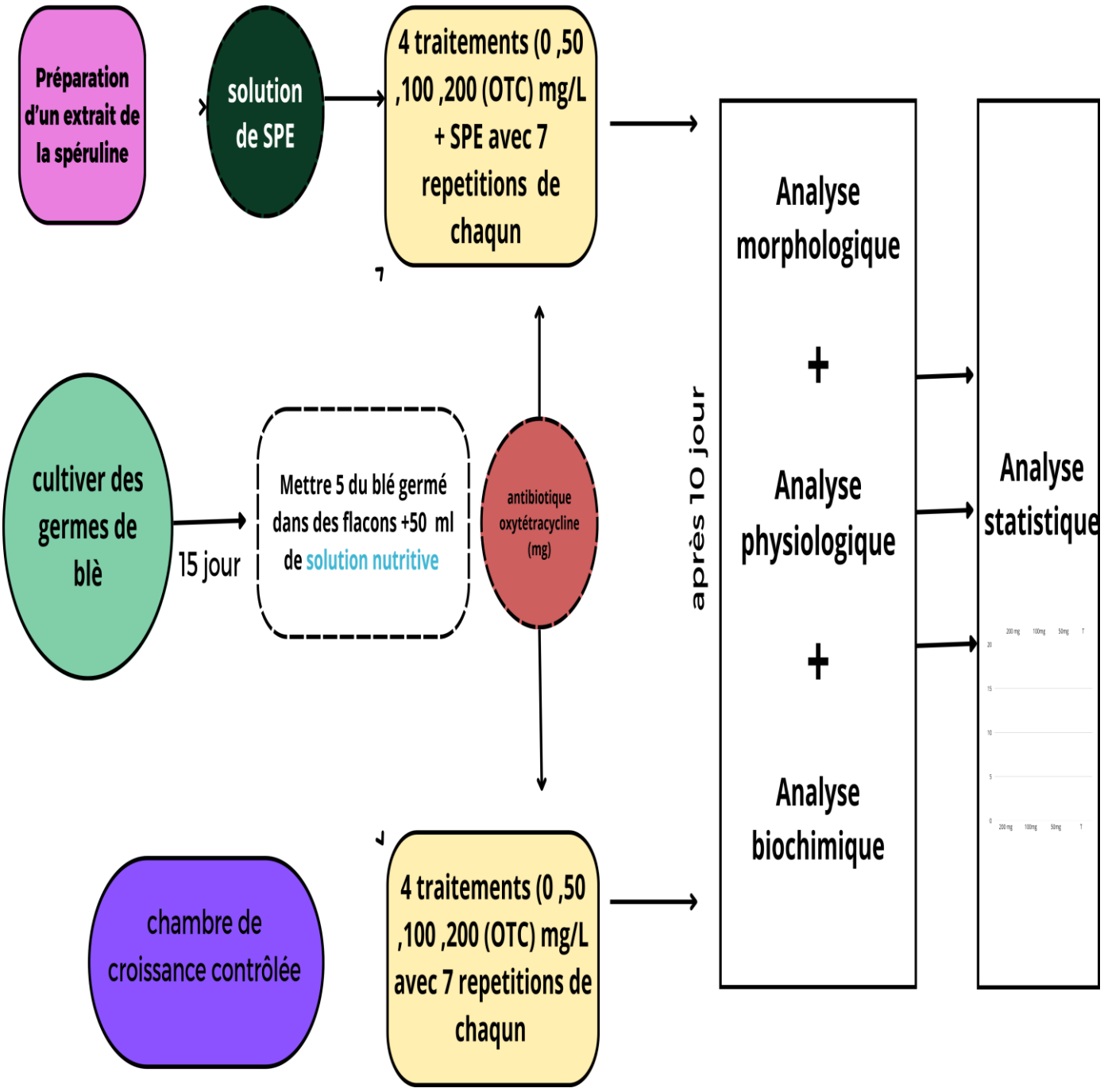


Figure 5: SCHEMA REPRESENTATRICE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

4.6- Milieu nutritif :

Pour favoriser la croissance des semis, on a utilisé le milieu nutritif Hoagland (1950). Il renferme des micronutriments (mg /L) ainsi que des macronutriments (g/L).

Voici ci-dessous la composition des milieux nutritifs complets :

Table 4: La composition des milieux nutritifs

Macronutriments :	**g/l**
Calcium nitrate Ca $(NO_3)_2$	0.271
Potassium nitrate KNO_3	0.126
Potassium dihydrogène phosphate KH_2PO_4	0.034
Magnésium sulfate $MgSO_4.7H_2O$	0.123
Micronutriments :	**mg/l**
Borique Acid H_3BO_3	1.430
Manganèse chlorite $MnCl_24H_2O$	0.910
Zinc sulfate $ZnSO_4.7H_2O$	0.110
Sodium molybdate Na_2MoO_4	0.045
Copper sulfate $CuSO_4.5H_2O$	0.045
Fe	9.680
Ethylene diamine tetra acetic Acid EDTA	30.00

4.7- Comportement de croissance :

4.7.1- Mesures de croissance

La croissance des semis traités a été évaluée en mesurant la longueur et le poids frais des plantules. L'évaluation de la taille des plantules a été effectuée individuellement à l'aide d'une échelle graduée (pied de coulisse). L'analyse de la masse fraîche des plantules a été effectuée en les pesant avec une balance numérique précise.

4.8- Extraction et estimation des pigments photosynthétiques :

4.8.1- Chlorophylle et caroténoïdes :

Chaque feuille de contrôle et chaque traitement ont été pesées à une masse de 50 mg. Ils ont été broyés dans un mortier et uniformisés dans de l'acétone à 80% (v/v). Les feuilles ont été rassemblées dans des tubes à essai et incubées à l'abri de la lumière. On a procédé à une mesure d'absorbance des échantillons à 663, 645 et 470 nm en utilisant un spectrophotomètre.

Les teneurs en chlorophylle totale et en caroténoïdes ont été estimées en suivant l'équation de Lichtenthaler (1987) :

- Chl a (μg/ml) = 12.25 (A663) – 2.79 (A645)
- Chl b (μg/ml) = 21.50 (A645) – 5.10 (A663)
- Car (μg/ml) = [(1000 A470 – 1.82 (Chl a) –85.02 (Chl b)] /198 Où :

Chl a = Chlorophylle a

Chl b = Chlorophylle b

Car = Caroténoïdes

4.9- Peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) :

L'analyse de la concentration en H_2O_2 a été effectuée sur les semis de *Triticum aestivum L.* contrôlés et traités, conformément à la méthode décrite par Velikova et al. (2000).

4.9.1- Réactifs :

- PPB (pH 7.0) : 10.0 mM
- Potassium iodide (KI) : 1.0 M
- Trichloroacetic acid (TCA) : 0.5 % (w/v)

4.9.2- Procédure :

Afin d'évaluer le contenu en H_2O_2, nous avons pesé 100 mg de feuilles fraîches et les avons homogénéisées dans 2 ml de TCA à 0,5%. Le mélange préparé a subi une centrifugation à 16000 tours par minute pendant une durée de 12 minutes à une température de 6 °C. On a préparé le mélange réactionnel en incorporant 0,5 ml de PPB (10 mM, pH 7,0), 1 ml de KI (1M) et 0,5 ml de surnageant (extrait enzymatique). On a évalué l'absorbance de la solution finale à 390 nm en comparaison avec le blanc. L'évaluation de H_2O_2 a été effectuée en se basant sur une courbe standard élaborée avec du H_2O_2.

4.10- Analyse des indices de dommages oxydatifs :

4.10.1- Estimation de la peroxydation lipidique : (MDA)

Dans le but d'évaluer la peroxydation lipidique chez les semis de *Triticum aestivum L*. traités et témoins, nous avons examiné le niveau d'équivalents MDA (malon dialdéhyde) qui est généré suite à la peroxydation des acides gras insaturés. Ainsi, pour l'étude de la peroxydation lipidique, le contenu en MDA a été évalué en utilisant la technique de Heath et Packer (1968).

4.10.2- Réactifs :

- Tampon phosphate (pH 7,0) : 50 Mm
- Acide 2thiobarbiturique (ATB) : 00,5 % (w/v)
- Acide trichloracétique (TCA) : 05% (p/v) dans DDW
- Acide trichloracétique (TCA) : 20 % (p/v) dans une solution de TBA

4.10.3- Procédure :

Afin d'évaluer le niveau de MDA, on a choisi 100 mg de feuilles que l'on a homogénéisées dans du TCA à 5%, puis centrifugées à 16 000 tours/minute pendant une durée de 12 minutes. Pour préparer le mélange réactionnel, contenant du TCA à 20% et du TBA à 0,5%, on a ajouté 0,5 ml d'extrait dans la solution et on a chauffé le tout à 95 °C pendant une durée de 60 minutes. Suite à l'échauffement, le mélange de réaction a été vite refroidi dans un bain de glace, puis centrifugé. Par la suite, on a mesuré l'absorbance de la solution réactionnelle à 532 et 600 nm. La valeur d'absorption non spécifique de chaque échantillon à 600 nm a été déduite de la valeur d'absorption à 532 nm.

4.11- Activité phénylalanine ammonia-lyase (PAL)

Le dosage de l'activité de la phénylalanine ammonia-lyase (PAL) chez les feuilles du blé consiste à broyer 500 mg de feuilles fraîches dans un tampon borate 50 mM (pH 8.8) contenant 5 mM de β-mercaptoéthanol et éventuellement 1 % de PVP, puis centrifuger à 12 000 g pendant 20 min à 4 °C pour obtenir l'extrait enzymatique. La réaction enzymatique se fait en incubant 0,5 ml d'extrait avec 0,5 ml de substrat L-phénylalanine 20 mM et 0,5 ml de tampon à 37 °C pendant 1 heure. La

réaction est arrêtée par addition de 0,2 ml d'HCl 6 N et l'absorbance est mesurée à 290 nm pour quantifier la formation d'acide trans-cinnamique, produit de l'activité PAL. L'activité enzymatique est exprimée en unités d'absorbance par heure et par mg de protéine, ou en µmol de trans-cinnamate formé par minute et par gramme de tissu, en utilisant un coefficient d'extinction molaire de 9630 $M^{-1}.cm^{-1}$.

4.12- Estimation du système de défense antioxydant non enzymatiques

4.12.1- Détermination de la teneur en proline

La teneur en proline des tissus foliaires du plant de blé a été estimée à l'aide du réactif de ninhydrine selon la procédure décrite par Bates, après quelques modifications mineures. L'échantillon de feuille (100 mg) a été homogénéisé dans 2 ml d'acide sulfosalicylique à 3 % et centrifugé. Un millilitre de solution a été ajouté à un millilitre d'acide. Le mélange réactionnel a ensuite été chauffé à 100 °C pendant 1 heure, puis refroidi dans un bain de glace. 2 ml de toluène ont été ajoutés au mélange réactionnel et ont été mélangés et agités vigoureusement. La phase aqueuse a été séparée du toluène contenant le chromophore supérieur. L'absorbance du toluène contenant le chromophore a été mesurée à 520 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-VIS.

4.13- Analyse des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques :

4.13.1- Estimation du système de défense antioxydant

4.13.2- Détermination des flavonoïdes totaux :

La teneur en flavonoïdes totaux dans les tissus foliaires a été quantifiée par la méthode du réactif au chlorure d'aluminium. L'extrait méthanol des échantillons de feuilles des plantes testées a été préparé en écrasant 100mg de tissus foliaires.

