REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Master**

En biologie

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Par :

Baba Ali Meriem

Daradji Manar

Saou Nour-Elhouda

Thème :

Évaluation du rôle des cyanobactéries et de la chlorelle dans l'atténuation de l'effet toxique du stress abiotique sur les plantes

Soutenue publiquement le : 24 /06 /2024. Devant le jury composé de :

Bachene Mohamed Sadek	**MCA**	U. Médéa	Président
Boumediene Farida	**MCB**	U. Médéa	Examinatrice
Ainas Mahfoud	**MCA**	U. Médéa	Encadreur
Touzout Nabil	**MAB**	U. Médéa	Co-Encadreur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de Mr. TOUZOUT Nabil, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire. Son soutien, ses compétences et sa clairvoyance nous ont été d'une aide inestimable. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nos remerciements s'adressent à notre encadrant Dr. AINAS Mahfoud pour nous avoir proposé ce sujet, pour sa disponibilité, ses encouragements, ses orientations, sa gentillesse et son sens d'écoute et d'échange.

Nous tenons aussi à exprimer toutes notre gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer et de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma famille, elle qui ma doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Je suis très fière d'être votre fille et de pouvoir enfin réaliser, ce que vous avez tant espéré et attendu de moi.

A mon prince papa

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie.

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, maman.

A mon frère pour l'amour qu'il me réserve.

A mes rayons les plus éclatants, ma source de bonheur, mes complices de toujours, mes chères sœurs.

A mes amis, compagnons de route dans les hauts et les bas de cette aventure, vos rires, vos encouragements et votre présence ont rendu ce parcours plus lumineux et mémorable.

Meriem

Dédicaces

Louange à dieu pour avoir accompli ce travail,

Ce modeste travail est dédié spécialement

A ma chère maman ; ma raison de vivre en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience, son amour et ses sacrifices

A mon cher papa pour son amour et son dévouement.

« A vous mes parents, je dis merci d'avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes considérations et ma grande admiration pour vous. Puisse ce travail vous témoigne mon affection et mon profond amours »

A ma chère sœur Meriem et mes chers frères Abderrezak, Eymen qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

À mes chers amis Meriem et Manar, vous êtes mes compagnons dans ce merveilleux voyage d'ambition et de défis. Merci pour les beaux moments, les souvenirs inoubliables et le soutien continu que vous m'avez apporté.

Nour EL Houda

Dédicaces

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

A ma mère qui a toujours été une source d'encouragement et de motivation pour moi, sans son amour constant et ses conseils précieux, je n'aurais pas pu atteindre cet objectif si ambitieux.

A mon très cher père grâce à toi j'ai appris la valeur du travail et de la responsabilité. Ton soutien a été une lumière dans tout mon parcours.

A l'homme de ma vie, mon mari Abderahim, merci pour votre soutiens et encouragements.

A mes très chers frères Abdellah et Ahmad, et ma sœur Amina, puisse dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite. J'espère que nous resterons toujours aussi unis.

A men adorable belle-sœur Nacera qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

A celle qui rend mes journées heureuses, à ma confidente, ma cousine Ikram.

A mes chères amies Meriem et Nour EL Houda, je vous remercie pour vos amitiés chères à mon cœur, et je vous souhaite tout le bonheur du monde.

Manar

Points forts

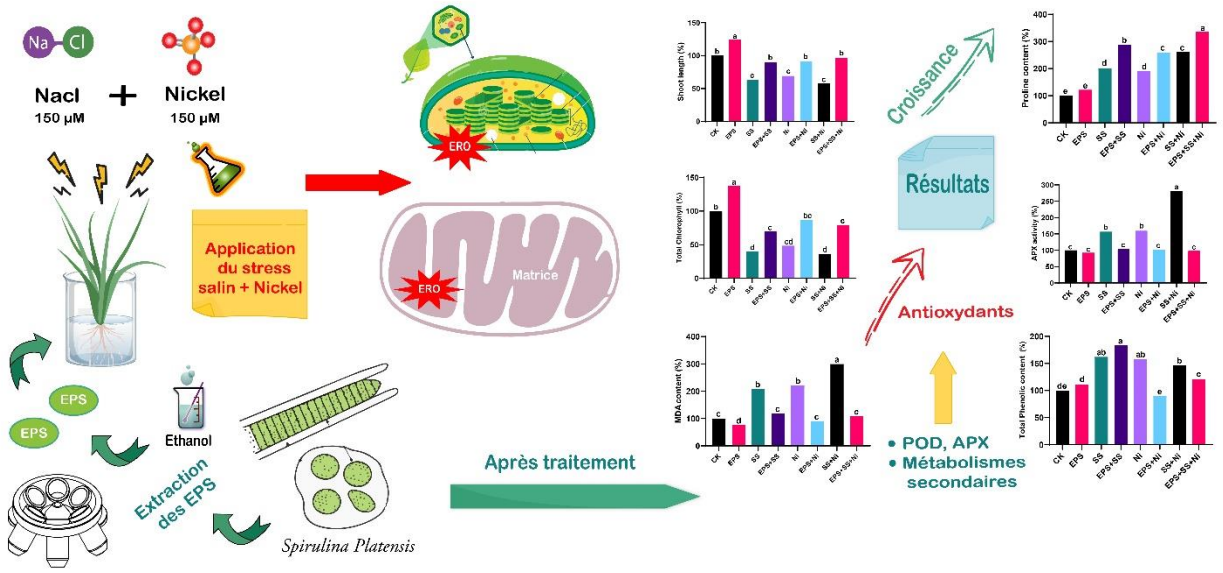
• La pollution des sols par le Nickel (Ni) et/ou salinité (NaCl) une menace sérieuse pour la production de blé.

• Les exopolysaccarides (EPS) atténuent efficacement la toxicité du Nickel (Ni) et/ou salinité (NaCl) dans le blé.

• EPS réduit les dommages oxydatifs cellulaires et améliore le système de défense antioxydant des plantes.

• EPS a amélioré la teneur en métabolites secondaires des plantes soumises au stress du Ni et/ou NaCl.

Résumé graphique



الملخص

تركز الدراسة على التحدي العالمي المتمثل في الملوحة وإجهاد النيكل، الذي يعيق بشكل كبير إنتاج القمح. تؤدي الملوحة والإجهاد الناتج عن النيكل إلى تعطيل العمليات الخلوية والفسيولوجية في القمح، مما يؤدي إلى خسائر كبيرة في المحصول، خاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. تقوم الدراسة بالبحث عن استخدام عديدات السكاريد الخارجية كمنشط حيوي لتحسين الملوحة ومقاومة النيكل في القمح. شارك في ذلك ثماني مجموعات من نباتات القمح. كان لكل مجموعة من هذه المجموعات سبعة مكررات، وفي كل مكرر كان هناك نباتين. بعد سبعة أيام من العلاج، تم حصاد النباتات وتحليلها لمختلف المعايير المورفولوجية والفسيولوجية والكيميائية الحيوية. أظهرت النتائج أن معالجة عديدات السكاريد الخارجية قللت بشكل كبير من أضرار الملح والنيكل من خلال تعزيز طول الجذر، وطول البراعم، والوزن الطازج والجاف، وزيادة محتوى الكلوروفيل، وتثبيط إنتاج العلامات الزائدة. أدى إجهاد الملح والنيكل إلى انخفاض كبير في توازن الماء وإتلاف غشاء الخلية عن طريق تقليل محتوى الماء النسبي. يبدو أن استخدام عديدات السكاريد الخارجية يخفف من التأثيرات الضارة لإجهاد الملح و/أو النيكل على القمح، مما يحسن قوة النمو والتمثيل الغذائي وإنتاجية القمح. يشير هذا إلى إمكانات عديدات السكاريد الخارجية كمنشط حيوي صديق للبيئة لتحسين مرونة المحاصيل وتغذيتها وإنتاجيتها في مواجهة التحديات البيئية المختلفة، وبالتالي المساهمة في الأمن الغذائي العالمي.

الكلمات المفتاحية: الملوحة؛ النيكل؛ قمح؛ السكريات الخارجية؛ المنشطات الحيوية؛ الاكسدة؛ البكتيريا الزرقاء

Résumé

L’étude se concentre sur le défi mondial du stress dû à la salinité (NaCl) et nickel (Ni), qui entrave considérablement la production de blé, pierre angulaire de la sécurité alimentaire mondiale. Le stress dû à la salinité et le nickel perturbe les processus cellulaires et physiologiques du blé, entraînant des pertes de rendement substantielles, en particulier dans les régions arides et semi-arides. La recherche étudie l'utilisation des exopolysaccharides (EPS) comme biostimulant pour améliorer la résistance à la salinité et le nickel de blé. Huit groupes de plants de blé au total ont été impliqués. Chacun de ces groupes avait sept répétitions, et dans chaque répétition, il y avait deux plantes. Après 7 jours de traitement, les plants ont été récoltés et analysés pour divers paramètres morphologique, physiologiques et biochimiques. Les résultats ont montré que le traitement par EPS réduit considérablement les dommages causés par le sel et le nickel en favorisant la longueur des racines, des pousses, le poids frais et sec, en augmentant la teneur en chlorophylle et en inhibant la production excessive de marqueurs de stress oxydatif. Le stress dû au sel et nickel a considérablement diminué l'équilibre hydrique et endommagé la membrane cellulaire en réduisant la teneur relative en eau. L'application des EPS semble atténuer les effets néfastes du stress salin et/ou nickel sur le blé, en améliorant la vigueur de croissance, le métabolisme et la productivité de blé. Cela indique le potentiel des EPS en tant que biostimulant écologique pour améliorer la résilience, la nutrition et le rendement des cultures face à divers défis environnementaux, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire mondiale.

Mots-clés: Salinité ; Nickel; Blé; Exopolysaccharides ; Biostimulants ; Stress oxydatif ; Cyanobactéries

Abstract

The study focuses on the global challenge of salinity (NaCl) and nickel (Ni) stress, which significantly hampers wheat production, the basis of global food security. Salinity and nickel stress disrupt cellular and physiological processes in wheat, leading to substantial yield losses, particularly in arid and semi-arid regions. The research is investigating the use of exopolysaccharides (EPS) as a biostimulant to improve salinity and nickel resistance of wheat. Eight groups of wheat plants were involved. Each of these groups had seven replicates, and in each replicate, there were two plants. After 7 days of treatment, the plants were harvested and analyzed for various morphological, physiological and biochemical parameters. Results showed that EPS treatment significantly reduced salt and nickel damage by promoting root length, shoot length, fresh and dry weight, increasing chlorophyll content, and inhibiting excess marker production. Oxidative stress. Salt and nickel stress significantly decreased water balance and damaged the cell membrane by reducing relative water content. The application of EPS appears to mitigate the adverse effects of salt and/or nickel stress on wheat, by improving growth vigor, metabolism and wheat productivity. This indicates the potential of EPS as an ecological biostimulant to improve crop resilience, nutrition and yield in the face of various environmental challenges, thereby contributing to global food security.