L'extrait méthanol des échantillons de feuilles de la plante testée a été préparé en écrasant 100mg de tissus foliaires dans 2 ml de méthanol aqueux à 80 % (w/v). L'échantillon a ensuite été placé dans la centrifugeuse à16000 rpm pendant 12min. Les surnageants ont été utilisés comme extrait de feuilles au méthanol pour la qualification de la teneur en flavonoïdes totaux. De plus, 0,5 ml d'extrait de feuille au méthanol a été mélangé avec 1 ml d'$AlCl_3$ éthanolique à 2% (w/v), et laissé reposer à 25 °C pendant une heure, la densité optique de la couleur jaune d'or a été mesurée. L'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis à une longueur d'onde de 420 nm ET 415 nm.

4.13.3- Détermination de la teneur en composés phénoliques totaux

La teneur totale en composés phénoliques a été analysée dans des échantillons frais de feuilles. L'extrait d'éthanol des échantillons de feuilles a été préparé en écrasant 100 mg de feuilles dans 2 ml d'éthanol aqueux à 80 % (m/v). L'échantillon a ensuite été placé dans une centrifugeuse à 16 000 rpm pendant 12 minutes, puis le surnageant a été utilisé comme extrait foliaire à l'éthanol pour La teneur en composés phénoliques totaux dans les tissus foliaires a été quantifiée par la méthode Folin-

Ciocalteu. Brièvement, dans un tube à essai, 1 ml de DDW a été ajouté à 200 µl d'extrait éthanolique, puis 100 µl de réactif phénolique de Folin-Ciocalteu ont été ajoutés et bien mélangés. Après un mélange adéquat, 2 ml de solution aqueuse de carbonate de sodium (2 %) ont été ajoutés. Les mélanges réactionnels ont ensuite été laissés au repos pendant 30 minutes à température ambiante, puis la densité optique a été lue à l'aide d'un spectromètre UV-Vis à une longueur d'onde de 750 nm.

4.14- Activité Glutathion-S-transférase (GST) *:*

Nous avons examiné l'activité de la glutathion-S-transférase en suivant la technique de Habig et al. (1974), en faisant appel au CDNB (benzène 1-chloro, 2, 4-dinitro) comme substrat.

4.14.1- Réactifs :

- PPB (pH 6.3) : 100.0 mM
- 1-chloro, 2,4-dinitrobenzene (CDNB) : 003.0 mM (w/v in PPB ; pH 6.3)
- Glutathion réduite (GSH) : 120.0 mM

4.14.2- Procédure :

Pour évaluer l'activité GST, on a pesé 100 mg de feuilles fraîches provenant de plants témoins et traités de Triticum aestivum L, puis on les a homogénéisées dans 2 ml de PPB à 100 mM (pH 6,3). Ensuite, la solution homogène a été centrifugée à 16 000 tours/minute pendant une durée de 12 minutes à une température de 4°C. Les surnageants ont été collectés pour une analyse future sous la forme d'extrait enzymatique. La réaction a été initiée en combinant 0,3 ml de CDNB (3 mM), 0,3 ml de GSH (120 mM), 2,3 ml de PPB (100 mM, pH 6,3) et 0,1 ml d'extrait enzymatique. Un spectrophotomètre UV-VIS a enregistré le changement d'absorbance du mélange réactionnel à 340 nm pendant une durée d'une minute à 25 ° C.

4.15- Détermination de la teneur en glutathion réduit (GSH)

100 mg de feuilles ont été homogénéisés dans 5,0 ml de tampon KH_2PO_4/K_2HPO_4 glacé (50,0 mM), puis l'homogénat a été centrifugé pendant 15 minutes à 20 000 × g (à 4 °C). Le GSH a été déterminé en mélangeant 0,1 ml d'extrait avec une solution tampon de KH_2PO_4 50 mM - EDTA 2,5 mM (pH 7,5) et du DTNB 0,6 mM dans du Tris-HCl 200 mM (pH 8,0). Le mélange réactionnel a été incubé pendant 10 minutes à 30 °C et le taux de variation de l'absorbance a été mesuré à 412 nm.

Résultats

5- Caractéristiques morphologiques

Notre étude a été menée afin de caractériser les impacts phytotoxicologiques d'oxytétracycline (ANT) sur *Triticum aestivum* (Figure 7). Les résultats indiquent que le traitement avec l'oxytétracycline a exercé un effet inhibiteur sur la croissance du blé, effet qui devient plus marqué avec l'augmentation de la concentration (Figures 8 et 2A-D). Sous les traitements à 50, 100 et 200 mg/L d'oxytétracycline, la longueur des tiges était significativement inférieure à celle du groupe témoin. De plus, après traitement avec 50, 100 et 200 mg/L d'oxytétracycline, le poids frais des tiges et des racines ainsi que la longueur des racines étaient tous significativement réduits par rapport au témoin. Plus précisément, comparativement au témoin, la longueur des tiges a diminué de 14 ,58 %, 22,55 %, et 27,58 % aux concentrations de 50, 100 et 200 mg/L respectivement ; la longueur des racines de 28,1 %, 49,2 %, et 54,65 % ; le poids frais des tiges de 26,45 %, 33 ,76 %, et 44,59 % ; et le poids frais des racines de 30,09 %, 54,87 %, et 60,18%.



Figure 6: EFFET D'UN TRAITEMENT FOLIAIRE AU SPE 25 MG/L, EN PRESENCE ET EN ABSENCE DE STRESS ANTIBIOTIQUE (OXYTETRACYCLINE), SUR LE PHENOTYPE DU BLE.

Les Figures 7 et 8(A-D) montrent que l'exposition au stress antibiotique entraîne une baisse significative de la croissance du *Triticum aestivum*. Le traitement le plus élevé (200 mg/L d'oxytétracycline) a provoqué des effets dévastateurs sur les paramètres de croissance, avec une

réduction de la longueur des racines (RL) de 54,65 %, de la longueur des tiges (SL) de 27,58 %, du poids frais des racines (RFW) de 60,18 % et du poids frais des tiges (SFW) de 44,59 % par rapport au traitement témoin (0 mg/L d'ANT). Fait intéressant, l'application foliaire du SPE a amélioré la croissance en renforçant de manière significative tous les attributs étudiés, en conditions de stress ou non. Le traitement au SPE a augmenté la RL de 9 ,2 % et 20,52 %, la SL de 7,67 % et 8,62 %, le RFW de 3,53 % et 35,4 %, et le SFW de 18,63 % et 17,38 % dans les plantules traitées avec 25 mg/L de SPE et 200 mg/L d'oxytétracycline + SPE, comparativement aux témoins respectifs (0 mg/L et 200 mg/L d'oxytétracycline seul).

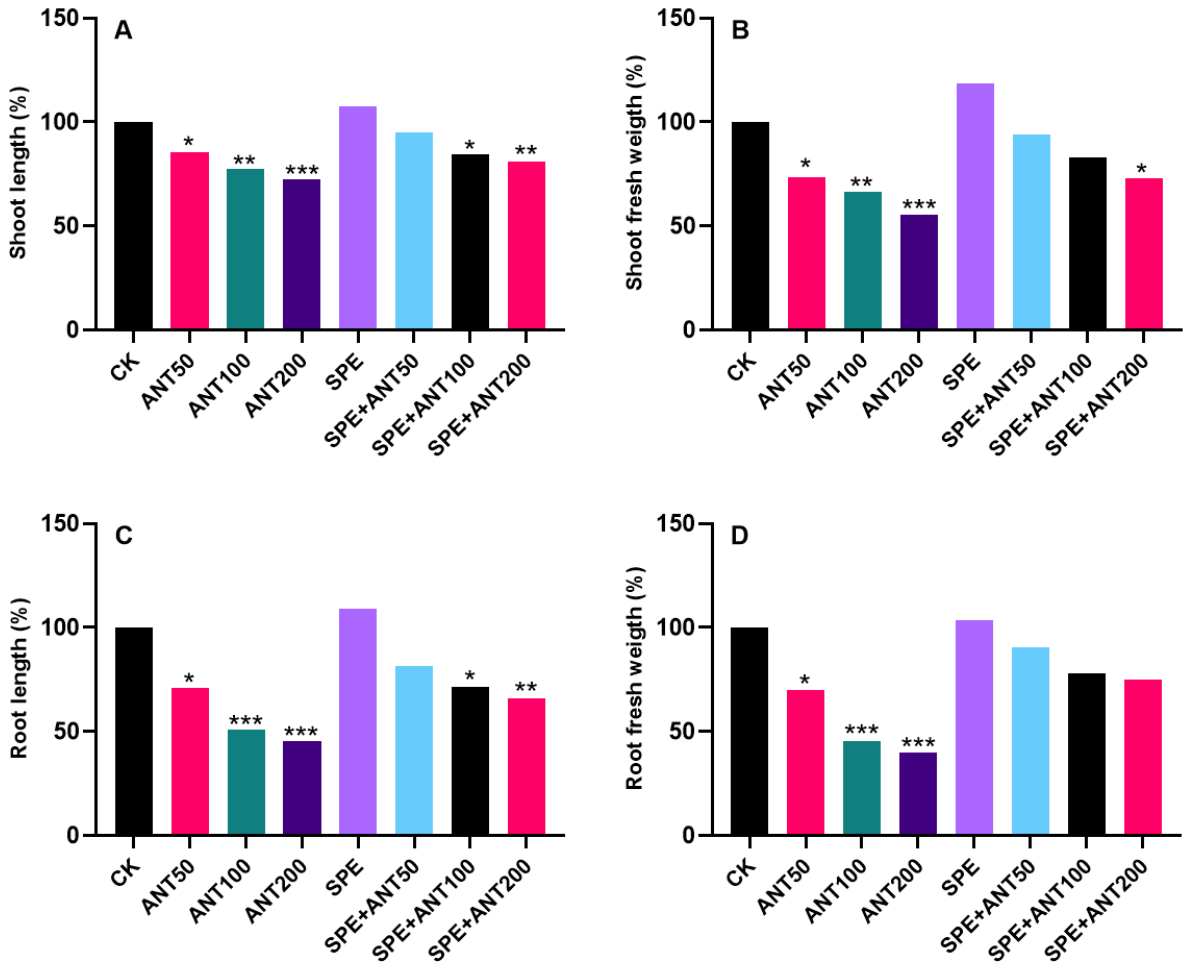


Figure 7: EFFET DE L'APPLICATION FOLIAIRE DE SPE EN PRESENCE OU EN ABSENCE DE STRESS A L'OXYTETRACYCLINE SUR LA LONGUEUR DES TIGES PAR PLANT (A), LA MASSE FRAICHE DES TIGES PAR PLANT (B), LA LONGUEUR DES RACINES PAR PLANT (C), ET LA MASSE FRAICHE DES RACINES .

6- Pigments photosynthétiques

L'antibiotique (oxytétracycline) a entraîné une réduction significative de la teneur totale en chlorophylle des pousses, avec une diminution de 24,18 %, 27,1 %, 31,68 % (Figure 3A), aux concentrations de 50, 100 et 200 mg/L respectivement. De même, la teneur en caroténoïdes des plantules traitées aux différentes concentrations d'ANT a également diminué de 21,53 %, 31,55 %, 35,06 % selon une tendance croissant avec la concentration.

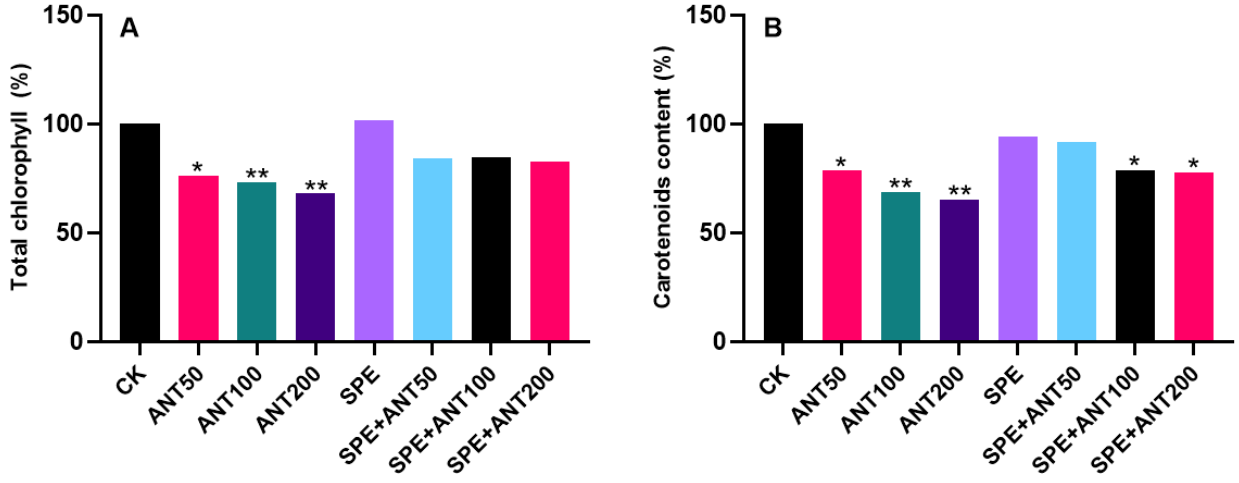


Figure 8: EFFET DE L'APPLICATION FOLIAIRE DE SPE EN PRESENCE OU EN ABSENCE DE STRESS A L'OXYTETRACYCLINE SUR LA TENEUR EN CHLOROPHYLLE (A) ET LA CONCENTRATION EN CAROTENOÏDES (B) DU BLE.

Les Figures 09 (A-B) indiquent que l'augmentation de la concentration d'oxytétracycline réduit significativement les pigments photosynthétiques des plantules de blé par rapport au témoin.

Le traitement de stress à 200 mg/L d'ANT a généré les valeurs les plus faibles en pigments photosynthétiques. L'application foliaire du SPE a permis d'atténuer les effets négatifs induits par l'ANT en augmentant significativement les pigments photosynthétiques, à savoir la chlorophylle totale et les caroténoïdes. Le traitement au SPE a amélioré la teneur en chlorophylle de 14,38 %, et en caroténoïdes de 12,82 % chez les plantules traitées respectivement avec (200 mg/L d'ANT + SPE), comparé au témoins respectif (200 mg/L d'oxytétracycline seul).

7- Biomarqueurs de stress oxydatif :

Les teneurs en H_2O_2 et en MDA sont utilisées pour évaluer l'ampleur des dommages oxydatifs induits par l'antibiotique utilisé (oxytétracycline). Les Figures 10 (A-B) montrent qu'une augmentation de la concentration en oxytétracycline entraîne une hausse marquée et linéaire des biomarqueurs de stress

dans les feuilles de blé. Les niveaux de H_2O_2 augmentent significativement après l'application d'ANT. Plus précisément, les traitements à 50 et 100 mg/L d'ANT ont induit des niveaux de H_2O_2 représentant 114,87 % et 134,71 % de ceux du groupe témoin, respectivement. Le traitement à 200 mg/L a augmenté la teneur en H_2O_2 de 209,09 % et celle en MDA de 237,5 % par rapport aux plantules témoins. L'application de SPE a atténué les dommages dus au stress antibiotique en réduisant les teneurs en H_2O_2 et en MDA. Le traitement au SPE a réduit les teneurs en H_2O_2 de 49,59 %, et en MDA de 177,09 %, comparativement au témoin correspondant (200 mg/L d'oxytétracycline seuls).

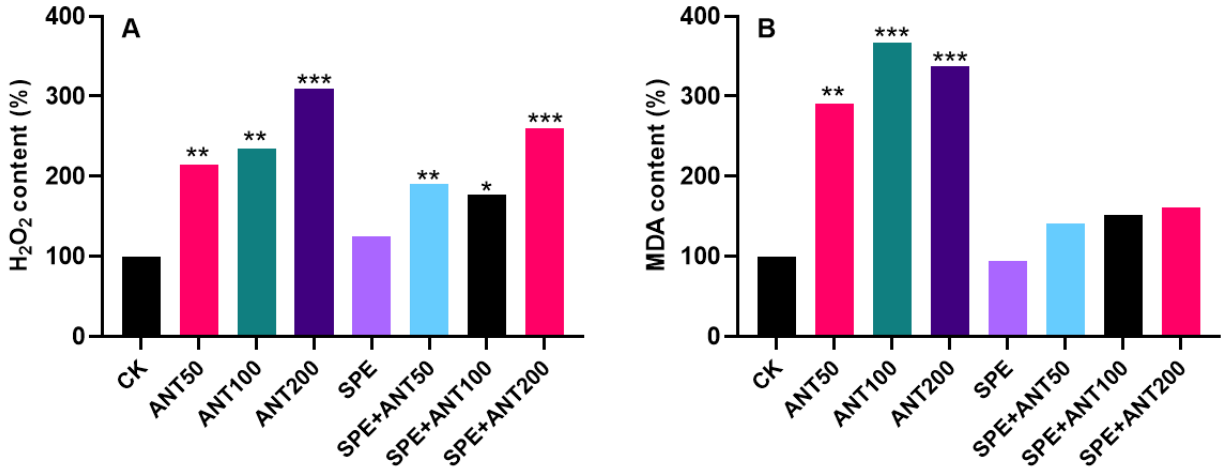


Figure 9: EFFET DE L'APPLICATION FOLIAIRE DE SPE EN PRESENCE OU EN ABSENCE DE STRESS D'OXYTETRACYCLINE SUR LA TENEUR PEROXYDE D'HYDROGENE (A) ET LA TENEUR EN MALONDIALDEHYDE (B) DU BLE.

8- Réponses des enzymes antioxydantes

La Figure 11(A) révèle que les plantules stressées par l'ANT présentent une diminution de l'activité de la GST. Parmi les traitements, celui à 200 mg/L d'ANT a montré la baisse la plus significative de l'activité de la GST (33,03 %). L'application foliaire de SPE sur les plantules, qu'elles soient stressées ou non, a augmenté l'activité de la GST. Cette activité a été accrue de 27,5 % chez les plantules traitées avec 200 mg/L d'ANT + SPE, comparées aux témoins.

L'activité de la PAL a augmenté avec la concentration croissante en oxytétracycline (Figure 5 B). Des hausses significatives ont été observées à 50, 100 et 200 mg/L, avec des augmentations de

76,92 %, 196,33 %, et 275 ,09 % par rapport aux témoins. L'application de SPE a également augmenté l'activité de la PAL de 135,16 % et 73,26 % chez les plantules traitées avec 25 mg/L de SPE et 200 mg/L d'ANT + SPE, par rapport aux témoins.

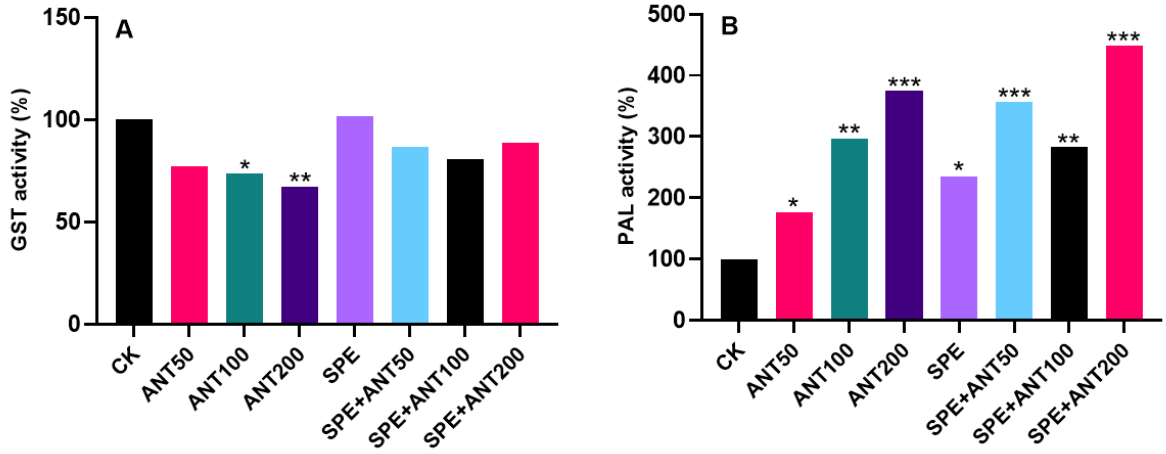


Figure 10: EFFET DE L'APPLICATION FOLIAIRE DE SPE EN PRESENCE OU EN ABSENCE DE STRESS A L'OXYTETRACYCLINE SUR LES ACTIVITES DE GST (A) ET PAL (B) DU BLE.

9- Glutathion réduit et teneur en proline

Les Figures 12(A-B) montrent que les plantules exposées aux ANT ont une augmentation significative des teneurs en GSH et en proline. Le traitement à 200 mg/L d'ANT a montré l'augmentation la plus importante : GSH de 36, 4 % et proline de 161 ,48 % par rapport aux témoins. L'application foliaire de SPE a amélioré de manière significative la teneur en GSH et en proline sous conditions stressées ou non. L'application de SPE a diminué la teneur en GSH de 9,71 % et celle en proline a augmenté de 45,94 %, comparée aux témoins (200 mg + SPE).

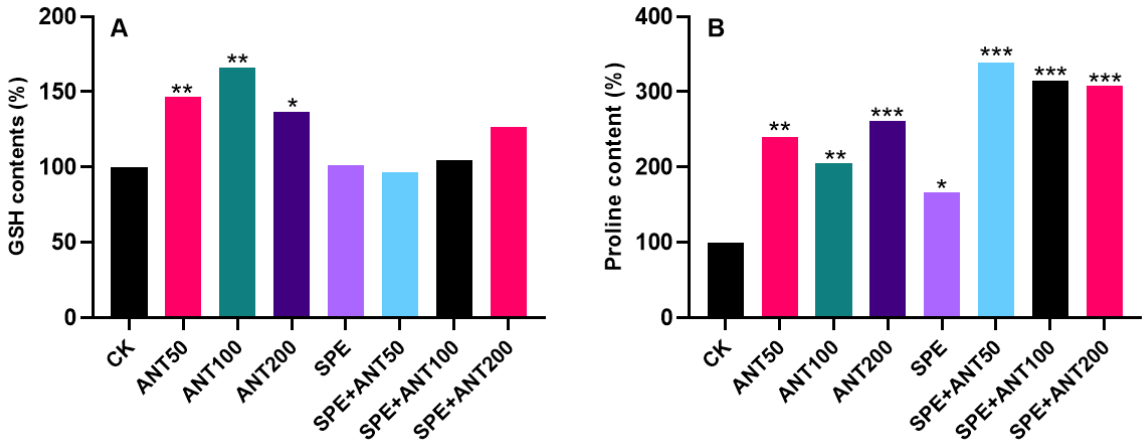


Figure 11: EFFET DE L'APPLICATION FOLIAIRE DE SPE EN PRESENCE OU EN ABSENCE DE STRESS A L'OXYTETRACYCLINE SUR LES TENEURS EN GSH (A) ET PROLINE (B) DU BLE.