Keywords: Salinity; Nickel; Wheat; Exopolysaccharides; Biostimulants; Oxidative stress; Cyanobacteria

Liste des figures

Figure 1: Structure des cyanobactéries (Min et al., 2024). 4
Figure 2: Aperçu du potentiel des cyanobactéries dans différents domaines de la science et du développement (Zahra et al., 2020)..... 10
Figure 3: Infographie montrant les mécanismes impliqués dans la promotion de la tolérance des plantes aux stress abiotiques et de la résistance aux stress biotiques par l'utilisation de cyanobactéries en agriculture (Poveda, 2021). 11
Figure 4: Représentation schématique de l'absorption/translocation du Ni dans la cellule végétale (Rizwan et al., 2024). 17
Figure 5: Application de l'EPS (Debnath et al., 2024). 21
Figure 6: Principes d'économie circulaire de la production, de l'extraction et de l'utilisation de biostimulants à base de microalgues et de cyanobactéries pour une agriculture durable (Sánchez-Quintero et al., 2023). 23
Figure 7: Une représentation théorique présente les fonctions potentielles des cyanobactéries dans l'agriculture et l'environnement durables (Chittora et al., 2020). 25
Figure 8: Plan expérimental de l'expérience, indiquant les huit boîtes expérimentales et l'application du stress salin et nickel.(A) montre les plantes témoins. (B) montre les plantes traitées uniquement à l'exopolysaccharide. (C) montre les plantes exposées au stress salin. (D) montre des plantes traitées à l'exopolysaccharide exposée au stress salin. (E) montre les plantes exposées au stress de nickel. (F) montre des plantes traitées à l'exopolysaccharide exposée au stress de nickel. (G) montre des plantes exposées au stress combiné du sel et de nickel. (H) plantes traitées à l'exopolysaccharide exposées au stress combiné sel et nickel. 29
Figure 9: Dispositif expérimental montrant l'impact de: (A) l'EPS. (B) stress salin et EPS+stress salin. (C) nickel et EPS+ nickel. (D) stress salin+ nickel et EPS+ stress salin+ nickel. 30
Figure 10: Conception expérimentale. 31
Figure 11: FTIR. 39
Figure 12: Évaluation des paramètres de croissance des plants de blé soumis au stress salin et/ou nickel et le rôle des EPS. Les chiffres montrent que l'EPS a augmenté la longueur des parties aériennes et la biomasse végétale en cas de stress salin et nickel individuellement ainsi qu'en combiné. (A) Montre les dommages causés par le sel et le nickel et le rôle des EPS. (B) poids sec des plantes, (C) biomasse des parties aériennes, (D) longueur des parties aériennes. 41
Figure 13: Evaluation des paramètres de croissance des plants de blé sous stress salin et le nickel. Les chiffres montrent que l'EPS a augmenté la longueur et la biomasse des racines en cas de stress salin et nickel individuellement ainsi qu'en combiné. (A) longueur des racines, (B) biomasse des racines. 42
Figure 14: L'application d'EPS réduit les effets du stress salin et le nickel sur le teneur en chlorophylle (A). Le contenu en caroténoïdes (B) par traitement d'EPS. 43
Figure 15: L'application d'EPS réduit les effets du stress salin et le nickel sur la teneur relative en eau (A) et la teneur en proline (B). 44
Figure 16: L'application d'EPS atténue le stress dû au sel et le nickel en éliminant l'accumulation de ERO (A, B) Affiche le contenu MDA et H2O2. 45
Figure 17: Activités enzymatiques antioxydants des plants de blé après exposition ou EPS et SS et/ou Ni. (A,B) représentent respectivement les activités APX et POD. 46
Figure 18: effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu phénolique total et en flavonoïdes et le rôle des EPS. 47

Liste des tableaux

Tableau 1: La composition du milieu nutritif de Hogeland. 27
Tableau 2: Teneurs en sulfates et en glucides de l'EPS libérés dans le milieu d'*A. platensis*. 39

Liste des abréviations

Acétyl-coenzyme A	: acétyl-CoA
Acide -2-thiobarbiturique	: TBA
Acide abscissique	: ABA
Acide borique	: H_3BO_3
Acide désoxyribonucléique	: ADN
Acide éthyléne diamino ctétracétique	: EDTA
Acide sulfurique	: H_2SO_4
Acide trichloracétique	: TCA
Acide ribonucléique	: ARN
Acides gras saturés	: AGS
Adénosine monophosphate	: AMP
Adénosine triphosphate	: ATP ase
Analysis of variance	: ANOVA
Arsenic	: As
Ascorbate peroxidase	: APX
Carbonate de sodium	: Na_2CO_3
Caroténoïdes	: Car
Cellule mononucléée sanguine périphérique	: PBMC
Cellules de Langerhans	: LC
Centimètre réciproque	: cm−1
Chlorophyll	: Chl
Chlorophyll a	: Chl a
Chlorophyll b	: Chl b
Chlorure de barium	: $BaCl_2$
Chlorure de manganèse	: $MnCl_2$
Chlorure de sodium	: NaCl
Chlorure ferrique	: $FeCl_3$
Chrome	: Cr
Contenu en phénolique total	: TPC
Control	: CK
Cuivre	: Cu
Degrees celsius	: °C
Densité optique	: DO
Di-AMP cyclique	: c-di-AMP
Diazote	: N_2
Di-GMP cyclique	: c-di-GMP
Direction des services agricoles	: DSA
Eau ultra pure	: EUP
Espèces réactives de l'oxygène	: ERO
Excitation emission matrix	: EEM
Exopolysaccharides	: EPS
Gaïacol peroxydase	: POD
Gaz carbonique	: CO_2
Glucosylglycérol	: GG
Glutathion réductase	: GSH

Glycéraldéhyde-3-phosphate	: G3P
Glycine bétaïne	: GB
Gram	: g
Herpès simplex de type 1	: HSV-1
Herpès simplex de type 2	: HSV-2
Heure	: h
Human cytomegalovirus	: HCMV
Hydrogène	: H+
Infrarouge à transformée de Fourier	: FTIR
Iodure de potassium	: KI
Ion ferrique	: Fe 2+
kilogramme	: Kg
Litre	: L
Longueur des pousses	: LP
Longueur des racines	: LR
Malondialdéhyde	: MDA
Materials Requirements Planning	: MRP
Microlitre	: µl
Micromètre	: µm
Milligram	: mg
Millilitre	: ml
Millimole	: mM
Minute	: min
Molybdate de sodium	: Na_2MoO_4
Nanomètre	: nm
Nickel	: Ni
Nitrate de calcium	: $(Ca(NO_3)2)$
Nitrate de potassium	: KNO_3
Oxygène	: O_2
Peroxyde d'hydrogène	: H_2O_2
Phosphate monopotassique	: KH_2PO_4
Plomb	: Pb
Poids frais des pousses	: PFP
Poids frais des racines	: PFR
Poids sec	: PS
Potentiel hydrogène	: pH
Pourcent	: %
Proline	: Pro
Quantité	: qté
Radicaux hydroxyles	: OH
Sodium	: Na+
Spectroscopie ultraviolet-visible	: UV-VIS
Stress salin	: SS
Sulfate de cuivre	: $CuSO_4$
Sulfate de magnésium	: $MgSO_4$
Sulfate de zinc	: $ZnSO_4$
Teneur relative en eau	: RWC
Trichlorure d'aluminium	: $AlCl_3$
Virus de l'immunodéficience humaine	: VIH-1

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Points forts

Résumé graphique

ملخص

Abstract

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction

Synthèse Bibliographique

Chapitre 01: Généralité sur les cyanobactéries et la spiruline

1 Les cyanobactéries 3

1.1 Approche historique de cyanobactérie 3

1.2 Les caractères des cyanobactéries 3

1.3 Présence dans la nature 4

1.4 Organisation, fonction et comportement 5

1.5 Facteurs influençant la croissance des cyanobactéries 5

1.5.1 Température 5

1.5.2 Lumière et flottabilité 5

1.5.3 Phosphore et azote 6

1.6 Cyanobactéries et cyanotoxicité dans le monde 6

2 Généralités sur la spiruline 6

2.1 Historique sur la spiruline 6

2.2 Les caractéristiques de la Spiruline 7

2.3 Composition nutritionnelle 7

2.4 Le genre Arthrospira platensis 7

2.5 Potentiels des cyanobactéries 8

2.5.1 Effets de la spiruline sur la santé 8
2.5.2 Activité antivirale de la Spiruline 8
2.5.3 Effets pro-inflammatoires et antioxydants 8
2.5.4 Effets anticancéreux 9
2.5.5 Ressource pour la production de biocarburants 9
2.5.6 Biofertilisants 9
2.6 Profil de sécurité 10

Chapitre 02: Stress abiotique

1 Stress abiotique 11
1.1 Stress salin 11
1.1.1 Effets de la salinité sur les plantes 12
1.1.2 Mécanismes de tolérance au sel chez les cyanobactéries 12
1.1.2.1 Protéines de transport membranaire actives 13
1.1.2.2 Synthèse de solutés compatibles 13
1.1.2.3 Accumulation de lipides et d'alcanes 13
1.1.2.4 Seconds messagers 14
1.1.3 Causes de la salinité 14
1.1.3.1 Salinisation primaire 14
1.1.3.2 Salinisation secondaire 14
1.2 Effet de la toxicité des métaux lourds sur les plantes 14
1.3 Nickel 15
1.3.1 Origine et sources de la pollution au nickel 15
1.3.2 Contamination du sol par le nickel 16
1.3.3 Accumulation de nickel dans les plantes 16

Chapitre 03: L'exopolysaccharides et les cyanobactéries dans l'agriculture

1 Exopolysaccharides 18
1.1 Composition d'EPS cyanobactériens 18
1.2 Principales variables opératoires affectant la production de polysaccharides de microalgues et de cyanobactéries 19
1.3 Rôle de l'EPS 19
1.4 Application d'EPS 20
1.5 Application biotechnologiques des exopolysaccharides 20
1.5.1 Élimination des métaux lourds et traitement des eaux usées 20
1.5.2 Rôle des exopolysaccharides sous différents types de stress 20
1.5.3 Industrie alimentaire et pharmaceutique 21

2 Les cyanobactéries dans l'agriculture durable 22
3 Cyanobactéries et agriculture 23

Partie expérimentale

Chapitre 01: Matériels et Méthodes

1 Culture et conditions de croissance des microalgues 26
1.1 Extraction d'exopolysaccharides de microalgues (EPS) 26
1.2 Caractérisation chimique et physicochimique des EPS 26
2 Matériel biologique et conditions de croissance 27
2.1 Milieu nutritif 27
3 Conception expérimentale 28
4 Analyses morphologiques 32
4.1 Mesures de croissance 32
5 Analyses physiologiques 32
5.1 Extraction et estimation de la teneur en pigments photosynthétiques : chlorophylle et caroténoïdes 32
5.2 Teneur relative en eau 32
6 Analyses biochimiques 33
6.1 Stress oxydatif : génération d'espèces réactives de l'oxygène et dommages oxydatifs 33
6.1.1 Peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) 33
6.2 Analyse des indices de dommages oxydatifs 33
6.2.1 Estimation de la peroxydation lipidique 33
6.3 Estimation du système de défense des antioxydants enzymatiques 34
6.3.1 Activité de l'ascorbate peroxydase (APX) 34
6.3.2 Activité du gaïacol peroxydase (POD) 35
6.4 Métabolites secondaires 35
6.4.1 Dosage des Polyphénols Totaux 35
6.4.2 Dosage des Flavonoïdes Totaux 36
6.5 Les antioxydants non enzymatiques 36
6.5.1 Estimation de la teneur en Proline 36
6.6 Analyses statistiques 37

Chapitre 02: Résultats

1 Caractérisation physicochimique des EPS 38
1.1 Caractérisation chimique des EPS 39
2 Croissance des plantes sous stress salin et/ou nickel et effets des exopolysaccharides 39
3 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu en chlorophylle et le rôle des exopolysaccharides (EPS) 42

4 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu en caroténoïdes et le rôle des exopolysaccharides (EPS) 42

5 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur la teneur relative en eau et le rôle des exopolysaccharides..... 43

6 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le teneur en proline et le rôle des exopolysaccharides (EPS) . 43

7 Effets individuelle et combiné de NaCl et Ni sur les teneurs en H_2O_2 et en MDA et le rôle des exopolysaccharides (EPS) 44

8 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur les Antioxydants enzymatiques et le rôle des exopolysaccharides (EPS) 45

9 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu phénolique total et en flavonoïdes et le rôle des exopolysaccharides (EPS) 46

Discussion

Conclusion et Perspectives

Références

Introduction

Le blé est l'un des aliments de base les plus importants pour près de 2,5 milliards d'habitants de la planète. Il occupe 217 millions d'hectares dans le monde, soit la superficie la plus élevée parmi toutes les autres cultures avec une production annuelle de 731 millions de tonnes. La demande de blé ne cesse d'augmenter en raison des propriétés adhésives et viscoélastiques uniques des protéines du gluten qui facilitent la production d'aliments transformés dont la consommation est en augmentation. Lorsqu'il est consommé sous forme de grain entier, il constitue une source de multiples nutriments et fibres alimentaires (Sneha et al., 2024). Cette culture est fortement affectée par les fortes concentrations de sel car elle est sensible au stress salin. La salinité est le principal stress abiotique qui réduit la production de blé dans les régions arides et semi-arides. Dans les tissus végétaux, les stress oxydatifs et osmotiques dus à une salinité élevée conduisent à un déséquilibre ionique dû à une augmentation de la concentration d'ions à un niveau qui interfère avec les processus métaboliques et réduit le potentiel hydrique du sol. Le danger de la culture utilisant des sols salins contaminés par les résidus des métaux lourd (ML) réside dans le fait que la salinité augmente la mobilité des métaux lourd (ML) dans le sol. Le nickel (Ni), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) sont des métaux lourds qui provoquent une pollution environnementale et un stress abiotique grave, qui limitent la production agricole et affectent la santé humaine. Les ML pénètrent dans le sol par les précipitations atmosphériques, les engrais organiques et inorganiques, en particulier les engrais phosphatés naturels, l'eau d'irrigation contaminée, les eaux usées et les déchets agricoles et industriels (Rady et al., 2023). Ainsi, un soutien exogène est nécessaire pour améliorer la tolérance des plantes au stress (Rady et al., 2023).