10- Réponse des métabolites secondaires

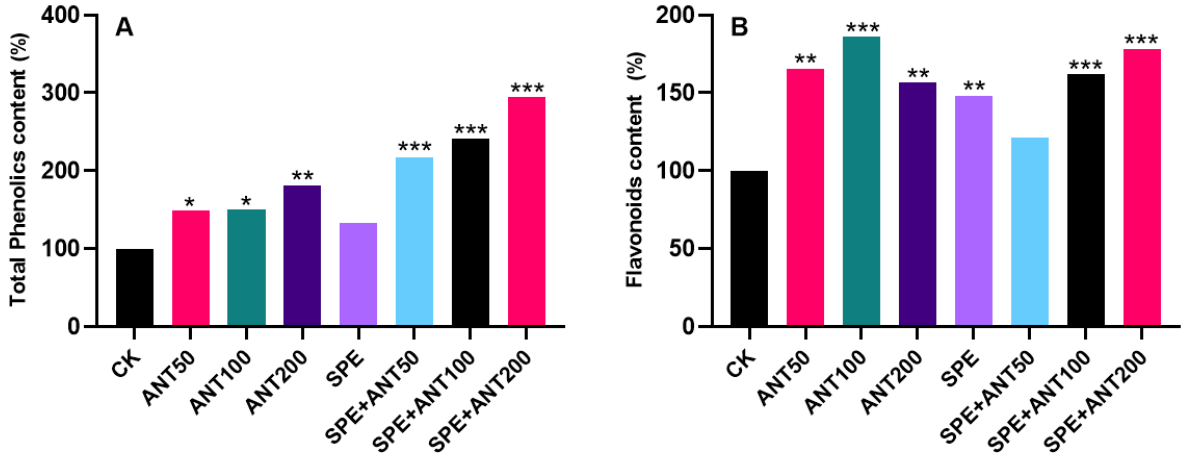


Figure 12: EFFET DE L'APPLICATION FOLIAIRE DE SPE EN PRESENCE OU EN ABSENCE DE STRESS A L'OXYTETRACYCLINE SUR LES TENEURS EN POLYPHENOLS (A) ET LA TENEUR EN FLAVONOÏDES (B) DU BLE.

Les Figures 13(A-B) indiquent que les plantules stressées par l'oxytétracycline présentent une augmentation des métabolites secondaires. Le traitement à 200 mg/L d'ANT a entraîné les augmentations les plus fortes, avec des hausses de la teneur en polyphénols totaux (TPC) de 81,15 % et en flavonoïdes totaux (TFC) de 52,96% par rapport aux témoins. Le traitement au SPE a également permis d'augmenter la teneur en TPC de 32,54 % et 113,49 % et en TFC de 48,23 % et 21,03 %, dans les conditions 25 mg/L de SPE et 200 mg/L d'ANT + SPE, par rapport aux témoins.

Discussion

Nous avons étudié les rôles protecteurs de l'extrait de spiruline (SPE) dans l'amélioration de la tolérance et du métabolisme des antibiotiques chez les plantules de blé, ainsi que dans l'atténuation des effets phytotoxiques. Cette étude s'est concentrée sur les caractéristiques de croissance du blé, les pigments, les marqueurs de stress oxydatif, les systèmes enzymatiques de défense antioxydantes et de détoxification, ainsi que le mécanisme de régulation induit par la spiruline des enzymes sensibles au stress impliquées par l'oxytétracycline dans le métabolisme des polluantes. À ce jour, seules quelques études ont exploré comment le SPE affecte et contrôle la phytotoxicité d'oxytétracycline chez les plantules de blé. Dans la présente étude, les diminutions observées de l'élongation, de la biomasse fraîche et de la concentration en chlorophylle indiquent qu'une accumulation élevée d'oxytétracycline réduit considérablement la croissance des plantules (Fig. 7 et 8A–D). Cependant, l'apport de SPE a nettement atténué les effets négatifs d'oxytétracycline sur ces paramètres de croissance (Fig. 8A–D).

Nos résultats confirment les travaux antérieurs selon lesquels le SPE agit comme un biostimulant, en favorisant l'expression de protéines liées à la croissance et au développement, et en corrigeant les déficits de production de chlorophylle en augmentant la biomasse et les concentrations en chlorophylle (Baltazar et al., 2021).

En agriculture et en élevage, les antibiotiques sont largement utilisés pour contrôler les ravageurs et les maladies afin de protéger les cultures et les animaux d'élevage (Iwu et al., 2020). Certains antibiotiques sont directement libérés dans l'environnement, tandis que d'autres s'y infiltrent par la fertilisation à base de fumier animal (Yang et al., 2025). La présence d'antibiotiques dans l'environnement n'affecte pas seulement la croissance des plantes, mais peut également nuire à la stabilité et au développement de l'industrie de l'élevage et de l'aquaculture (Zha et al., 2023). Plusieurs approches ont été employées pour atténuer la toxicité des antibiotiques chez les plantes cultivées. L'étude actuelle se concentre sur l'atténuation des effets délétères du stress induit par l'oxytétracycline chez le blé grâce à l'application exogène de spiruline.

Des études antérieures ont démontré que la SPE (extrait de spiruline) joue un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre osmotique, de l'homéostasie ionique et redox chez les plantes soumises à divers stress environnementaux, y compris les xénobiotiques. Par exemple, (R. A. Hamouda et al., 2022) a montré que l'application foliaire de SPE améliore efficacement les performances du blé en réduisant la génération de ROS d'une part et en renforçant la stabilité membranaire, l'accumulation d'osmolytes et de composés antioxydants d'autre part. En outre,

(Jalalian et al., 2024)ont rapporté que le traitement au SPE améliorait la croissance des fraisiers exposés au stress salin.

L'étude actuelle a démontré que l'augmentation des niveaux de stress oxytétracycline inhibait de manière linéaire les biomarqueurs de croissance (SL, SFW, RL, RFW) de la culture testée (Fig. 7et 8). Cette réduction de la croissance pourrait être liée au stress osmotique et oxydatif induit par l'oxytétracycline dans les feuilles de blé. Cette élévation du stress osmotique et oxydatif a conduit à une inhibition du transport et de l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs essentiels, nécessaires à une croissance optimale des plants de moutarde indienne, ce qui explique les faibles valeurs observées pour les paramètres de croissance (Fig. 7 et 8A-D). Ces résultats sont en accord avec les recherches précédentes menées par (Li et al., 2023), qui ont observé une diminution significative des biomarqueurs de croissance sous stress salin (NaCl).

La SPE a amélioré les performances de la culture testée, comme en témoigne l'amélioration des biomarqueurs de croissance (Fig. 7 et 8A-D). Cette amélioration pourrait être attribuée à son rôle potentiel dans la stabilisation des membranes, l'amélioration de l'efficacité photosynthétique et de l'activité enzymatique, ainsi que dans la réduction du stress osmotique et ionique (Xu et al., 2023). Il semble que la SPE stabilise les membranes cellulaires, maintenant ainsi leur intégrité. Cette stabilisation est cruciale pour prévenir les fuites du contenu cellulaire et maintenir la viabilité des cellules en conditions de stress. Des résultats similaires ont été rapportés concernant l'effet du SPE sur l'atténuation du stress salin chez plusieurs espèces végétales (Rady et al., 2023).

La photosynthèse est un processus physiologique important, sensible à divers facteurs environnementaux. Des études antérieures ont montré que le stress chimique (oxytétracycline) réduit drastiquement la teneur en chlorophylle (Chl) chez diverses plantes (Touzout et al. 2025). Les données actuelles indiquent que le stress oxytétracycline diminue de façon linéaire la Chl, chez les plantules du blé (Fig. 9). Des résultats similaires ont été observés chez la tomate, la menthe poivrée et la moutarde indienne (Minden et al., 2017), où le stress xénobiotique réduisait significativement l'efficacité photosynthétique. La réduction de la teneur en chlorophylle peut être attribuée à l'oxydation des pigments par les ROS et à l'accumulation d'oxytétracycline dans les tissus foliaires, d'une part, et à l'augmentation de la dégradation des pigments chlorophylliens par la synthèse accrue de l'enzyme chlorophyllase, d'autre part (Touzout et al. 2021).

La génération de ROS (espèces réactives de l'oxygène) est une conséquence inévitable du stress abiotique, entraînant divers désordres métaboliques tels que des dommages aux membranes cellulaires,

la peroxydation des lipides, le stress oxydatif, l'inactivation enzymatique et la mort cellulaire (Touzout et al. 2024a et b). Dans notre étude, l'explosion oxydative induite par l'oxytétracycline a été évaluée en estimant la teneur en MDA, associée à l'augmentation du H_2O_2 et de la mort cellulaire (viabilité) chez les plantules du blé. Le stress oxytétracycline a considérablement augmenté les niveaux de MDA et H_2O_2, ce qui indique la gravité de la dégradation des membranes cellulaires et des dommages oxydatifs chez les plantules (Fig. 4). Cette augmentation de la production de ROS peut être liée à la déstabilisation de l'équilibre cellulaire induite par l'oxytétracycline. Nos résultats s'accordent avec ceux de (Liu et al., 2025)et (Cui et al., 2022), qui ont noté une augmentation similaire de la production de ROS avec des concentrations croissantes d'oxytétracycline.

Cependant, l'apport de SPE aux plantules exposées au oxytétracycline a réduit les dommages oxydatifs induits par les ROS en diminuant considérablement la mort cellulaire, les teneurs en MDA et H_2O_2. Ce potentiel du SPE à réduire les niveaux de biomarqueurs de stress peut être attribué à l'amélioration de la stabilité membranaire, de l'intégrité cellulaire, à l'accumulation d'osmolytes (Fig. 4) et à la régulation positive des enzymes antioxydantes, réduisant ainsi la production excessive de biomarqueurs du stress oxydatif. L'inversement corrélé entre les paramètres de croissance et les biomarqueurs de stress oxydatif (MDA et H_2O_2).

Les plantes possèdent un système de défense complexe pour se protéger contre les effets nocifs induits par les ROS. Ce système comprend un réseau d'éléments enzymatiques et non enzymatiques de bas poids moléculaire. Les enzymes CAT, POX et SOD sont des éléments clés de ce système de défense antioxydant enzymatique, principalement responsables de l'élimination des ROS et positivement associés à la tolérance au stress (Touzout et al. 2024 ; Touzout et al. 2025). La SOD catalyse la dismutation de $O_2^{\bullet -}$ en H_2O_2, tandis que la POX et la CAT dégradent le H_2O_2 en H_2O et en oxygène moléculaire (Touzout et al. 2021). Le SPE est un biostimulant crucial pour la survie des plantes en conditions de stress oxydatif, responsables de la stabilisation des structures cellulaires, de la régulation de l'équilibre osmotique et de l'élimination des ROS (Sun et al., 2024).

Les données montrent que le stress oxytétracycline augmente la production de ROS, accompagné d'une activité accrue des enzymes GST et PAL ainsi qu'une hausse des niveaux d'osmolytes (Proline). L'augmentation observée de l'activité de la GST est probablement due à une plus grande formation de ROS induite par l'oxytétracycline, tandis que l'activité accrue de la PAL pourrait être liée à la surproduction de H_2O_2 induite par le stress, indiquant l'activation du mécanisme de défense antioxydant de la plantule. Le traitement complémentaire au SPE sur les plantules stressées a encore

renforcé l'activité des enzymes antioxydantes et la teneur en osmoprotecteurs (proline) chez le blé (Fig. 5). Cette augmentation des activités enzymatiques antioxydantes et de proline peut être liée à la régulation positive, médiée par le SPE, des gènes impliqués dans la synthèse des enzymes antioxydantes et des osmolytes (Ibrahim et al., 2024).