Les biostimulants de microalgues sont utilisés en petites quantités avec des engrais inorganiques pour améliorer la croissance et la production des cultures. La microalgue photosynthétique bleu-vert, *Spirulina platensis*, est un biostimulant à haute valeur nutritionnelle et a donc été utilisée commercialement comme biofertilisant, aliment pour animaux et source de nourriture (Rady et al., 2023). L'utilisation de biostimulants pour améliorer la croissance des plantes et améliorer leur tolérance aux stress abiotiques est de plus en plus populaire dans l'agriculture, en particulier dans les systèmes agricoles durables et biologiques. De nouvelles approches respectueuses de l'environnement telles que l'utilisation d'exopolysaccharides (EPS) comme biostimulants végétaux pour l'amélioration et la stabilité des rendements (sous différentes

conditions de stress biotiques et abiotiques) peut être utile à cet égard (Chaudhuri & Balasubramanian, 2023).

Les exopolysaccharides ou EPS sont des composés glucidiques complexes avec divers substituants comme des lipides, des acides aminés, ou des sulfates attachés à leurs squelettes linéaires ou ramifiés. Ils sont produits et accumulés sur les surface des microalgues pendant la phase de croissance. Les microalgues produisent du EPS pour se lier à différentes surfaces, se protègent des différents stress abiotiques (tels que des températures extrêmes, un pH ou des situations limitant les nutriments), et servent également de réserve d'énergie et de carbone. Ils ont une large gamme d'applications dans différents domaines y compris les produits pharmaceutiques, alimentaires, cosmétiques et agricoles en raison de leurs caractéristiques structurelles associées à plusieurs agents biologiques uniques (anti-inflammatoires, antibactériens, antiviral, anticoagulant, antioxydant et cicatrisant) et propriétés physicochimiques (Chaudhuri & Balasubramanian, 2023). La présente étude visait à évaluer l'influence potentielle de l'EPS en tant qu'application exogène sur la croissance et la production des plantes de blé cultivé sous double stress (salinité et ML).

Synthèse Bibliographique

Chapitre 01

Généralité sur les cyanobactéries et la spiruline

1 Les cyanobactéries

1.1 Approche historique de cyanobactérie

Les cyanobactéries sont des procaryotes photosynthétiques quantitativement parmi les organismes les plus importants sur Terre, trouvés dans la plupart des types d'environnements éclairés. Ils sont originaires du Précambrien, il y a environ 3 500 millions d'années ; au cours de cette période géologique se trouve le Protérozoïque ou « l'âge des cyanobactéries » (il y a entre 2 500 et 540 millions d'années) (Poveda, 2021).

Cyanobactéries capable de coloniser de nombreuses niches écologiques. On les retrouve majoritairement en eaux douces, mais également en milieux saumâtres et marins. En milieu terrestre, elles sont présentes dans les sols, sur la glace, sur les rochers des hautes montagnes et même dans les déserts. Certaines espèces cyanobactériennes sont également capables de se développer dans des milieux extrêmes où elles se sont adaptées à un large spectre de température (eaux thermales, lacs arctiques et antarctiques), de pH (eaux carbonatées et tourbières acides), de salinité (lacs hypersalés à oligotrophes) (Dia, 2021).

1.2 Les caractères des cyanobactéries

Les cyanobactéries sont des organismes polyvalents en agrobiotechnologie, Les cyanobactéries appartiennent au groupe de bactéries phototrophes oxygénées le plus complexe et le plus diversifié sur le plan morphologique, qui englobe environ 2 000 espèces réparties dans 150 genres, présentant un large éventail de formes et de tailles ainsi que des caractéristiques physiologiques et morphologiques uniques. Les cyanobactéries ont le même mécanisme de photosynthèse que les algues eucaryotes, mais leur cellule a une structure complètement différente. Parmi elles, on distingue les formes simples et coloniales, constituées d'une ou plusieurs cellules. Parmi divers membres biologiques, les cyanobactéries présentent une adaptabilité exceptionnelle et sont capables de croissance en autotrophie, hétérotrophie ou en mixotrophie, Au cours de leur évolution, les cyanobactéries ont subi de nombreuses modifications fonctionnelles et structurelles leur permettant de se propager et de survivre dans diverses niche écologiques (Akmukhanova et al., 2023).

Les Cyanobactéries sont des microorganismes procaryotes, possédant une paroi cellulaire rigide apparentée à celle des bactéries Gram négatif. Elles utilisent la photosynthèse pour la

formation d'énergie métabolique à l'aide du pigment photosynthétique de la chlorophylle *a* et de pigments photosynthétiques intrinsèques aux Cyanobactéries, la phycocyanine ou la phycoérythrine. Le mixtion de ces pigments donnent une coloration spécifique aux Cyanobactéries : la couleur bleuvert dans le cas de la phycocyanine et rougeâtre dans le cas de la phycoérythrine (Levi et al., 2006). Ceci explique le nom « Cyanobactérie » donné à ces bactéries par l'association du préfixe 'cyan' pour la coloration bleu-vert générée fait par le processus de la photosynthèse, et du mot bactérie (Yao, 2020).

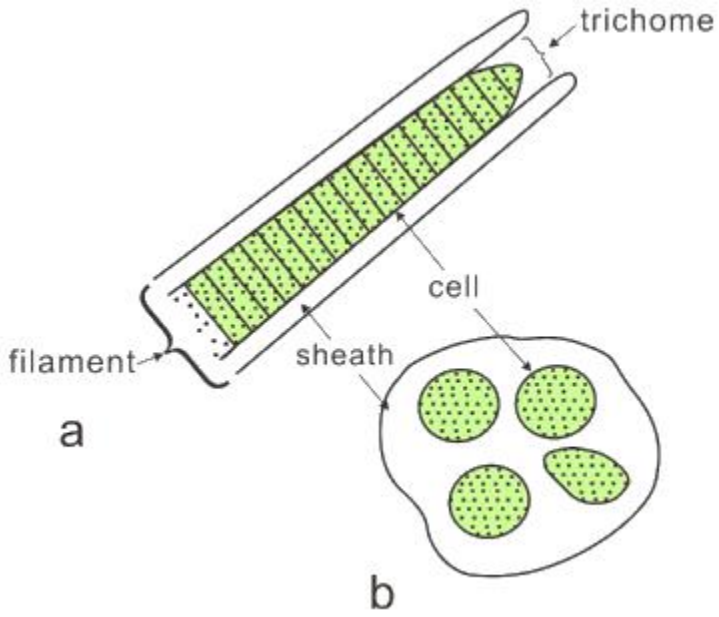


Figure 1: Structure des cyanobactéries (Min et al., 2024).

1.3 Présence dans la nature

La majorité des cyanobactéries sont des photoautotrophes aérobies. Leurs processus vitaux nécessitent uniquement de l'eau, du dioxyde de carbone, des substances inorganiques et de la lumière. La photosynthèse est leur principal mode de métabolisme énergétique. Cependant, dans le milieu naturel, on sait que certaines espèces sont capables de survivre de longues périodes dans l'obscurité totale. En outre, certaines cyanobactéries présentent une capacité distincte à se nourrir en hétérotrophie. Les cyanobactéries sont souvent les premières plantes à coloniser les zones dénudées de roches et de sols. Les adaptations, telles que les pigments de gaine absorbant les ultraviolets, augmentent leur aptitude dans l'environnement terrestre relativement exposé. De nombreuses espèces sont capables de vivre dans le sol et d'autres

habitats terrestres, où ils sont importants dans les processus fonctionnels de écosystèmes et le cycle des éléments nutritifs. Les principaux habitats des cyanobactéries sont les environnements limniques et marins. Ils s'épanouir dans l'eau salée, saumâtre ou fraîche, dans les sources froides et chaudes et dans des environnements où aucune autre microalgue ne peut exister (Jenkins, 1991).

1.4 Organisation, fonction et comportement

La structure et l'organisation des cyanobactéries sont étudiées à l'aide de la lumière et en microscope électroniques. La morphologie de base comprend des cellules unicellulaires, coloniales et multicellulaires. Formes filamenteuses, Les formes unicellulaires, par exemple dans l'ordre des Chroococcales, ont des formes sphériques, ovoïdes ou cellules cylindriques. Ils se produisent seuls lorsque les cellules filles se séparent après la reproduction. Par fission binaire. Les cellules peuvent se regrouper en colonies irrégulières, maintenues ensemble par la matrice visqueuse sécrétée lors de la croissance de la colonie. Au moyen d'un plus ou moins séries régulières de division cellulaire, combinées à des sécrétions de gaine, colonies plus ordonnées peuvent être produits (Jenkins, 1991).

1.5 Facteurs influençant la croissance des cyanobactéries

1.5.1 Température

Des températures comprises entre 20 ◦C et 30 ◦C favorisent une croissance optimale de cyanobactéries. Précédent des études montrent que Microcystis était sévèrement limité à des températures inférieures 15 ◦C avec celle autour de 25 ◦C propice à la croissance des cyanobactéries. Ainsi, la croissance des cyanobactéries est généralement élevée en été car les températures sont normalement élevées. Ces qui soulignent dans les régions tempérées qui connaissent une prolifération accrue de cyanobactéries pendant l'été en raison de changement climatique et réchauffement climatique (Mutoti et al., 2022).

1.5.2 Lumière et flottabilité

Les cyanobactéries possèdent deux systèmes de récolte de lumière. La chlorophylle-a est responsable de la récolte de la lumière pendant la photosynthèse et les observations indiquent que les cyanobactéries semblent tolère très bien des intensités lumineuses plus élevées. Les intensités lumineuses élevées augmentent apport cellulaire en fer, avant que Fe^{3+} ne soit transporté dans les cellules des algues la lumière convertit Fe^{3+} en Fe^{2+} qui est responsable de la forte concentration et de de taux de croissance élevé des cyanobactéries. La présence de

spécialistes tel que les vésicules remplies de gaz permettent le mouvement des cyanobactéries dans le colonne d'eau, ce qui donne moins de poids aux cyanobactéries, ce qui les amène à flotter (Mutoti et al., 2022).

1.5.3 Phosphore et azote

Le phosphore et l'azote sont des nutriments essentiels pour la croissance des cyanobactéries. Les cyanobactéries d'eau douce ont besoin de plus de phosphore que d'azote pour une croissance efficace, avec l'agriculture et les eaux usées les effluents étant les principales sources de ces nutriments dans ces écosystèmes. L'azote est responsable de l'eutrophisation (Mutoti et al., 2022).

1.6 Cyanobactéries et cyanotoxicité dans le monde

En raison de leur capacité à produire des toxines dans le milieu aquatique, les cyanobactéries présentent un risque important pour la santé. Ils peuvent affecter directement la vie des planchistes, des poissons et, par conséquent, l'homme. En effet, les humains peuvent être exposés aux toxines cyanobactériennes par diverses voies, notamment par la contamination des sources d'eau potable, la consommation d'aliments contaminés et le bain dans des plans d'eau contenant des efflorescences toxiques (Rocha et al., 2023).

2 Généralités sur la spiruline

2.1 Historique sur la spiruline

Spiruline nommée Tecuitlatl par les Aztèques, cela signifie pierre excréments au XVIe siècle. Plus tard, en raison de l'épidémie de maladies contagieuses, de nouvelles coutumes ont été adoptées par les gens telles que de nouveaux aliments, les changements religieux, politiques et sociaux et le thème de Tecuitlatl s'est terminé. On ne savait pas jusqu'à quand l'homme a commencé à utiliser microalgues, mais à l'heure actuelle, ces ressources peuvent être appelées ainsi, « vert tendance ».

Spiruline - " Petits gâteaux faits d'une algue semblable à de la boue, qui a une saveur de fromage, et que les indigènes extrayaient du lac pour faire pain, …". Ils sont séchés pour former des galettes appelées "Dihe" ou "Die". De retour Au 9ème siècle, sous l'Empire du Kanem, seule la Spiruline avait une longue histoire au Tchad (Ali & Saleh, 2012).

2.2 Les caractéristiques de la spiruline

Spiruline est une microalgue photosynthétique, filamenteuse, bleu-vert, semblable à une spirale de longs fils fins sous le genre *Arthrospira*, le phylum Oscil latoriacées. On les appelle algues bleu-vert (cyanobactéries) car de la présence de vert (chlorophylle) et de bleu (phycocyanin) des pigments dans sa structure cellulaire. Il y a deux points communs espèce importante qui est utilisée en raison de sa valeur nutritive, *Spirulina maxima* et *Spirulina plantensis*. On la trouve naturellement dans le Région de l'Afrique centrale autour du lac Tchad, du Niger, de l'Afrique de l'Est, le long avec la vallée du Grand Rift et le Mexique, où il est régulièrement utilisé comme source de nourriture humaine et inclus dans l'alimentation de nombreux poissons, dont le Tilapia (Mosha, 2019).

2.3 Composition nutritionnelle

L'analyse chimique de la spiruline a débuté en 1970, ce qui ont montré que la spiruline était une excellente source de protéines, de vitamines et de minéraux

Les protéines constituent environ 60 à 70 % de son poids sec. Contient une teneur élevée en provitamine A (β-carotène), riche source de vitamine B12 et utilisé dans le traitement de l'anémie pernicieuse. Lipides constituent environ 4 à 7 %. Il fournit des quantités adéquates de fer dans femmes enceintes anémiques. Les glucides représentent environ 13,6 %. Il a 2,2 % à 3,5 % d'ARN et 0,6 % à 1 % d'ADN. Il possède également peu de ressources naturelles des pigments tels que les carotènes, la chlorophylle a et la phycocyanine et ces micro-organismes sont utilisés comme source de pigmentation pour les poissons, œufs (Ali & Saleh, 2012).

2.4 Le genre Arthrospira platensis

Spirulina platensis (*S. platensis*), également connue sous le nom d'*Arthrospira platensis*, est une ancienne plante procaryote inférieure qui appartient à la catégorie des Cyanophyta, Cyanophycean et Oscillatoria. Morphologiquement, *S. platensis* est composé d'un corps filamenteux simple ou multicellulaire, de 200 à 500 µm de long, de 5 à 10 µm de large, cylindrique, lâche ou serré, courbé en spirale régulière, comme une horloge. En tant que cyanobactérie microscopique respectueuse de l'environnement, *S. platensis* se développe principalement dans les lacs salés alcalins et se caractérise par sa croissance rapide et sa consommation de peu d'énergie et d'eau par kilogramme (Ali & Saleh, 2012).

2.5 Potentiels des cyanobactéries

2.5.1 Effets de la spiruline sur la santé

Bien que la spiruline ait été historiquement utilisée comme aliment composant, il a été étudié de manière approfondie en utilisant expériences in vitro et in vivo pour son rôle chez l'homme gestion de la santé. Un grand nombre de publications couvrant les aspects sanitaires de la spiruline en culture cellulaire et tissulaire, les tests sur les animaux et les essais cliniques sur l'homme sont apparus depuis les années 1990. Ces articles décrivaient des expériences approches impliquant des préparations de cellules entières, diverses extraits cellulaires et biomolécules purifiées pour élucider l'avantage potentiel pour la santé de la consommation de ce microalgues, avec des résultats passionnants jusqu'à présent. Les effets potentielle sur la santé comprennent l'immunomodulation, les activités antioxydantes, anticancéreuses, antivirales et antibactériennes, ainsi que effets positifs contre la malnutrition, l'hyperlipidémie, diabète, obésité, réactions allergiques inflammatoires, des toxicité induite par les métaux lourd /produits chimiques, des dommages causés par les radiations et anémies (Wan et al., 2016).

2.5.2 Activité antivirale de la Spiruline

La spiruline possède dans sa constitution tous les produits biochimiques qui peuvent construire un système immunitaire sain, qui élimine également les radicaux libres. Les composés extraits *d'Arthrospira* ont une activité inhibitrice contre un large éventail de virus tels que le VIH-1, le HSV-1, le HSV-2, le HCMV, grippe de type A, rougeole, etc. Les extraits de cyanobactéries ont effet antimutagène et anticancéreux et peut empêcher le développement et la croissance des tumeurs ainsi que d'inhiber les métastases ou la prolifération de cellules cancéreuses. Il a été démontré que *S. platensis* minimise la réplication du VIH-I chez lignées de lymphocytes T humains, cellules mononuclées du sang périphérique (PBMC) et Cellules de Langerhans (LC) (Ali & Saleh, 2012).

2.5.3 Effets pro-inflammatoires et antioxydants

L'inflammation et le stress oxydatif contribuent tous deux à la pathogenèse de diverses maladies, notamment l'athérosclérose, l'hypertrophie cardiaque, l'insuffisance cardiaque et l'hypertension. Surproduction d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), indiquant un stress oxydatif, a été observé chez ces maladies cardiovasculaires et excessives l'inflammation de la paroi artérielle est un facteur de risque de maladies telles que l'athérogenèse. Cependant, tant in vivo et des études in vitro indiquent que le supplément de spiruline est un agent antioxydant mais

est surtout un agent pro-inflammatoire. Il renforce l'activité antioxydante et favorise la production d'anticorps et de cytokines chez les sujets sains modèles animaux et modèles de maladies (Wan et al., 2016).

2.5.4 Effets anticancéreux

Plusieurs études ont montré que la spiruline ou ses extraits pouvaient prévenir ou inhiber les cancers chez les humains et les animaux. Des études in vitro suggèrent les polysaccharides uniques de la spiruline améliorent les enzymes du noyau cellulaire l'activité et synthèse de réparation de l'ADN (Ali & Saleh, 2012).

2.5.5 Ressource pour la production de biocarburants

La recherche sur les biocarburants ne se limite pas à trouver le bon choix de matériaux et sa conversion en biocarburant, mais elle doit également englober l'utilisation des sous-produits générés lors de la transformation et la production de ces biocarburants d'une manière sûre pour la production de lipides, qui peuvent être utilisés comme matière première pour les biocarburants. Ainsi, les micro-organismes photosynthétiques comme les cyanobactéries, peuvent mieux servir l'objectif de la production de biocarburants d'une manière plus économique et plus durable sur le plan environnemental et peuvent remplacer la majeure partie de l'utilisation de combustibles fossiles (Zahra et al., 2020).

2.5.6 Biofertilisants

Les activités anthropiques peuvent entraîner une infertilité, une détérioration et une salinisation des sols, qui en retour peuvent potentiellement réduire la superficie des terres arables et menacer la sécurité alimentaire. Les cyanobactéries peuvent être utilisé comme biofertilisants naturels et contribuer à une productivité accrue dans une variété de secteurs agricoles et conditions écologiques (Zahra et al., 2020).

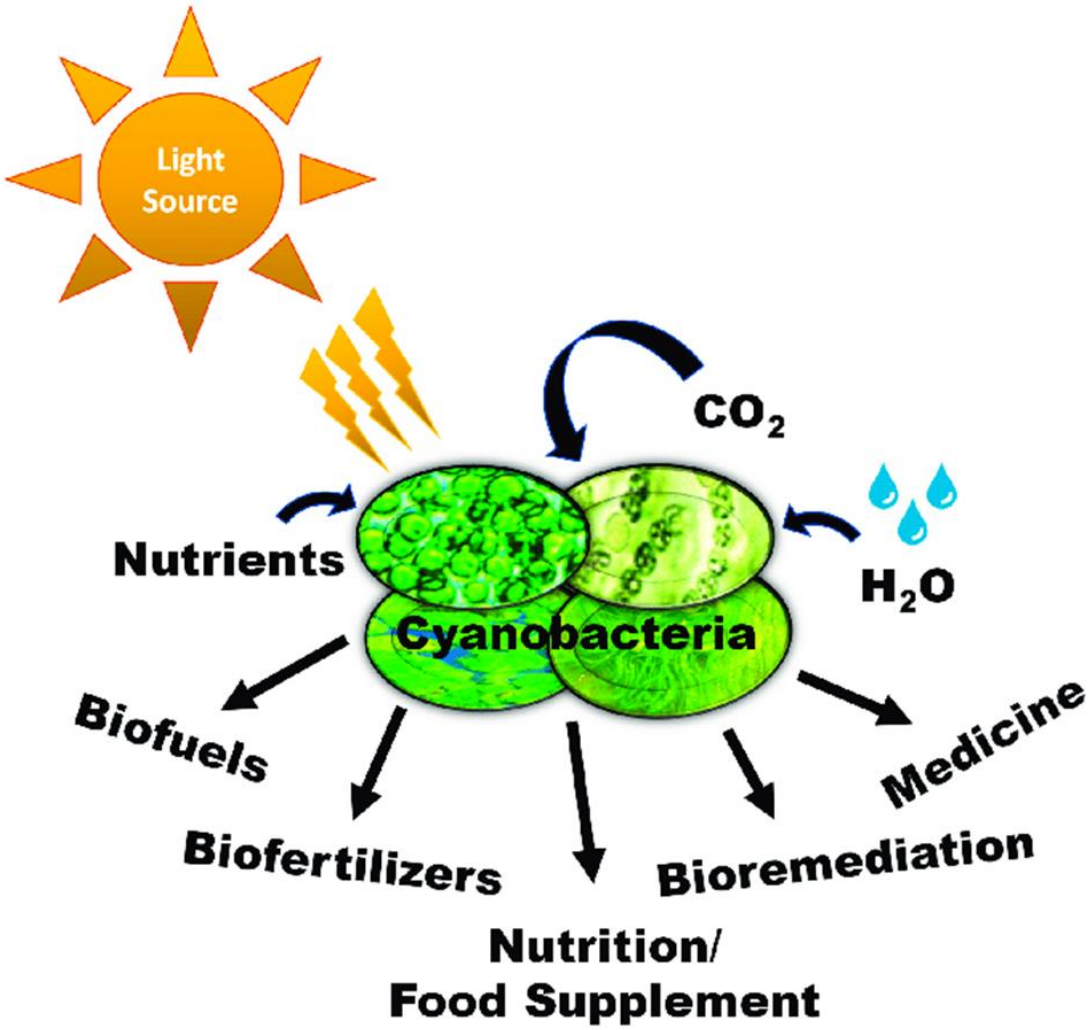


Figure 2: Aperçu du potentiel des cyanobactéries dans différents domaines de la science et du développement (Zahra et al., 2020).

2.6 Profil de sécurité

La spiruline est consommée comme aliment par les humains depuis longtemps et il est actuellement largement utilisé comme aliment supplément, notamment en Asie. La spiruline est généralement considérée comme non danger pour la consommation humaine. Contrôle de qualité pour la culture et la transformation de la spiruline pour éviter toute contamination est obligatoire pour garantir la sécurité des produits à base de spiruline (Wan et al., 2016).