La réduction de la production de H_2O_2 chez les plantules stressées après traitement au SPE est également confirmée par les analyses biochimiques (Fig. 4). De nombreuses études appuient nos résultats : par exemple, (Mostafa et al., 2024) ont observé que le SPE atténue les dommages oxydatifs induits par l'accumulation de H_2O_2 chez les semis de tomate, en améliorant sensiblement les niveaux d'antioxydants et d'osmoprotecteurs. De même, (R. A. Hamouda et al., 2022)ont noté que le traitement par SPE améliore considérablement la tolérance au stress salin chez le blé en renforçant les activités enzymatiques antioxydantes.

Dans l'ensemble, l'application exogène du SPE peut efficacement atténuer les dommages induits par le stress et la toxicité de l'oxytétracycline chez les plantules de blé. L'un des mécanismes implique la promotion de la synthèse du glutathion (GSH). Le GSH régule le métabolisme des plantes, améliore l'élimination du H_2O_2 et réduit les dommages oxydatifs causés par les xénobiotiques ; contenant un groupement sulfhydryle réactif (-SH), il participe également à la dégradation des antibiotiques (Touzout et al., 2025). Notre étude a révélé que l'accumulation d'oxytétracycline dans les tissus du blé stimulait l'augmentation de la teneur en GSH, et que l'application exogène de SPE renforçait cette relation (Fig. 5A). La réduction de la phytotoxicité résulte principalement de la diminution de l'accumulation d'oxytétracycline dans les tissus du blé après traitement par SPE. Ce résultat est en accord avec (Gahlawat & Gauba, 2016), qui ont montré que l'application de SPE chez *Brassica juncea* réduisait l'accumulation de polluantes et leur phytotoxicité. Dans la présente étude, nous avons analysé les effets de l'application exogène du SPE sur l'activité des enzymes métaboliques et les voies de métabolisme des xénobiotiques afin d'étudier le métabolisme d'oxytétracycline sous traitement SPE.

Les enzymes de biotransformation existent naturellement dans les plantes, la TPS jouant un rôle pivot dans la détoxification des antibiotiques en facilitant la conjugaison des polluants avec du GSH (glutathion) (Touzout et al. 2025). Dans cette étude, les activités de la GST dans les feuilles de blé après une exposition à l'oxytétracycline ont été évaluées. Comme prévu, l'activité de la GST a montré une réduction significative des plantules exposées à l'oxytétracycline (figure 5A). Cette activité de GST faible suggère une réponse protectrice contre les lésions oxydatives induites par l'exposition à

l'oxytétracycline. Conformément à nos résultats, les rapports précédents ont indiqué une réduction significative de l'activité enzymatique de la TPS dans les semis de blé sous exposition aux pesticides (Touzout et al. 2024). L'application de SPE a inversé ces effets inhibiteurs, en améliorant de manière significative l'activité GST dans les plantules stressées (Fig. 5A). Cette amélioration pourrait être due à une meilleure perméabilité/stabilité membranaire, d'une part, et à une activation de l'expression des gènes impliqués dans la synthèse de la GST, d'autre part. Des améliorations similaires de l'activité GST ont été rapportées sous stress salin (Talaat & Todorova, 2022).

Les métabolites phénylpropanoïdes jouent un rôle clé dans la détoxification des ROS, en particulier dans des conditions de stress HM (Touzout et al. 2023). En accord avec le rôle des flavonoïdes et des polyphénols dans la promotion de la tolérance des plantes au stress abiotique, notre étude révèle l'importance principale des métabolites secondaires dans l'amélioration de la tolérance des plantules de blé au stress xénobiotique (Touzout et al. 2024). Le stress dû à l'oxytétracycline entraîne une augmentation de l'accumulation de H2O2 et un éclatement oxydatif subséquent dans les feuilles de blé. Cependant, l'application de SPE semble réguler la voie des phénylpropanoïdes dans les semis de blé, améliorant ainsi la capacité des semis à résister au déséquilibre redox causé par l'oxytétracycline (Sharma et al., 2019).

Des recherches futures devraient déterminer si l'application de spiruline peut accroître la tolérance du blé ou d'autres cultures (comme le riz et le soja) à divers xénobiotiques (pesticides et produits pharmaceutiques) et favoriser leur dégradation et métabolisme. Il sera également crucial de mener des essais à grande échelle en conditions réelles pour valider les résultats en laboratoire. En outre, l'étude des effets synergiques potentiels de la spiruline en combinaison avec des biostimulants végétaux pourrait améliorer encore l'efficacité de réduction des risques environnementaux liés aux résidus d'antibiotiques dans la production agricole. De tels efforts contribueraient au développement de stratégies plus efficaces et durables pour la remédiation des sols contaminés par les antibiotiques.

Conclusion

L’exposition des plantules de blé aux ANT a provoqué un déséquilibre photosynthétique et des poussées oxydatives sévères, entraînant une réduction significative de la croissance. Toutefois, l'application foliaire du SPE a joué un rôle essentiel dans la tolérance aux antibiotiques, en atténuant les effets néfastes induits par le stress. En renforçant les systèmes de défense internes, le traitement a amélioré l’homéostasie redox, la perméabilité membranaire, la viabilité cellulaire, ainsi que la teneur en osmolytes et en antioxydants enzymatiques.

Ainsi, *Arthrospira platensis* semble protéger les protéines/enzymes contre la dénaturation et l’agrégation, en formant une couche protectrice autour d’elles, préservant leur structure et leur fonction, ce qui est crucial pour le maintien de l’activité métabolique en conditions de stress. Ces résultats soulignent le potentiel du SPE comme stratégie économique pour atténuer le stress antibiotique chez les cultures non ciblées. Par conséquent, la spiruline devrait être considérée comme un outil biotechnologique supplémentaire dans l’industrie agricole pour limiter les dommages liés aux xénobiotiques et potentiellement à d’autres stress environnementaux.

Le mécanisme d’action sous-jacent reste un obstacle clé à l’avancement de la recherche sur les biostimulants microalgaux, indépendamment du type de microalgue utilisé. Des études supplémentaires sont nécessaires pour explorer les interactions synergiques et le mode d’action fondamental du biostimulant microalgal. Ce travail contribue à une meilleure compréhension des interactions plante–biostimulant et souligne le besoin de recherches supplémentaires pour élucider les mécanismes qui les régissent, en particulier en présence de divers stress liés aux xénobiotiques. Les recherches futures devraient déterminer si l'application de spiruline peut accroître la tolérance du blé ou d’autres cultures (ex. riz, soja) à d’autres types de xénobiotiques (ex. pesticides, produits pharmaceutiques), favoriser leur dégradation et leur métabolisme dans les plantes, et valider ces résultats par des essais à grande échelle en conditions réelles. De plus, l'étude des effets synergiques potentiels entre spiruline et autres biostimulants végétaux pourrait encore améliorer l'efficacité de réduction des risques environnementaux liés aux résidus d'antibiotiques dans la production agricole.

Ces efforts contribueraient au développement d’approches plus efficaces et durables pour la réhabilitation des sols contaminés par les antibiotiques.

Références Bibliographiques

Les Références Bibliographiques :

- Abdelaal, K., Alsubeie, M. S., Hafez, Y., Emeran, A., Moghanm, F., Okasha, S., Omara, R., Basahi, M. A., Darwish, D. B. E., Ibrahim, M. F. M., El-Yazied, A. A., Rashwan, E. A., Elkelish, A., Mady, M. A., & Ibraheem, F. (2022). Physiological and Biochemical Changes in Vegetable and Field Crops under Drought, Salinity and Weeds Stresses: Control Strategies and Management. *Agriculture (Switzerland)*, *12*(12), 2084. https://doi.org/10.3390/agriculture12122084
- Ahmad, A., Aslam, Z., Javed, T., Hussain, S., Raza, A., Shabbir, R., Mora-Poblete, F., Saeed, T., Zulfiqar, F., Ali, M. M., Nawaz, M., Rafiq, M., Osman, H. S., Albaqami, M., Ahmed, M. A. A., & Tauseef, M. (2022). Screening of Wheat (Triticum aestivum L.) Genotypes for Drought Tolerance through Agronomic and Physiological Response. *Agronomy*, *12*(2), 287. https://doi.org/10.3390/agronomy12020287
- Alp, H., Varol, S., Celik, M. M., Altas, M., Evliyaoglu, O., Tokgoz, O., Tanrverdi, M. H., & Uzar, E. (2012). Protective effects of beta glucan and gliclazide on brain tissue and sciatic nerve of diabetic rats induced by streptozosin. *Experimental Diabetes Research*, *2012*, 1–7. https://doi.org/10.1155/2012/230342
- Aminov, R. I. (2009). The role of antibiotics and antibiotic resistance in nature. *Environmental Microbiology*, *11*(12), 2970–2988. https://doi.org/10.1111/j.14622920.2009.01972.x
- Bajguz, A., & Hayat, S. (2009). Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, *47*(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002
- Bajguz, A., & Hayat, S. (2009). Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, *47*(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002
- Bajguz, A., & Hayat, S. (2009). Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, *47*(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002
- Baltazar, M., Correia, S., Guinan, K. J., Sujeeth, N., Bragança, R., & Gonçalves, B. (2021). Recent advances in the molecular effects of biostimulants in plants: An overview. *Biomolecules*, *11*(8), 1096. https://doi.org/10.3390/biom11081096
- Batish, D. R., Singh, H. P., Setia, N., Kaur, S., & Kohli, R. K. (2006). 2-Benzoxazolinone (BOA) induced oxidative stress, lipid peroxidation and changes in some antioxidant enzyme activities in mung bean (Phaseolus aureus). *Plant Physiology and Biochemistry*, *44*(11–12), 819–827. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.10.014
- Bengtsson-Palme, J., & Larsson, D. G. J. (2016). Concentrations of antibiotics predicted to select for resistant bacteria: Proposed limits for environmental regulation. *Environment International*, *86*, 140–149. https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.015
- Bhat K, U., & Bhat Panemangalore, D. (2022). Microbes–Surfaces Interactions. In *Application of Microbes in Environmental and Microbial Biotechnology.* (pp. 473–499). https://doi.org/10.1007/978-981-16-2225-0_16
- Bombaywala, S., Mandpe, A., Paliya, S., & Kumar, S. (2021). Antibiotic resistance in the environment: a critical insight on its occurrence, fate, and eco-toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(20), 24889–24916. https://doi.org/10.1007/s11356-02113143-x