Chapitre 02

Stress abiotique

1 Stress abiotique

Le stress abiotique chez les plantes est défini comme tout changement dans les conditions de croissance, dans l'habitat naturel de la plante qui modifie ou perturbe l'homéostasie métabolique. Comme les changements en croissance, la condition nécessite une modification des voies métaboliques, pour atteindre nouvelle homéostasie, dans un processus généralement appelé acclimatation. C'est l'un des facteurs majeurs qui affectent la croissance des plantes et il est responsable des plus grandes pertes dans la production agricole, où la croissance les réductions peuvent atteindre 50 % dans différentes cultures; aussi, le stress abiotique est considéré comme un défi supplémentaire induisant un fort effet sur les plantes et ajoutant à les dommages causés par le stress biotique comme les ravageurs ou les attaques d'agents pathogènes (Khan et al., 2020).

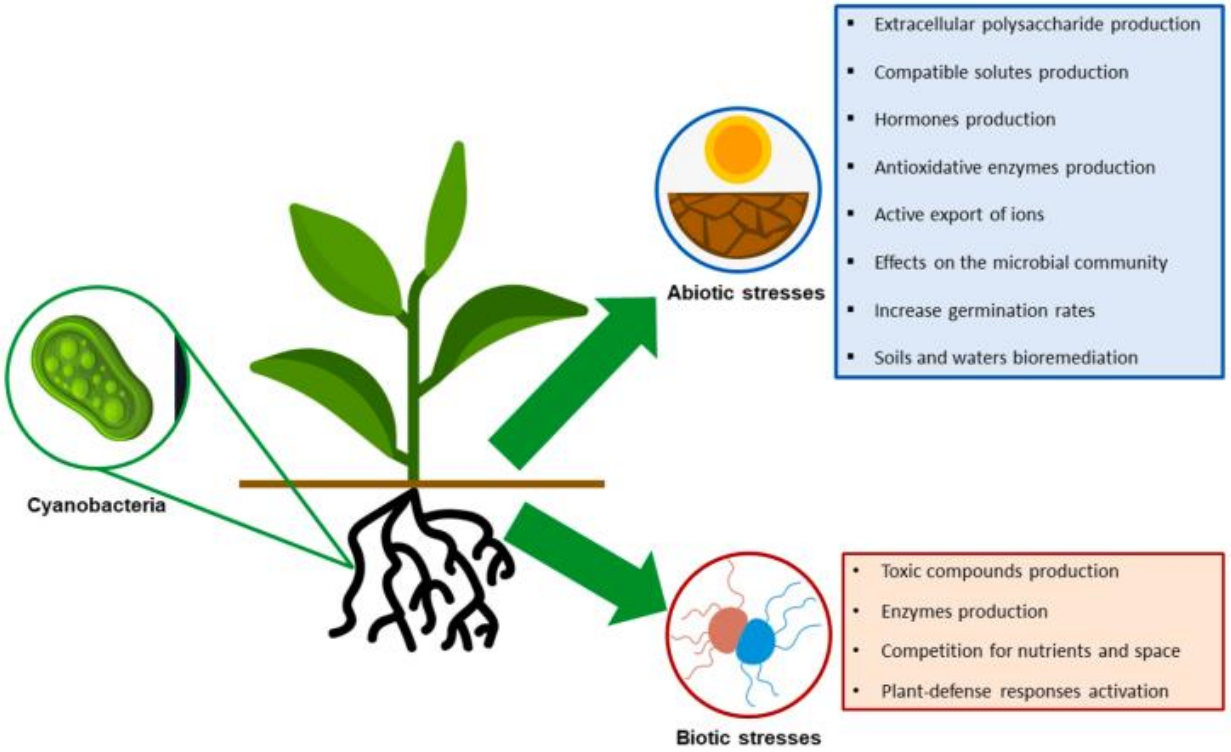


Figure 3: Infographie montrant les mécanismes impliqués dans la promotion de la tolérance des plantes aux stress abiotiques et de la résistance aux stress biotiques par l'utilisation de cyanobactéries en agriculture (Poveda, 2021).

1.1 Stress salin

La salinité est un stress majeur limitant l'augmentation de la productivité des récoltes agricole; plus de 20 % des terres cultivées dans le monde sont affectées par le stress salin et cette

superficie augmente chaque année ; par conséquent, le stress dû à la salinité réduit la production agricole et provoque différents changements dans les processus physiologiques et métaboliques des tissus végétaux ; ce changement dépend de la gravité et de la longévité du stress ; en fin de compte, le stress dû à la salinité peut inhiber la productivité des cultures ; De plus, on sait initialement que la salinité du sol réprime la croissance des plantes sous la forme d'un stress osmotique qui est ensuite suivi d'une toxicité ionique (Khan et al., 2020).

La salinité du sol est l'un des principaux éléments de dégradation des sols, elle peut provenir des facteurs naturels ou des résultats d'activités humaines comme l'utilisation excessive d'engrais chimiques ; par conséquent, le stress dû à la salinité diminue la production agricole dans les zones arides et semi-arides (Khan et al., 2020).

1.1.1 Effets de la salinité sur les plantes

La salinité est considérée comme l'un des stress abiotiques les plus critiques qui inhibent la productivité des plantes glycophytes dans le monde entier. Le stress de salinité provoque à la fois des effets ioniques et effets osmotiques sur les plantes et la plupart des réponses connues des plantes à la salinité sont liés à ces effets. L'accumulation de sel dans les feuilles s'accélère la sénescence prématurée, diminuant l'apport d'assimilats à la croissance régions et réduisant ainsi la croissance des plantes. L'inhibition de la croissance est la blessure principale qui entraîne d'autres symptômes ; il est considéré comme un effet immédiat sur la croissance des plantes par l'inhibition de l'élongation cellulaire ; de plus, le stress salin induit le la synthèse de l'acide abscissique (ABA) qui est transportée vers les cellules de garde et les stomates fermés, puis la photosynthèse diminue, et une photo-inhibition et un stress oxydatif se produisent, bien que sous un choc de salinité sévère, les cellules meurent directement. Le sodium et le chlorure sont les ions les plus réguliers dans les sols ou l'eau salins, accumulation excessive les ions sodium dans la solution du sol autour de la surface des racines réduisent la nutrition en potassium des plantes, en raison des forts effets inhibiteurs des ions sodium sur l'absorption du potassium par les racines (Khan et al., 2020).

1.1.2 Mécanismes de tolérance au sel chez les cyanobactéries

Les cyanobactéries démontrent une tolérance considérable au stress salin. La capacité de tolérance dépend de plusieurs mécanismes physiologiques y compris l'accumulation de substances inorganiques ou organiques osmorégulateurs et extrusion active de sodium de l'intérieur des cellules. Le stress lié à la salinité est rencontré comme un problème courant

pendant sa production continue de biomasse. Finalement, la lumière naturelle du soleil est élevée dans les productions extérieures de la spiruline, le stress de salinité s'accompagne généralement de photoinhibition de la photosynthèse. Il a été indiqué que *S. platensis* s'est adapté au stress de salinité en augmentant métabolisme des glucides dans les cellules (Zeng & Vonshak, 1998).

1.1.2.1 Protéines de transport membranaire actives

Protéines de transport membranaire actives, le maintien de l'équilibre ionique intracellulaire en exprimant les transporteurs associés constitue une stratégie de résistance importante contre le stress salin. Une série de transporteurs pertinents pour la tolérance aux sels ont été identifiés et caractérisés chez les cyanobactéries, tels que différents antiporteurs Na+/H+, le système Mrp et l'ATPase pompant le Na+. Jusqu'à présent, seule une ATPase de pompage Na + putative de type F0F1 a été identifiée chez la cyanobactérie halotolérante Aphanothece halophytica, considérée comme probablement associée à la tolérance plus élevée au sel de cette souche. De plus, des opérons homologues ont également été trouvés dans certaines cyanobactéries telles que *Acaryochloris marina* et *Synechococcus sp* (Cui et al., 2020).

1.1.2.2 Synthèse de solutés compatibles

La tolérance au sel est étroitement liée aux principaux solutés compatibles dans cyanobactéries. Les premières études ont montré que les souches cyanobactériennes ayant une faible tolérance au sel accumulent généralement du saccharose ou du tréhalose, tandis que les souches ayant une tolérance modérée au sel accumulent du glucosylglycérol (GG) et que les souches hautement halotolérantes synthétisent respectivement la glycine bétaïne (GB) et le glutamate bétaïne (Cui et al., 2020).

1.1.2.3 Accumulation de lipides et d'alcanes

Une série de cyanobactéries sont capables d'accumuler des lipides et des alcanes sous l'effet du stress salin. L'augmentation des acides gras insaturés pourrait être une réponse adaptative des cyanobactéries pour résister au stress salin. De plus, une étude précédente a montré qu'un mutant par délétion des gènes de synthèse des alcanes dans Syn7942 ne peut pas produire d'alcanes sensibles au sel. De plus, le défaut de croissance sous stress salin pourrait être restauré en surexprimant les gènes de synthèse des alcanes de *A. halophytica* dans Syn7942 (Cui et al., 2020).

1.1.2.4 Seconds messagers

Récemment, une série de seconds messagers ont été identifiés, tels que le di-AMP cyclique (c-di-AMP) et le di-GMP cyclique (c-di-GMP), qui jouent un rôle essentiel dans les réponses cellulaires aux stress environnementaux (Cui et al., 2020).

1.1.3 Causes de la salinité

1.1.3.1 Salinisation primaire

Il existe diverses raisons naturelles à l'augmentation de la salinité des sols, telles que les facteurs hydrologiques et processus pédologiques, facteurs climatiques et gestion de l'eau qui pourraient augmenter la salinisation des sols, en particulier dans les zones ASAL ; de plus, l'évapotranspiration joue un rôle très vital dans la pédogenèse de la solution saline, en particulier dans les ASAL (Hasanuzzaman & Tanveer, 2020).

1.1.3.2 Salinisation secondaire

Les sols affectés par le sel secondaire sont ceux qui ont été salinisés par l'homme. Facteurs, principalement dus à des méthodes d'irrigation inappropriées, à l'utilisation de faible une qualité d'eau pour l'irrigation, et comprend également, sans s'y limiter, les éléments suivants les raisons: (a) Déforestation.

(b) Accumulation de sels aéroportés ou hydriques dans les sols.

(c) Salinisation causée par une contamination par des produits chimiques.

(d) Surpâturage (Hasanuzzaman & Tanveer, 2020).

1.2 Effet de la toxicité des métaux lourds sur les plantes

Le niveau toxique d'exposition des plantes aux métaux lourds active un large éventail d'altérations physiologiques et métaboliques. La réponse toxique varie entre différents métaux lourds puisqu'ils possèdent différents sites d'action dans la plante. Le déclin de la croissance des plantes ainsi que la nécrose des feuilles, la diminution du taux de germination des graines, la perte de turgescence et l'appareil photosynthétique paralysé sont les preuves visuelles les plus courantes du stress dû aux métaux lourds. L'existence de métaux lourds induit des altérations ultrastructurales, biochimiques et moléculaires dans les tissus et cellules végétales. De plus, les métaux lourds interfèrent avec l'absorption de l'eau, son transport, sa transpiration, le métabolisme des nutriments et influencent l'absorption des métaux essentiels (Dubey et al., 2018).

Le stress dû aux métaux lourds induit l'accumulation d'un excès de radicaux libres et d'espèces réactives de l'oxygène telles que les radicaux anions superoxydes (O2 •−), les radicaux hydroxyles (OH•) et le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à l'intérieur de la cellule (Dubey et al., 2018).

1.3 Nickel

Ces dernières années, en raison d'un développement industriel incontrôlé à l'échelle mondiale, de nombreuses substances chimiques ont entraîné une pollution importante de l'air, de l'eau et du sol, à tel point que la pollution de l'environnement constitue désormais un grave problème mondial. Le nickel (Ni) n'est que l'un des nombreux métaux traces omniprésents émis dans l'environnement par des sources naturelles et anthropiques. La concentration croissante de Ni déposée dans les sols agricoles par les particules de Ni en suspension dans l'air est particulièrement préoccupante (Bhalerao et al., 2015).

Les plantes absorbent le nickel du sol et de l'eau par les racines, en fonction de sa disponibilité et de sa concentration, et une petite quantité peut même être extraite de l'atmosphère. Sa disponibilité peut être affectée par un certain nombre de facteurs tels que le pH et les caractéristiques du sol, la rhizosphère et la présence d'acides organiques, tandis que son accumulation dans les plantes peut être affectée par les espèces végétales, les plantes, le génotype, les facteurs environnementaux et la présence d'autres minéraux et nutriments. Le nickel affecte négativement la croissance des plantes, tant sur le plan morphologique que physiologique. Cependant, le seuil de concentration phytotoxique du Ni peut varier selon l'espèce, l'écotype, le cultivar, etc. Mais aussi selon la période d'application des métaux toxique (Singh et al., 2023).

1.3.1 Origine et sources de la pollution au nickel

Le Ni est l'une des nombreuses substances qui peuvent être présentes dans l'environnement en raison de ses émissions provenant de sources naturelles et artificielles. On le trouve dans presque tous les compartiments environnementaux ou êtres vivants. La concentration de Ni dans le sol varie considérablement en fonction de la géologie et des apports anthropiques, mais varie généralement de 3 à 1 000 mg kg^{-1}. Le Ni peut être trouvé dans les sols sous diverses formes, y compris des minéraux inorganiques qui sont absorbés par les surfaces de cations organiques ou des complexes sur les surfaces d'échange de cations inorganiques. Les concentrations de Ni dans les sols varient considérablement selon la roche mère, principalement

en raison des émissions atmosphériques. Cependant, les processus de formation des sols et la pollution affectent également sa présence dans les sols de surface. En général, les argiles, les schistes, les grès et les calcaires contiennent de faibles concentrations de Ni, tandis que les sols constitués de roches ignées contiennent des Ni relativement plus élevés. La répartition du Ni dans l'environnement, notamment dans l'air, le sol, l'eau et les sédiments, est affectée par de nombreux facteurs naturels et anthropiques (Rizwan et al., 2024).

1.3.2 Contamination du sol par le nickel

Un métal trace extrêmement dangereux et assez abondamment présent dans le monde naturel est le nickel (Ni), capable de provoquer des effets néfastes importants et persistants sur la santé humaine. Le nickel (Ni) se trouve dans la lithosphère, les roches sédimentaires et le sol à des concentrations de 0,2 mg kg^{-1}, 0,3 mg kg^{-1} et 0,53 mg kg^{-1}, respectivement. Cependant, dans les eaux du sol et les eaux souterraines, les concentrations de nickel sont beaucoup plus faibles, mesurant respectivement 5,0 µg L^{-1} et 1 µg L^{-1}. L'empoisonnement des sols et des eaux souterraines par le nickel résulte d'une combinaison de processus naturels et d'activités humaines, entraînant des conséquences néfastes lorsqu'il pénètre dans le corps humain par la consommation d'eau potable et de sources alimentaires contaminées. De plus, l'élimination non réglementée et dangereuse des déchets a considérablement élevé les niveaux de nickel (Ni) dans le sol et les plans d'eau. Un rapport de la fin des années 1980 indiquait que les sources géogéniques et les activités anthropiques mobilisaient respectivement environ 24 000 et 4,5 tonnes métriques par an de nickel dans la biosphère. Cela démontre clairement le rôle dominant des activités anthropiques dans les rejets de nickel dans l'environnement (Ullah et al., 2024).

1.3.3 Accumulation de nickel dans les plantes

Le nickel est principalement insoluble dans le sol et n'est pas biodisponible pour les plantes. En libérant exsudats racinaires qui modifient le pH de la rhizosphère, les plantes peuvent rendre le Ni plus soluble. La majeure partie du Ni est absorbée via les voies apoplastique et symplastique. Voies. La voie apoplasique est un processus de diffusion passive et implique les espaces non vivants entre les cellules et les membranes cellulaires. La voie symplasique est un mécanisme de transport à travers la membrane plasmique qui repose sur des gradients de potentiel électrochimique et de concentration et nécessite une dépense énergétique. Lorsque le Ni atteint la racine, il forme des complexes avec des agents chélateurs qui perdent leur toxicité lorsqu'ils sont immobilisés dans la paroi cellulaire, le cytoplasme ou vacuoles. Toxicité du nickel

et transport longue distance jusqu'au tournage sont réduits lorsqu'ils sont stockés dans les vacuoles racinaires. Les tournages sont là où le Ni est séquestré, tandis que les vacuoles végétales ou les parois cellulaires sont là où il est détoxifié (Dahija et al., 2024).

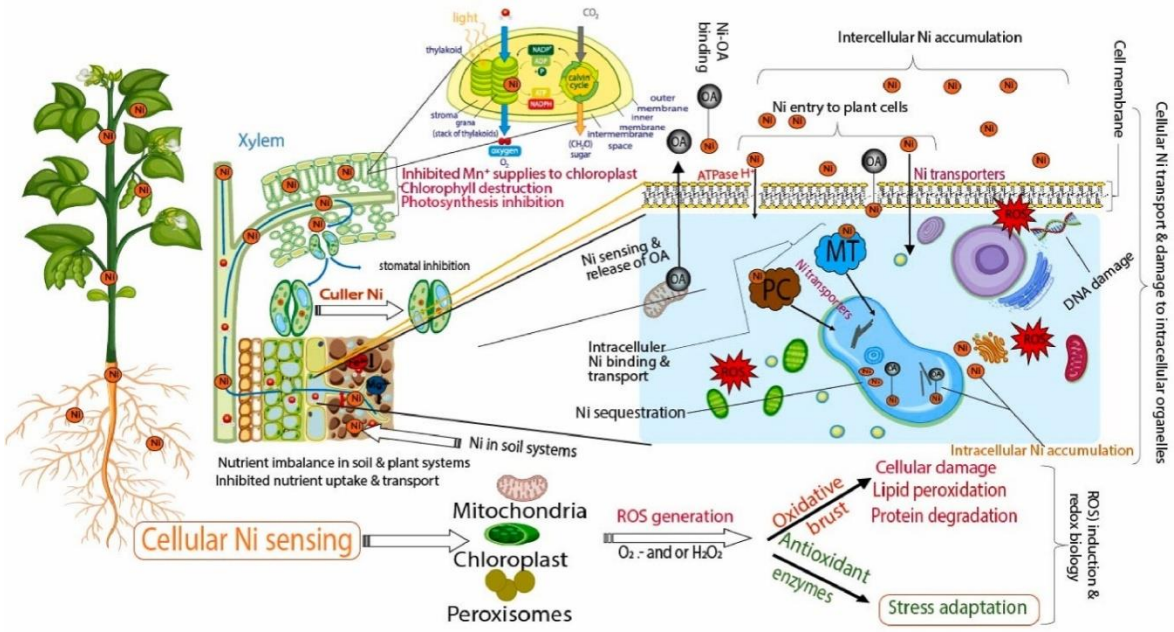


Figure 4: Représentation schématique de l'absorption/translocation du Ni dans la cellule végétale (Rizwan et al., 2024).

Chapitre 03

L’exopolysaccharides et les cyanobactéries dans l’agriculture

1 Exopolysaccharides

Les microbes sécrètent dans le milieu environnant des polysaccharides de haut poids moléculaire et de structures diverses, appelés exopolysaccharides (EPS). Les EPS remplissent des rôles multiples qui aident les microbes à prospérer dans différents écosystèmes. De nombreux EPS sont des polymères pertinents sur le plan industriel/clinique en raison de leur biocompatibilité, de leur biodégradabilité, de leur nature non toxique et de leurs propriétés physicochimiques distinctes. Compte tenu de leur succès passé pour diverses applications allant des hydrocolloïdes aux applications biomédicales, les EPS microbiens retiennent toujours l'attention considérable des biotechnologues, Ce sont des produits de grande valeur, et leur valeur marchande va croître dans les années à venir en raison de leur potentiel nutraceutique, thérapeutique et industriel (Arserim Ucar et al., 2021).

La surface de la paroi cellulaire bactérienne, en plus des composants de la paroi cellulaire en abondance contiennent des molécules de glucides. Ces groupes sont uniques et font preuve de diversité parmi certains groupes de micro-organismes. Ceux-ci sont appelés exopolysaccharides (EPS), ou polysaccharides extracellulaires. Ils sont produits par des saprophytes, microbes pathogènes, microalgues et ont de bonnes propriétés pharmacologiques et physiques (Arserim Ucar et al., 2021).

1.1 Composition d'EPS cyanobactériens

La composition de l'EPS, caractérisée par spectroscopie EEM par fluorescence, a montré que de grandes quantités de substances de type protéique et humique étaient distribuées dans les fractions d'EPS. Parmi elles, les substances de type tryptophane étaient corrélées à la croissance des microcystes, et les substances de type tyrosine ont montré leur relation avec la quantité de cellules sous limitation d'azote. D'autres matières telles que les lipides et les acides uroniques ont également été signalées dans la fraction EPS. En outre, étant donné que l'allélopathie est un phénomène écologique/physiologique multiple et qu'elle joue un rôle crucial dans les écosystèmes aquatiques, les matières actives et allélopathiques exsudées par le phytoplancton et l'effet allélopathique ont également été notés et largement étudiés (Liu et al., 2018).

1.2 Principales variables opératoires affectant la production de polysaccharides de microalgues et de cyanobactéries

La biosynthèse EPS des cyanobactéries est très complexe, puisque les enzymes responsables sont également impliquées dans la formation des polysaccharides et des lipopolysaccharides de la paroi cellulaire. Chez les souches de microalgues, la production de polysaccharides à lieu dans l'appareil de Golgi, contrairement aux souches de cyanobactéries, chez lesquelles la synthèse a lieu dans le cytoplasme. Le processus comporte quatre étapes qui se déroulent dans différents composants cellulaires. Premièrement, l'activation des monosaccharides et la conversion en nucléotides sucres dans le cytoplasme. Plus tard, l'assemblage des unités répétitives par l'ajout séquentiel de sucres par les glycosyltransférases au niveau de la membrane plasmique. S'ensuit la polymérisation des unités répétitives au niveau de la face périplasmique de la membrane plasmique. Enfin, le polymère est exporté vers la surface cellulaire. Lors de la photosynthèse, le CO_2 est transformé en glycérate-3-phosphate (G3P), précurseur de la synthèse de différentes molécules telles que les polysaccharides et les lipides. Lors de la synthèse des lipides, après conversion du G3P en pyruvate, sa conversion en acétyl-CoA est utilisée comme précurseur pour la synthèse des acides gras dans le plaste. Alternativement, le G3P peut être converti en polysaccharides comme matériau de stockage. Dans des conditions de croissance spécifiques, c'est-à-dire une limitation en azote, le citrate du cycle de l'acide citrique est converti en acétyl-CoA qui pourrait être utilisé dans la synthèse des acides gras. Pour augmenter la production d'EPS, il est essentiel d'améliorer la synthèse des unités sucre fondamentales dans les cellules. En ce sens, différentes stratégies telles que la modification des conditions opérationnelles (manque d'azote, concentration de salinité, régime d'éclairage) et la manipulation de l'expression de multiples groupes de gènes qui favorisent la surexpression de précurseurs dans la métabolisme des sucres à partir des processus photosynthétiques (Franco-Morgado et al., 2023).

1.3 Rôle de l'EPS

Les EPS produits par les cyanobactéries et les algues vertes sont de types divers et jouent différents rôles dans le cycle de vie de ces micro-organismes allant de la formation de biofilm, symbiose et protection contre la prédation, la résistance contre divers types de stress tels que les rayonnements ultraviolets (UV), oxydation, température et stress dessiccation. Plusieurs espèces de cyanobactéries signalées habitats extrêmes tels que l'extérieur des monuments en pierre dans

les pays tropicaux comme l'Inde sont soumis à une forte exposition d'irradiation solaire. L'EPS aide également au mouvement de glissement des cyanobactéries (Kumar et al., 2018).