- Brito-Lopez, C., van der Wielen, N., Barbosa, M., & Karlova, R. (2025). Plant growthpromoting microbes and microalgae-based biostimulants: sustainable strategy for agriculture and abiotic stress resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *380*(1927), 20240251. https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0251
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, *9*(6), 306. https://doi.org/10.3390/agronomy9060306
- Carballo, M., Rodríguez, A., & de la Torre, A. (2022). Phytotoxic Effects of Antibiotics on Terrestrial Crop Plants and Wild Plants: A Systematic Review. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *82*(1), 48–61. https://doi.org/10.1007/s00244-021-00893-5
- Carballo, M., Rodríguez, A., & de la Torre, A. (2022). Phytotoxic Effects of Antibiotics on Terrestrial Crop Plants and Wild Plants: A Systematic Review. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *82*(1), 48–61. https://doi.org/10.1007/s00244-021-00893-5
- Chantziaras, I., Boyen, F., Callens, B., & Dewulf, J. (2014). Correlation between veterinary antimicrobial use and antimicrobial resistance in food-producing animals: a report on seven countries. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, *69*(3), 827–834. https://doi.org/10.1093/jac/dkt443
- Chen, R., Peng, R. D., Meng, X., Zhou, Z., Chen, B., & Kan, H. (2013). Seasonal variation in the acute effect of particulate air pollution on mortality in the China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES). *Science of The Total Environment*, *450–451*, 259–265. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.040
- Chen, S., Zhou, S., Xuan, X., Niu, L., Zhao, L., Guo, J., & Xu, D. (2025). 24-Epibrassinolide Regulates Oxytetracycline-Induced Phytotoxicity and Its Detoxification Mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *290*, 117763. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117763
- Chen, Z., Wang, J., Chen, H., Wen, Y., & Liu, W. (2017). Enantioselective Phytotoxicity of Dichlorprop to Arabidopsis thaliana: The Effect of Cytochrome P450 Enzymes and the Role of Fe. *Environmental Science and Technology*, *51*(20), 12007–12015. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04252
- Cui, M., Yu, S., Yu, Y., Chen, X., & Li, J. (2022). Individual and Combined Effects of Microplastics and Oxytetracycline on Cherry Radish. In *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4098837
- Dai, Z. H., Guan, D. X., Bundschuh, J., & Ma, L. Q. (2023). Roles of phytohormones in mitigating abiotic stress in plants induced by metal(loid)s As, Cd, Cr, Hg, and Pb. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *53*(13), 1310–1330. https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2134694
- Dupuis, C., Berthon, J. Y., Larue, J., Rougé, S., Filaire, M., & Filaire, E. (2018). Effects of 6 weeks of betaine or C-phycocyanin supplementation associated or not with wheel running on redox status. *Science and Sports*, *33*(1), 47–55. https://doi.org/10.1016/j.scispo.2017.08.006
- Elgubbi, H., Zrmoh, M., Alzarride, A., Adam, M., & El-Zaidy, M. (2019). Enhanced Growth and Yield Parameters of Tomato (Solanum lycopersicum L.) var. peto 111 Plant Using Cladophoropsis gerloffii Aqueous Extract Foliar. *EC Nutrition, 1*(2019), 60–67. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j. nut.2018.09.015

- El-Sayed, S., Ramadan, A. A. E. M., & Hellal, F. (2020). Drought stress mitigation by application of algae extract on peanut grown under sandy soil conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*, *19*(3), 230–239. https://doi.org/10.3923/ajps.2020.230.239
- El-Shazoly, R. M., Aloufi, A. S., & Fawzy, M. A. (2024). The Potential Use of Arthrospira (Spirulina platensis) as a Biostimulant for Drought Tolerance in Wheat (Triticum aestivum L.) for Sustainable Agriculture. *Journal of Plant Growth Regulation*, *44*(2), 686–703. https://doi.org/10.1007/s00344-024-11473-x
  Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M. (2014). Drought Stress in Wheat during Flowering and Grain-filling Periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *33*(4), 331–349. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291
- Franche, C., & Reynaud, P. A. (1986). Characterization of several tropical strains of Anabaena and Nostoc: Morphological and physiological properties, and plasmid content. *Annales de l'Institut Pasteur Microbiology*, *137*(1), 179–197. https://doi.org/10.1016/S07692609(86)80023-0
- Gahlawat, S., & Gauba, P. (2016). Phytoremediation of aspirin and tetracycline by Brassica juncea. *International Journal of Phytoremediation*, *18*(9), 929–935. https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1131230
- Gaignard, C. (2019). *Criblage , identification et caractérisations physico-chimiques d ' exopolysaccharides de microalgues et Cyanobactéries*. *322*, 1–322. https://tel.archivesouvertes.fr/tel-03738066
- Gao, W., Zhang, Y., Feng, Z., Bai, Q., He, J., & Wang, Y. (2018). Effects of melatonin on antioxidant capacity in naked oat seedlings under drought stress. *Molecules*, *23*(7), 1580. https://doi.org/10.3390/molecules23071580
- Gauley, A., & Boden, S. A. (2019). Genetic pathways controlling inflorescence architecture and development in wheat and barley. *Journal of Integrative Plant Biology*, *61*(3), 296–309. https://doi.org/10.1111/jipb.12732
- Gharib, F. A. E. L., & Ahmed, E. Z. (2023). Spirulina platensis improves growth, oil content, and antioxidant activitiy of rosemary plant under cadmium and lead stress. *Scientific Reports*, *13*(1), 8008. https://doi.org/10.1038/s41598-023-35063-1
- Gr, S., Yadav, R. K., Chatrath, A., Gerard, M., Tripathi, K., Govindsamy, V., & Abraham, G. (2021). Perspectives on the potential application of cyanobacteria in the alleviation of drought and salinity stress in crop plants. *Journal of Applied Phycology*, *33*(6), 3761–3778. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02570-5
- Grzesik, M., Romanowska-Duda, Z., & Kalaji, H. M. (2017). Effectiveness of cyanobacteria and green algae in enhancing the photosynthetic performance and growth of willow (Salix viminalis L.) plants under limited synthetic fertilizers application. *Photosynthetica*, *55*(3), 510–521. https://doi.org/10.1007/s11099-017-0716-1
- Guedes, F. R. C. M., Maia, C. F., Silva, B. R. S. da, Batista, B. L., Alyemeni, M. N., Ahmad, P., & Lobato, A. K. da S. (2021). Exogenous 24-Epibrassinolide stimulates root protection, and leaf antioxidant enzymes in lead stressed rice plants: Central roles to minimize Pb content and oxidative stress. *Environmental Pollution*, *280*, 280. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116992
- Hamouda, M. M., Saad-Allah, K. M., & Gad, D. (2022). Potential of Seaweed Extract on Growth, Physiological, Cytological and Biochemical Parameters of Wheat (Triticum aestivum L.) Seedlings. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *22*(2), 1818–1831. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00774-3

- Hamouda, R. A., Shehawy, M. A., Mohy El Din, S. M., Albalwe, F. M., Albalawi, H. M. R., & Hussein, M. H. (2022). Protective role of Spirulina platensis liquid extract against salinity stress effects on Triticum aestivum L. *Green Processing and Synthesis*, *11*(1), 648–658. https://doi.org/10.1515/gps-2022-0065
- Han, T., Wang, B., Wu, Z., Dai, C., Zhao, J., Mi, Z., Lv, Y., Zhang, C., Miao, X., Zhou, J., Li, X., Sun, Z., Yang, J., Zhai, W., Zheng, F., Chen, Z., & Zhang, B. (2021). Providing a view for toxicity mechanism of tetracycline by analysis of the connections between metabolites and biologic endpoints of wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *212*, 111998. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111998

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science and Technology*, *46*(6), 3060–3075. https://doi.org/10.1021/es2031505

- Ibrahim, M. I. M., Ahmed, A. T., El-Dougdoug, K. A., & El Nady, G. H. (2024). Harnessing

Spirulina Extract to Enhance Drought Tolerance in Wheat: A Morphological, Molecular Genetic and Molecular Docking Approach. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, H. Botany*, *15*(2), 73–94. https://doi.org/10.21608/eajbsh.2024.397935

- Iwu, C. D., Korsten, L., & Okoh, A. I. (2020). The incidence of antibiotic resistance within and beyond the agricultural ecosystem: A concern for public health. *MicrobiologyOpen*, *9*(9). https://doi.org/10.1002/mbo3.1035
- Jalalian, S., Ebrahimzadeh, A., Zahedi, S. M., Becker, S. J., Hayati, F., Hassanpouraghdam, M. B., & Rasouli, F. (2024). Chlamydomonas sp. extract meliorates the growth and physiological responses of "Camarosa" strawberry (Fragaria × ananassa Duch) under salinity stress. *Scientific Reports*, *14*(1), 22436. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72866-2
- Kacienė, G., Dikšaitytė, A., Januškaitienė, I., MišKelytė, D., Sujetovienė, G., Dagiliūtė, R., &

Žaltauskaitė, J. (2024). Veterinary antibiotics differ in phytotoxicity on oilseed rape grown over a wide range of concentrations. *Chemosphere*, *356*, 141977. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141977

- Kammerscheit, X. (2019). *Rôles des glutathion-S-transférases chez la cyanobactérie modèle Synechocystis PCC 6803*. Université Paris Saclay (COmUE).
- Kemper, N. (2008). Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. *Ecological Indicators*, *8*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.06.002
- Khabazzadeh, H., Kermani, E. T., Afzali, D., Amiri, A., & Jalaladini, A. (2012). Efficient one-pot synthesis of polyhydroquinoline derivatives using Cs2.5H0.5PW12O40 as a heterogeneous and reusable catalyst in molten salt media. *Arabian Journal of Chemistry*, *5*(2), 167–172. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.08.009
- Khabazzadeh, H., Kermani, E. T., Afzali, D., Amiri, A., & Jalaladini, A. (2012). Efficient one-pot synthesis of polyhydroquinoline derivatives using Cs2.5H0.5PW12O40 as a heterogeneous and reusable catalyst in molten salt media. *Arabian Journal of Chemistry*, *5*(2), 167–172. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.08.009
- Kim Tiam, S., Comte, K., Dalle, C., Delagrange, M., Djediat, C., Ducos, B., Duval, C., Feilke, K., Hamlaoui, S., Le Manach, S., Setif, P., Yéprémian, C., Marie, B., Kirilovsky, D.,

Gugger, M., & Bernard, C. (2022). The success of the bloom-forming cyanobacteria Planktothrix: Genotypes variability supports variable responses to light and temperature stress. *Harmful Algae*, *117*, 102285. https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102285

- Kimiyukiisatoh, J.-R., & Allakhverdievveditors, S. (2021). *Advances in Photosynthesis and Respiration Including Bioenergy and Related Processes 47 Photosynthesis: Molecular*

Approaches tooSolar Energy Conversion. www.life.uiuc.edu/govindjee/Reference-Index.htm

- Kiss, É., Kós, P. B., Chen, M., & Vass, I. (2012). A unique regulation of the expression of the psbA, psbD, and psbE genes, encoding the D1, D2 and cytochrome b559 subunits of the Photosystem II complex in the chlorophyll d containing cyanobacterium

Acaryochloris marina. *Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics*, *1817*(7), 1083–1094. https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2012.04.010

- Kołodziejska, M., Maszkowska, J., Białk-Bielińska, A., Steudte, S., Kumirska, J., Stepnowski, P., & Stolte, S. (2013). Aquatic toxicity of four veterinary drugs commonly applied in fish farming and animal husbandry. *Chemosphere*, *92*(9), 1253–1259. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.04.057

Košćak, L., Lamovšek, J., Lukić, M., Kovačević, T. K., Đermić, E., Goreta Ban, S., Major, N., & Godena, S. (2024). Varietal Susceptibility of Olive to Pseudomonas savastanoi pv. savastanoi and the Antibacterial Potential of Plant-Based Agents. *Microorganisms*, *12*(7), 1301. https://doi.org/10.3390/microorganisms12071301

- Košćak, L., Lamovšek, J., Lukić, M., Kovačević, T. K., Đermić, E., Goreta Ban, S., Major, N., & Godena, S. (2024). Varietal Susceptibility of Olive to Pseudomonas savastanoi pv. savastanoi and the Antibacterial Potential of Plant-Based Agents. *Microorganisms*, *12*(7),

1301. https://doi.org/10.3390/microorganisms12071301

- Košćak, L., Lamovšek, J., Lukić, M., Kovačević, T. K., Đermić, E., Goreta Ban, S., Major, N., & Godena, S. (2024). Varietal Susceptibility of Olive to Pseudomonas savastanoi pv. savastanoi and the Antibacterial Potential of Plant-Based Agents. *Microorganisms*, *12*(7),

1301. https://doi.org/10.3390/microorganisms12071301

- Kovalakova, P., Cizmas, L., McDonald, T. J., Marsalek, B., Feng, M., & Sharma, V. K. (2020). Occurrence and toxicity of antibiotics in the aquatic environment: A review. *Chemosphere*, *251*, 126351. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126351
- Kumar, K., Gupta, S. C., Baidoo, S. K., Chander, Y., & Rosen, C. J. (2005). Antibiotic Uptake by Plants from Soil Fertilized with Animal Manure. *Journal of Environmental Quality*, *34*(6), 2082–2085. https://doi.org/10.2134/jeq2005.0026
- Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K., & Dietz, K. J. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. *Antioxidants*, *8*(4), 94. https://doi.org/10.3390/antiox8040094
- Li, L., Li, T., Liu, Y., Li, L., Huang, X., & Xie, J. (2023). Effects of antibiotics stress on root development, seedling growth, antioxidant status and abscisic acid level in wheat (Triticum aestivum L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *252*, 114621. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114621
- Li, Y., Zhang, Y., Wang, D., Zhao, J., Yu, H., Chen, Y., & Yang, J. (2025). Effect of antibiotics on diverse aquatic plants in aquatic ecosystems. *Aquatic Toxicology*, *281*, 107289. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2025.107289
- Li, Z. J., Xie, X. Y., Zhang, S. Q., & Liang, Y. C. (2011). Wheat growth and photosynthesis as affected by oxytetracycline as a soil contaminant. *Pedosphere*, *21*(2), 244–250. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60124-0
- Li, Z. jun, Xie, X. yu, Zhang, S. qing, & Liang, Y. chao. (2011). Negative effects of oxytetracycline on wheat (triticum aestivum l.) growth, root activity, photosynthesis, and chlorophyll contents. *Agricultural Sciences in China*, *10*(10), 1545–1553.

https://doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60150-8

- Liu, F., Ying, G.-G., Tao, R., Zhao, J.-L., Yang, J.-F., & Zhao, L.-F. (2009). Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities.