1.4 Application d'EPS

Ces derniers temps, les EPS produits par les cyanobactéries et les algues attirent l'attention de nombreux chercheurs en raison de leur avantage, Les EPS sont principalement utilisées dans l'industrie comme agents gélifiants et épaississants suspendant ou stabilisant la phase aqueuse. EPS produits par différents organismes avoir des caractéristiques différentes; ils ont donc des applications industrielles spécifiques. Les EPS issus de sources microbiennes sont utilisés dans les aliments (gelée, gâteaux, glaces, bonbons, vinaigrettes, sauces, sauces, boissons), les produits pharmaceutiques (capsules couvrant, activité anti-tumorale des médicaments), textiles (impressions, suspensions de colorants et de pigments), cosmétiques (corps lotion, émulsifiant), détergents, récupération d'huile, etc. Beaucoup les cyanobactéries produisent des polysaccharides sulfatés. Ces les polysaccharides interfèrent dans l'absorption et la pénétration du virus dans les cellules hôtes et inhibent la transcriptase activités (Kumar et al., 2018).

1.5 Application biotechnologiques des exopolysaccharides

1.5.1 Élimination des métaux lourds et traitement des eaux usées

L'élimination des métaux lourds et le traitement des eaux usées pourraient être effectués à l'aide des EPS. Les bactéries sont d'excellents biosorbants en raison de leur rapport surface/volume élevé et de leur nombre élevé de sites de sorption potentiellement actifs. Il a été proposé que les EPS microalgues ayant une capacité de complexation des métaux présentent une importance écologique potentielle et peuvent être utilisé comme chélate de métal naturel notamment dans les processus de purification biologique de l'eau (S. Singh et al., 2018).

1.5.2 Rôle des exopolysaccharides sous différents types de stress

Les EPS des cyanobactéries jouent un rôle majeur dans la protection des cellules contre divers stress dans plusieurs habitats. Le rôle de l'EPS dans la fixation des cellules aux sédiments et dans la protection de la nitrogénase contre les effets nocifs de l'oxygène sur les cyanobactéries benthiques. L'effet des EPS des cyanobactéries sur l'atténuation du stress salin et la germination des graines de blé, de maïs et de riz. Une augmentation de la production d'EPS a été rapportée chez les cyanobactéries avec une augmentation de la concentration en sel (S. Singh et al., 2018).

1.5.3 Industrie alimentaire et pharmaceutique

Les EPS offrent un énorme potentiel dans l'industrie alimentaire et agricole. Dans les aliments, l'EPS fonctionne avec succès comme agents améliorant la viscosité, stabilisants, émulsifiants, agents gélifiants et agents liant l'eau. Ils ont également des propriétés immunomodulatrices, antibactériennes, anticoagulantes, antimutagènes, radioprotectrices, propriétés antioxydantes, antiulcéreuses, anticancéreuses et antinflammatoires. Le spinilan de calcium, un polysaccharide sulfaté de *Spirulina platensis*, est connu pour inhiber l'invasion tumorale et métastases. Dans les industries nutraceutiques, l'Arthrospira (spiruline) et la chlorelle sont les plus importantes espèces commercialisées comme suppléments nutritionnels présentant divers avantages pour la santé, notamment l'amélioration activité du système immunitaire, effets antitumoraux et la croissance animale, en raison de leurs protéines abondantes, vitamines, actifs polysaccharides et autres composés importants (S. Singh et al., 2018).

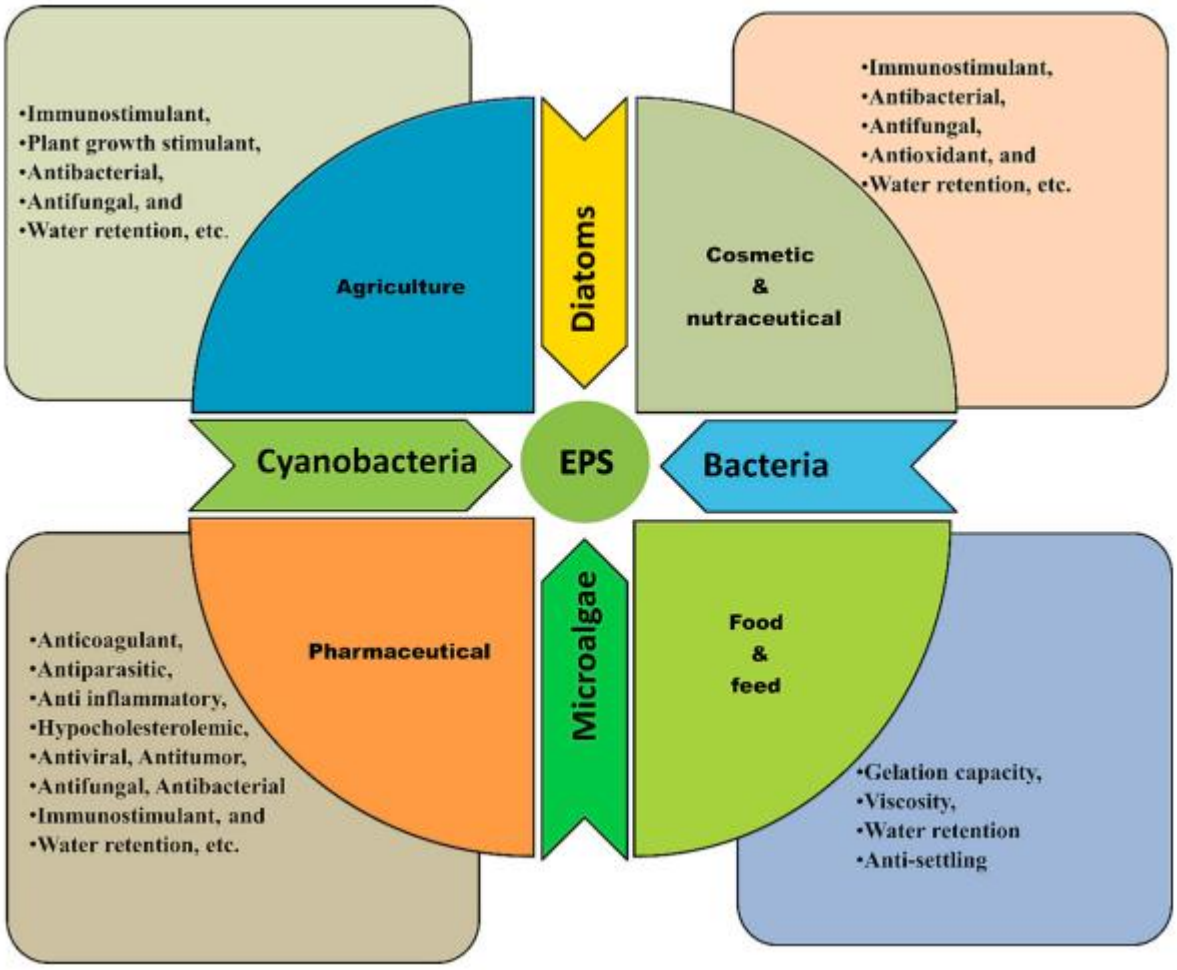


Figure 5: Application de l'EPS (Debnath et al., 2024).

2 Les cyanobactéries dans l'agriculture durable

Les microorganismes sont bénéfiques à bien des égards et sont largement utilisés dans de nombreuses pratiques de gestion agricole. Les cyanobactéries ne fixent pas seulement le N2 atmosphérique mais peuvent également décomposer les déchets organiques, détoxifier les pesticides, et les métaux lourds. Il catalyse également les cycles biologiques des nutriments et produit des composés bioactifs tels que des vitamines, des hormones et des enzymes qui favorisent la croissance des plantes. Ces bioagents minimisent le coût de la production agricole en nous fournissant bonnes pratiques de gestion telles que la rotation des cultures, l'utilisation d'engrais organiques, la lutte biologique contre les ravageurs et les maladies. Correctement l'utilisation de cyanobactéries en agriculture prouve des effets bénéfiques sur la productivité des cultures. L'utilisation d'engrais chimiques, de pesticides, le travail intensif du sol et les pratiques d'irrigation excessive sont les méthodes les plus courantes des pratiques de gestion agricole traditionnelle. Ces pratiques conduisent à une pollution de l'environnement ainsi qu'à une surexploitation des ressources naturelles telles que le sol et l'eau. L'adoption de nouvelles pratiques agricoles durables constitue une alimentation rentable et sûre pour la population. Ces systèmes sont écologiques et rentables. Certains des principaux objectifs de l'agriculture durable comprennent la production d'aliments sûrs et sains, la conservation des ressources naturelles, la viabilité économique, la restauration et la conservation des services écosystémiques. Ces respectueux de l'environnement les approches sont les plus utiles et n'endommagent aucune ressource naturelle telle que l'eau, le sol et les facteurs climatiques (Joshi et al., 2020).

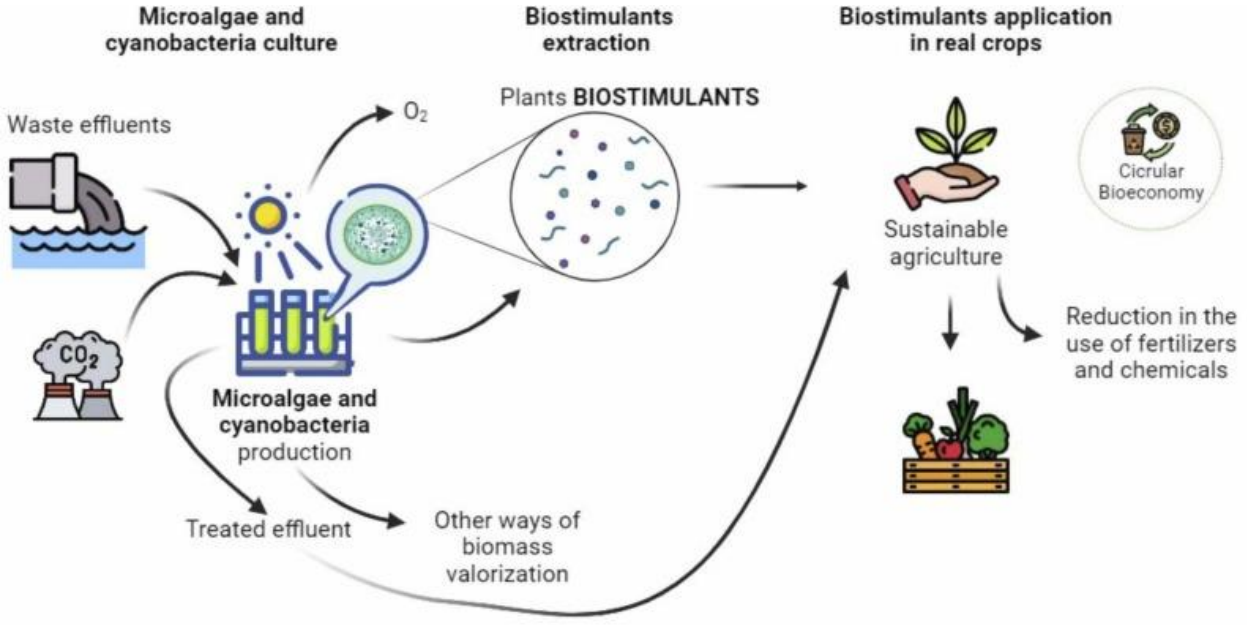


Figure 6: Principes d'économie circulaire de la production, de l'extraction et de l'utilisation de biostimulants à base de microalgues et de cyanobactéries pour une agriculture durable (Sánchez-Quintero et al., 2023).