Environmental Pollution, *157*(5), 1636–1642. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.021

- Liu, X., Zhu, J., Liang, J., Li, F., Meng, R., Ma, X., & Xiong, M. (2025). Ecotoxicological effects of individual and combined treatments of chlortetracycline and oxytetracycline on seed germination and seedling growth of wheat (Triticum aestivum L.). *Journal of Environmental Quality*. https://doi.org/10.1002/jeq2.70045
- Maringue, C., & Chahory, S. (2019). An update on tetracyclines: Interest in veterinary ophthalmology. *Revue Veterinaire Clinique*, *54*(1), 23–28. https://doi.org/10.1016/j.anicom.2018.10.003
- McCorquodale-Bauer, K., Grosshans, R., Zvomuya, F., & Cicek, N. (2023). Critical review of phytoremediation for the removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in wastewater. *Science of the Total Environment*, *870*, 161876. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161876

McEvoy, J. P., & Brudvig, G. W. (2006). Water-splitting chemistry of photosystem II. *Chemical Reviews*, *106*(11), 4455–4483. https://doi.org/10.1021/cr0204294

- Michalak, I., Dmytryk, A., Wieczorek, P. P., Rój, E., Łęska, B., Górka, B., Messyasz, B., Lipok, J., Mikulewicz, M., Wilk, R., Schroeder, G., & Chojnacka, K. (2015). Supercritical

Algal Extracts: A Source of Biologically Active Compounds from Nature. *Journal of Chemistry*, *2015*, 1–14. https://doi.org/10.1155/2015/597140

- Michalak, I., Dmytryk, A., Wieczorek, P. P., Rój, E., Łęska, B., Górka, B., Messyasz, B., Lipok, J., Mikulewicz, M., Wilk, R., Schroeder, G., & Chojnacka, K. (2015). Supercritical

Algal Extracts: A Source of Biologically Active Compounds from Nature. *Journal of Chemistry*, *2015*, 1–14. https://doi.org/10.1155/2015/597140

- Minden, V., Deloy, A., Volkert, A. M., Leonhardt, S. D., & Pufal, G. (2017). Antibiotics impact plant traits, even at small concentrations. *AoB PLANTS*, *9*(2), plx010. https://doi.org/10.1093/aobpla/plx010
- Mostafa, M. M., Hammad, D. M., Reda, M. M., & El-Sayed, A. E.-K. B. (2024). Water extracts of Spirulina platensis and Chlorella vulgaris enhance tomato (Solanum lycopersicum

L.) tolerance against saline water irrigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(17), 21181–21191. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04460-x

- Mukhtar, A., Manzoor, M., Gul, I., Zafar, R., Jamil, H. I., Niazi, A. K., Ali, M. A., Park, T. J., & Arshad, M. (2020). Phytotoxicity of different antibiotics to rice and stress alleviation upon application of organic amendments. *Chemosphere*, *258*, 127353. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127353
- Munita, J. M., & Arias, C. A. (2016). Mechanisms of Antibiotic Resistance. In *Virulence Mechanisms of Bacterial Pathogens* (pp. 481–511). ASM Press. https://doi.org/10.1128/9781555819286.ch17
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, *22*(5), 867–880. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232
- Nguyen, A. H., Youn, S., Yang, Y., & Oh, S. (2024). Alkaline-modified biochar and nitrifying microbiome synergistically mitigate the toxicity of oxytetracycline and its toxic byproducts. *Chemical Engineering Journal*, *481*, 148527. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148527

- Nguyen, A. H., Youn, S., Yang, Y., & Oh, S. (2024). Alkaline-modified biochar and nitrifying microbiome synergistically mitigate the toxicity of oxytetracycline and its toxic byproducts. *Chemical Engineering Journal*, *481*, 148527. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148527
- Okeke, E. S., Chukwudozie, K. I., Nyaruaba, R., Ita, R. E., Oladipo, A., Ejeromedoghene, O., Atakpa, E. O., Agu, C. V., & Okoye, C. O. (2022). Antibiotic resistance in aquaculture and aquatic organisms: a review of current nanotechnology applications for sustainable management. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(46), 69241–69274. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22319-y
- OUADA, H. B. E. N., & AMMAR, J. (2025). Production de biomasse et de bioactifs par les microalgues. *Mise En Œuvre Des Bioréacteurs Dans Le Domaine Des Industries Agroalimentaires: Cinétique, Modélisation et Technologies*, 247.
- Pan, M., & Chu, L. M. (2017). Transfer of antibiotics from wastewater or animal manure to soil and edible crops. *Environmental Pollution*, *231*, 829–836. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.051
- Parimi, N. S., Singh, M., Kastner, J. R., Das, K. C., Forsberg, L. S., & Azadi, P. (2015). Optimization of protein extraction from Spirulina platensis to generate a potential co-product

and a biofuel feedstock with reduced nitrogen content. *Frontiers in Energy Research*, *3*(JUN). https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00030

- Parmar, P., Kumar, R., Neha, Y., & Srivatsan, V. (2023). Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and circular bioeconomy based solutions. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1073546
- Patel, K., Agarwal, P., & Agarwal, P. K. (2018). Kappaphycus alvarezii sap mitigates abioticinduced stress in Triticum durum by modulating metabolic coordination and improves growth and yield. *Journal of Applied Phycology*, *30*(4), 2659–2673. https://doi.org/10.1007/s10811018-1423-4
- Patel, K., Agarwal, P., & Agarwal, P. K. (2018). Kappaphycus alvarezii sap mitigates abioticinduced stress in Triticum durum by modulating metabolic coordination and improves growth and yield. *Journal of Applied Phycology*, *30*(4), 2659–2673. https://doi.org/10.1007/s10811018-1423-4
- Patel, K., Agarwal, P., & Agarwal, P. K. (2018). Kappaphycus alvarezii sap mitigates abioticinduced stress in Triticum durum by modulating metabolic coordination and improves growth and yield. *Journal of Applied Phycology*, *30*(4), 2659–2673. https://doi.org/10.1007/s10811018-1423-4
- Poveda, J. (2021). Cyanobacteria in plant health: Biological strategy against abiotic and biotic stresses. *Crop Protection*, *141*, 105450. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105450
- Qin, Y., He, Z., Gao, F., & & Li, Y. (2020). Ecological risk assessment of antibiotics in marine and estuarine environments: A review. *Marine Pollution Bulletin*, *156*.
- Rady, M. M., Elrys, A. S., Selem, E., Mohsen, A. A. A., Arnaout, S. M. A. I., El-Sappah, A. H., El-Tarabily, K. A., & Desoky, E. S. M. (2023). Spirulina platensis extract improves the production and defenses of the common bean grown in a heavy metals-contaminated saline soil. *Journal of Environmental Sciences (China)*, *129*, 240–257. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.09.011
- Rezayian, M., Niknam, V., & Ebrahimzadeh, H. (2019). Stress response in cyanobacteria. *Iranian Journal of Plant Physiology*, *9*(3), 2773–2787. https://doi.org/10.1007/978-1-46848571-4_62
- Ruban, A. V., Johnson, M. P., & Duffy, C. D. P. (2012). The photoprotective molecular switch in the photosystem II antenna. *Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics*, *1817*(1), 167–181. https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2011.04.007
- Saad-Allah, K. M., Nessem, A. A., Ebrahim, M. K. H., & Gad, D. (2022). Evaluation of drought tolerance of five maize genotypes by virtue of physiological and molecular responses. *Agronomy*, *12*(1), 59. https://doi.org/10.3390/agronomy12010059
- Sánchez-Baracaldo, P., Bianchini, G., Wilson, J. D., & Knoll, A. H. (2022). Cyanobacteria and biogeochemical cycles through Earth history. *Trends in Microbiology*, *30*(2), 143–157. https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.05.008
- Sarmah, A. K., Meyer, M. T., & Boxall, A. B. A. (2006). A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*, *65*(5), 725–759. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.026
- Sengupta, S., Chattopadhyay, M. K., & Grossart, H.-P. (2013). The multifaceted roles of antibiotics and antibiotic resistance in nature. *Frontiers in Microbiology*, *4*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00047
- Sharma, A., Shahzad, B., Rehman, A., Bhardwaj, R., Landi, M., & Zheng, B. (2019). Response of Phenylpropanoid Pathway and the Role of Polyphenols in Plants under Abiotic Stress. *Molecules*, *24*(13), 2452. https://doi.org/10.3390/molecules24132452

- Smith, E., Gordon, R., Bourque, C., Campbell, A., Génermont, S., Rochette, P., & Mkhabela, M. (2009). Simulating ammonia loss from surface applied manure. *Canadian Journal of Soil Science*, *89*(3), 357–367. https://doi.org/10.4141/CJSS08047
- Sun, Y., Xie, X., & Jiang, C. J. (2024). Antioxidant Agriculture for Stress-Resilient Crop Production: Field Practice. *Antioxidants*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/antiox13020164
- Talaat, N. B., & Todorova, D. (2022). Antioxidant Machinery and Glyoxalase System Regulation Confers Salt Stress Tolerance to Wheat (Triticum aestivum L.) Plants Treated with Melatonin and Salicylic Acid. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *22*(3), 3527–3540. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00907-8
- Van Boeckel, T. P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B. T., Levin, S. A., Robinson, T. P., Teillant, A., & Laxminarayan, R. (2015). Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(18), 5649–5654. https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112
- Van Boeckel, T. P., Gandra, S., Ashok, A., Caudron, Q., Grenfell, B. T., Levin, S. A., & Laxminarayan, R. (2014). Global antibiotic consumption 2000 to 2010: An analysis of national pharmaceutical sales data. *The Lancet Infectious Diseases*, *14*(8), 742–750. https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)70780-7
- Velasco-Clares, D., Navarro-León, E., Izquierdo-Ramos, M. J., Blasco, B., & Ruiz, J. M. (2025). Enhancing Drought Tolerance in Lettuce: The Efficacy of the Seaweed-Derived Biostimulant Cytolan® Stress Applied at Different Growth Stages. *Horticulturae*, *11*(2), 157. https://doi.org/10.3390/horticulturae11020157
- Wang, K., Qiao, Y., Zhang, H., Yue, S., Li, H., Ji, X., & Liu, L. (2018). Bioaccumulation of heavy metals in earthworms from field contaminated soil in a subtropical area of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *148*, 876–883. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.058
- Xie, Y., Chen, L., Sun, T., & Zhang, W. (2021). Deciphering and engineering high-light tolerant cyanobacteria for efficient photosynthetic cell factories. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *30*, 82–91. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.11.002
- Xu, Q., Zhu, T., Zhao, R., Zhao, Y., Duan, Y., Liu, X., Luan, G., Hu, R., Tang, S., Ma, X., Liu, Y., Li, S., & Lu, X. (2023). Arthrospira promotes plant growth and soil properties under high salinity environments. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1293958
- Yang, G., Jiang, D., Huang, L. J., Cui, C., Yang, R., Pi, X., Peng, X., Peng, X., Pi, J., & Li, N. (2024). Distinct toxic effects, gene expression profiles, and phytohormone responses of Polygonatum cyrtonema exposed to two different antibiotics. *Journal of Hazardous Materials*, *466*, 133639. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133639
- Yang, G., Jiang, D., Huang, L. J., Cui, C., Yang, R., Pi, X., Peng, X., Peng, X., Pi, J., & Li, N. (2024). Distinct toxic effects, gene expression profiles, and phytohormone responses of Polygonatum cyrtonema exposed to two different antibiotics. *Journal of Hazardous Materials*, *466*, 133639. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133639
- Yang, J., Tian, S., Song, Z., Hao, Y., & Lu, M. (2025). Recent advances in sorption-based photocatalytic materials for the degradation of antibiotics. *Coordination Chemistry Reviews*, *523*, 216257. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216257
- Yang, Z., Wang-Touri, Y. C., van Groenigen, J. W., Berendsen, B. J. A., van de Schans, M. G. M., & De Deyn, G. B. (2025). How do antibiotic residues in manure affect grassland plants and soil nitrogen cycling? *Plant and Soil*. https://doi.org/10.1007/s11104-025-07589-y
- Yu, C., Pang, H., Wang, J. H., Chi, Z. Y., Zhang, Q., Kong, F. T., Xu, Y. P., Li, S. Y., &

Che, J. (2022). Occurrence of antibiotics in waters, removal by microalgae-based systems, and their toxicological effects: A review. *Science of the Total Environment*, *813*, 151891. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151891

- Zalewska, M., Błażejewska, A., Czapko, A., & Popowska, M. (2021). Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Animal Manure – Consequences of Its Application in Agriculture. *Frontiers in Microbiology*, *12*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.610656
- Zha, Y., Li, Q., Liu, H., Ge, Y., Wei, Y., Wang, H., Zhang, L., Fan, J., Chen, Y., Zhang, C., Zhou, T., & Zhang, W. (2023). Occurrence and ecological risk assessment of antibiotics in manure and the surrounding soil from typical chicken farms in Hangzhou, China. *Frontiers in Environmental Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1241405
- Zhang, Z., Han, T., & He, H. (2023). Plant Growth and Phosphorus Uptake of Wheat in Response to Oxytetracycline. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(2), 2162–2173. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01170-1
- Zhao, P., Wang, C., Zhang, S., Zheng, L., Li, F., Cao, C., Cao, L., & Huang, Q. (2022). Fungicide-loaded mesoporous silica nanoparticles promote rice seedling growth by regulating amino acid metabolic pathways. *Journal of Hazardous Materials*, *425*, 127892. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127892
- Zhong, W., Xie, C., Hu, D., Pu, S., Xiong, X., Ma, J., Sun, L., Huang, Z., Jiang, M., & Li, X. (2020). Effect of 24-epibrassinolide on reactive oxygen species and antioxidative defense systems in tall fescue plants under lead stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *187*, 109831. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109831
- Zhou, X., Wang, J., Lu, C., Liao, Q., Gudda, F. O., & Ling, W. (2020). Antibiotics in animal manure and manure-based fertilizers: Occurrence and ecological risk assessment. *Chemosphere*, *255*, 127006. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127006

RÉSUMÉ

La consommation mondiale croissante d'antibiotiques (ANT) représente une préoccupation majeure pour la communauté scientifique, car les résidus rejetés dans l'environnement peuvent s'accumuler dans les plantes et affecter leur croissance. La présente étude visait à examiner l'effet d'un extrait aqueux de spiruline (SPE), appliqué par pulvérisation foliaire, sur la croissance, les pigments photosynthétiques, les mécanismes de défense antioxydants, l'accumulation d'osmolytes, la viabilité cellulaire et les biomarqueurs du stress oxydatif chez des plantules de blé exposées au oxytétracycline (0, 50, 100, 200 mg/L) pendant 10 jours. Le stress induit par l'antibiotique a fortement réduit la croissance, l'état hydrique, la teneur en protéines et le taux net de photosynthèse, tout en augmentant la peroxydation des lipides, la toxicité ionique, la mort cellulaire et la fuite d'électrolytes, en raison d'une accumulation excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans les plantules de blé. La fertilisation foliaire avec le SPE a significativement amélioré les paramètres de croissance, la teneur en chlorophylle, l'accumulation d'osmolytes, la teneur en protéines, les activités enzymatiques antioxydantes et la viabilité cellulaire, tout en réduisant considérablement la toxicité liée aux ROS générées par les ANT. L'application du SPE a permis d'augmenter le poids frais des pousses de 18 ,63%, la longueur des racines de 9,2%, la teneur en chlorophylle a de 1,54 %, la teneur en polyphénols de 32,54 %, et la teneur en flavonoïdes de 48,23 %, tout en réduisant la teneur en peroxyde d'hydrogène de 25,61% et la teneur en malondialdéhyde de 5,21% par rapport au traitement sans ANT (0 mg/L). Nos résultats confirment que l'apport de SPE améliore la tolérance au stress induit par les ANT chez le blé en atténuant les effets délétères du stress oxydatif. Cette découverte suggère que le SPE pourrait constituer un outil biotechnologique alternatif applicable à d'autres types de cultures. Par conséquent, les résultats de cette étude soutiennent l'utilisation du traitement à base d'***Arthrospira platansis***, qui s'est révélé particulièrement efficace pour améliorer la croissance des plants de blé en réduisant les effets néfastes du stress antibiotique dans un sol contaminé.

Mots-clés : **Xénobiotiques ; Phytotoxicité ; Homéostasie redox ; Stress oxydatif ; Espèces réactives de**

ABSTRACT

The increasing global consumption of antibiotics (ANT) is a growing concern for the scientific community since the residues discharged into the environment can accumulate in plants and affect their growth. The present study aimed to examine the effet of leaf-applied Spirulina water extract (SPE) on growth, photosynthetic pigments, antioxidant defense mechanisms, osmolyte accumulation, cell viability, and oxidative stress biomarkers analyses in wheat seedlings exposed to oxytétracycline ANT (0, 50, 100, 200 mg/L) for 10 days. ANT stress drastically decreased growth, water status, protein content and net photosynthetic rate, while increasing lipid peroxidation, ion toxicity, cell death, and electrolyte leakage due to the excessive accumulation of reactive oxygen species (ROS) in wheat seedlings. Foliar fertigation of SPE significantly increased growth traits, chlorophyll content, osmolyte accumulation, protein content, antioxidant enzyme activities, and cell viability, while considerably reducing ANT-generated ROS toxicity in wheat seedling. The SPE application enhanced shoot fresh weight by 18.63%, root length by 9.2%, chlorophyll a content by 1.54%, polyphenol content by 32.54%, and flavonoid content by 48.23%, while decreased hydrogen peroxide content by 25.61% and malondialdehyde content by 5.21% over 0 mg/L ANT treatment. Our data support the notion that SPE supplementation improves ANT stress tolerance in wheat by mitigating the detrimental impacts of oxidative stress. This finding suggests that SPE could serve as an alternative biotechnological tool in other types of crops. Therefore, the results of this study support the use of the *A. platensis* treatment, which was mainly effective in improving the growth of wheat plants by reducing the detrimental effects of antibiotic stress in contaminated soil.

Keywords :
Xenobiotics ; Phytotoxicity ; redox homeostasis ; Oxidative stress ; Reactive oxygen species ; Spirulina

الملخص

يشكل الاستهلاك العالمي المتزايد للمضادات الحيوية (NTAs) في جميع أنحاء العالم مصدر قلق كبير للمجتمع العلمي، حيث يمكن أن تتراكم المخلفات المنطلقة في البيئة في النباتات وتؤثر على نموها. كان الهدف من هذه الدراسة هو فحص تأثير المستخلص المائي للسبيرولينا(SPE) ، الذي تم تطبيقه عن طريق الرش الورقي، على النمو، والأصباغ الضوئية، وآليات الدفاع المضادة للأكسدة، وتراكم الأسموليت، وحيوية الخلايا، والمؤشرات الحيوية للإجهاد التأكسدي في شتلات القمح المعرضة للأوكسيتتراسيكلين) 0، 50، 100، 200 ملغم/لتر(لمدة 10 أيام. أدى الإجهاد الناجم عن المضادات الحيوية إلى انخفاض كبير في النمو وحالة الماء والمحتوى البروتيني ومعدل البناء الضوئي الصافي، مع زيادة بيروكسيد الدهون والسمية الأيونية وموت الخلايا وتسرب الإلكتروليت، بسبب التراكم المفرط لأنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) في شتلات القمح .وقد أدى التسميد الورقي باستخدام البولي فينول المخصب بالحرارة SPE إلى تحسن كبير في معايير النمو ،ومحتوى الكلوروفيل، وتراكم الكلوروفيل، وتراكم الأسموليت، ومحتوى البروتين، وأنشطة الإنزيمات المضادة للأكسدة، وحيوية الخلايا، مع تقليل السمية المرتبطة بالأكاسيد الضارة الناتجة عن مركبات NTAs بشكل كبير. أدى استخدام البولي بروبيلين المعزز إلى زيادة الوزن الطازج للبراعم بنسبة 63.18%، وطول الجذور بنسبة 2.9%، ومحتوى الكلوروفيل أ بنسبة 54.1%، ومحتوى البوليفينول بنسبة 54.32%، ومحتوى الفلافونويد بنسبة 423.8%، مع تقليل محتوى بيروكسيد الهيدروجين بنسبة 61.25% ومحتوى المالونديالديهايد بنسبة 2.51% مقارنةً بالمعالجة بدون حمض النيتروزين تيريفثاليك) 0 مجم/لتر(. تؤكد النتائج التي توصلنا إليها أن إضافة بوليمرات البولي إيثيلين سداسي البروتينات البوليمرية تحسن من قدرة القمح على تحمل الإجهاد الناجم عن حمض النيتروزنتاين تيريفثاليك عن طريق تخفيف الآثار الضارة للإجهاد التأكسدي. تشير هذه النتيجة إلى أن EPS يمكن أن يكون أداة تكنولوجية حيوية بديلة قابلة للتطبيق على أنواع أخرى من المحاصيل .وبالتالي فإن نتائج هذه الدراسة تدعم استخدام المعالجة القائمة على أرثروسبيرا بلاتانسيس التي أثبتت فعاليتها بشكل خاص في تحسين نمو نباتات القمح من خلال الحد من الآثار الضارة للإجهاد الناتج عن المضادات الحيوية في التربة الملوثة.

كلمات مفتاحية: المواد السمية النباتية؛ السمية النباتية؛ توازن الأكسدة والاختزال؛ الإجهاد التأكسدي؛ أنواع الأكسجين