3 Cyanobactéries et agriculture

Les microalgues sont aujourd'hui largement utilisées en agriculture principalement parce qu'elles contiennent de nombreuses molécules bioactives intéressantes pour les cultures, dont celles avec des effets biostimulants comme les phytohormones, polysaccharides ou composés phénoliques. Ces molécules sont intéressantes car dans certains cas, comme pour les phytohormones, ils sont structurellement identiques chez les microalgues et les plantes supérieures, et ils sont biosynthétisés en utilisant des voies de biosynthèse relativement conservées. L'utilisation de ces micro-organismes en agriculture gagne du terrain plus d'attention de nos jours, et de nouveaux produits apparaissent actuellement dans le marché agricole (Sánchez-Quintero et al., 2023).

Il est clair que les cyanobactéries jouent un rôle clé dans les cycles biogéochimiques de l'azote, du carbone et de l'oxygène, un aspect de grande importance dans les systèmes agricoles. Dans le sol, les cyanobactéries agissent dans la croûte supérieure, où les exopolysaccharides libèrent les particules de sol qui retiennent ensemble, ce qui entraîne l'agrégation du sol, l'accumulation de contenu organique et une augmentation de la capacité de rétention d'eau de la couche supérieure du sol. Cette augmentation de la teneur en matière organique et de l'humidité

du sol favorise l'établissement et la croissance de micro-organismes favorisant la croissance des plantes. Par conséquent, la croissance des cyanobactéries modifie positivement les propriétés chimiques et physiques des sols, ainsi que les exopolysaccharides qui produisent des cyanobactéries qui peuvent contribuer à l'amélioration et à la récupération des sols infertiles (Poveda, 2021).

Les cyanobactéries sont des micro-organismes émergents pour le développement agricole durable. Le groupe de cyanobactéries le plus utilisé pour le développement de biofertilisants est celui des diazotrophes, capables de contrôler la carence en azote des plantes, d'améliorer l'aération du sol et la capacité de rétention d'eau, et d'ajouter de la vitamine B12. Les cyanobactéries peuvent apporter environ 20 à 30 kg de N ha^{-1}, ainsi que de la matière organique du sol, ce qui est très important pour les agriculteurs économiquement faibles qui ne peuvent pas investir dans des engrais chimiques azotés coûteux. En plus du riz, de nombreuses autres études ont montré comment l'utilisation de cyanobactéries en agriculture peut augmenter la croissance des racines et des tiges, le poids sec et le rendement d'autres cultures, comme le blé (Poveda, 2021).

Après l'azote, le phosphore est le deuxième nutriment le plus important pour les plantes et les micro-organismes du sol. En ce sens, il a également été suggéré que les cyanobactéries, avec l'aide d'enzymes phosphatases, peuvent solubiliser et mobiliser les phosphates organiques insolubles présents dans le sol et améliorer la biodisponibilité du phosphore pour les plantes. Cependant, les cyanobactéries ne sont pas seulement capables d'augmenter l'acquisition de nutriments par les plantes, elles vont également favoriser activement leur germination, leur croissance et leur développement grâce à la production d'hormones végétales telles que les auxines, les cytokinines et les gibbérellines, par des genres tels que Anabaena, Anabaenopsis et Calothrix (Poveda, 2021).

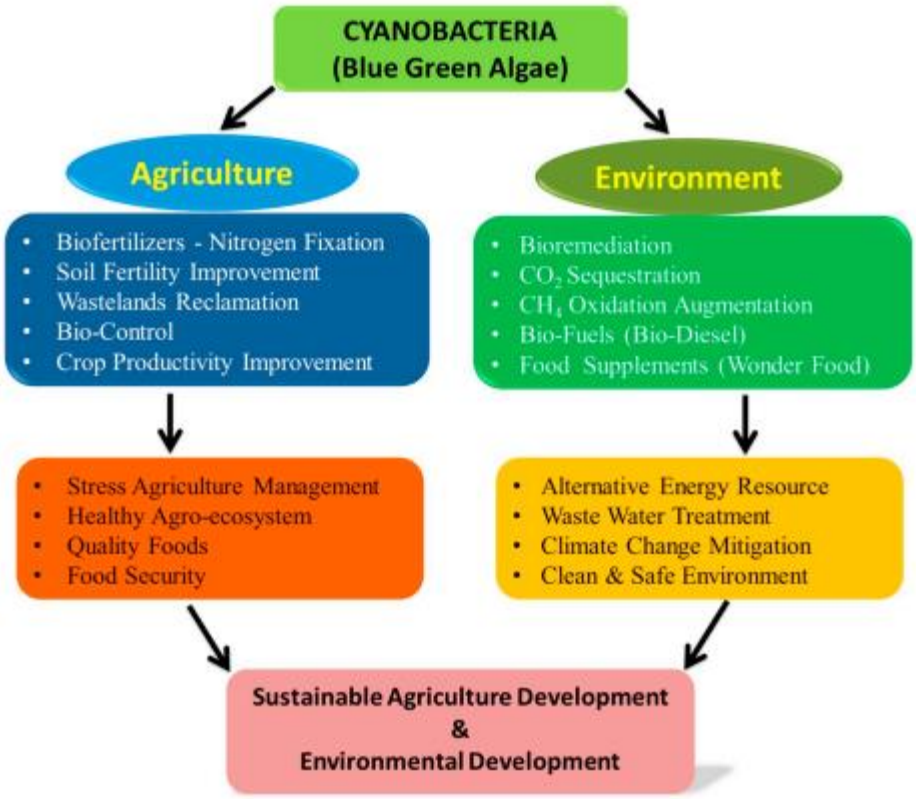


Figure 7: Une représentation théorique présente les fonctions potentielles des cyanobactéries dans l'agriculture et l'environnement durables (Chittora et al., 2020).

Partie Expérimentale

Chapitre 01
Matériel et Méthodes

Notre étude a émis l'hypothèse que l'application des exopolysaccharides (EPS) améliore la tolérance aux effets individuels et combinés de stress salin et le nickel dans le blé. Le but de notre étude est d'évaluer le rôle des EPS dans les plants de blé en réponse au stress salin et le nickel individuellement et lorsqu'ils sont combinés. Nous nous sommes concentrés sur les effets des exopolysaccharides sur les paramètres morphologiques, physiologique et biochimique en réponse au stress salin et nickel.

1 Culture et conditions de croissance des microalgues

Spirulina platensis (*S. platensis*) a été recueilli auprès du Dr. Ainas Mahfoud, et cultivé dans le milieu Zarrouk. Dans un Erlenmeyer de 500 ml dans un environnement contrôlé avec une source de lumière artificielle pendant une photopériode de 12 h pendant 30 jours. La température ambiante moyenne tout au long de l'expérience était de 26,3 ± 2 °C. Le pH du milieu de culture a été maintenu entre 8,8 et 11,0 pendant la période de culture pour éviter toute forme de contamination.

1.1 Extraction d'exopolysaccharides de microalgues (EPS)

Pour récupérer l'EPS du milieu extracellulaire, la procédure rapportée par (Parikh & Madamwar, 2006) a été suivie. Brièvement, le milieu de culture filtré, qui contenait encore un peu de biomasse, a été centrifugé à 13 000 tr/min pendant 20 min dans une centrifugeuse. Le surnageant résultant a été chauffé à 70 ° C pendant 12 h, réduisant son volume au quart. Les EPS ont ensuite été récupérés en ajoutant de l'alcool éthylique refroidi par glace. Après 12 h à 4 °C, le produit a été filtré et complètement séché dans une étuve à 60 °C. Pour éliminer le sel résiduel, les échantillons ont été resolubilisés dans de l'eau distillée puis dialysés contre de l'eau sous agitation constante à température ambiante pendant 24 h. Le produit final a été récupéré en ajoutant de l'alcool éthylique à 95 % et lyophilisé.

1.2 Caractérisation chimique et physicochimique des EPS

La méthodologie proposée par (Dubois et al., 1956) a été utilisé pour quantifier la teneur totale en glucides de chaque échantillon de l'EPS récupéré, en ajoutant du H_2SO_4 concentré à 80 % (m/v) et du phénol à 5 % (v/v). Une courbe standard a été obtenue en utilisant du d-glucose.

La teneur en sulfate de l'EPS a été déterminée après hydrolyse dans l'acide N-chlorhydrique 1 M à 105 °C pendant 5 h par la méthode à la gélatine $BaCl_2$ décrite par

(Mousavian et al., 2022). L'EPS hydrolysé a été incubé avec les réactifs (acide trichloracétique à 3 % et chlorure de baryum-gélatine) pendant 20 min à température ambiante. L'intensité de la couleur générée a été mesurée par spectrophotométrie à 360 nm. La quantité de sulfate a été calculée à partir de la courbe d'étalonnage en utilisant K_2SO_4 comme étalon.

Des analyses par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre Perkin Elmer, modèle Frontier (Waltham, MA, USA) à température ambiante, en utilisant des disques KBr, dans la plage 4000-400 cm^{-1}, avec accumulation de 20 balayages et Résolutions 4 cm^{-1}.

2 Matériel biologique et conditions de croissance

Les graines de blé (*Triticum aestivum* L.) ont été utilisées dans cette expérience fournies par direction des services agricoles de la wilaya de Médéa (DSA). Les graines de blé ont été stérilisées avec une solution d'hypochlorite de sodium (0.5%) pendant 15 min, les graines stérilisées ont ensuite été lavées plusieurs fois avec l'eau distillée. À partir de ce moment, les graines ont été conservées dans des boîtes de Pétri dans l'obscurité pour la germination pendant 48 h à 25 ± 2 °C. Au bout de 48 heures, les graines germées ont été semées dans des pots en plastique contenant 150 g de sable stérilisé.

2.1 Milieu nutritif

Les plants ont été placés dans un milieu nutritif de Hoagland contenant des micronutriments (mg L^{-1}) et des macronutriments (g L^{-1}). La composition du milieu nutritif à pleine concentration est précisée ci-dessous (Conti & Bartolucci, 2015) :

Tableau 1: La composition du milieu nutritif de Hogeland.

Micronutriments	
Produits chimiques mg L^{-1}	
Acide borique (H_3BO_3)	: 1.430
Chlorure de manganèse ($MnCl_2.4H_2O$)	: 0,910
Sulfate de zinc ($ZnSO_4.7H_2O$)	: 0,110
Sulfate de cuivre ($CuSO_4.5H_2O$)	: 0,045

Molybdate de sodium (Na_2MoO_4)	: 0,045
Chlorure ferrique ($FeCl_3$)	: 9.680
Acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA)	: 30.000

Macronutriments

Produits chimiques g L^{-1}

Nitrate de calcium ($Ca(NO_3)2$)	: 0271
Nitrate de potassium (KNO_3)	: 0126
Sulfate de magnésium ($MgSO_4.7H_2O$)	: 0123
Phosphate monopotassique (KH_2PO_4)	: 0034

3 Conception expérimentale

Les plants mûrs à feuilles secondaires ont été arrachés et transférés en pots rempli de 50 ml de solution Hoagland demi-concentrée pendant 7 jours pour l'acclimatation dans culture hydroponique. Par la suite, des plants de taille uniforme ont été soigneusement choisis et traité avec des exopolysaccharides, stress salin et nickel.

Dans cette expérience, huit groupes de plants de blé au total ont été impliqués. Chacun de ces groupes avait sept répétitions, et dans chaque répétition, il y avait deux plantes. Les groupes expérimentaux étaient des plantes témoins (CK), plantes traitées au exopolysaccharide (EPS), plantes traitées au stress salin (SS, 150mM NaCl), plantes traitées au nickel (Ni, 150µM Ni), plantes traitées au stress salin +nickel (SS +Ni), plantes traitées au exopolysaccharide +stress salin (EPS+SS), plantes traitées au exopolysaccharide+nickel (EPS+Ni), et plantes traitées au exopolysaccharide +stress salin +nickel (EPS +SS +Ni). Les plantes ont été placées pendant 7 jours avec tous les agents de stress décrits ci-dessus (C, EPS, SS, Ni, SS+Ni, EPS+SS, EPS+Ni, EPS+SS+Ni) dans la solution de Hoagland demi-concentrée. Après 7 jours de traitement, les plants ont été récoltés et analysés pour divers paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques.

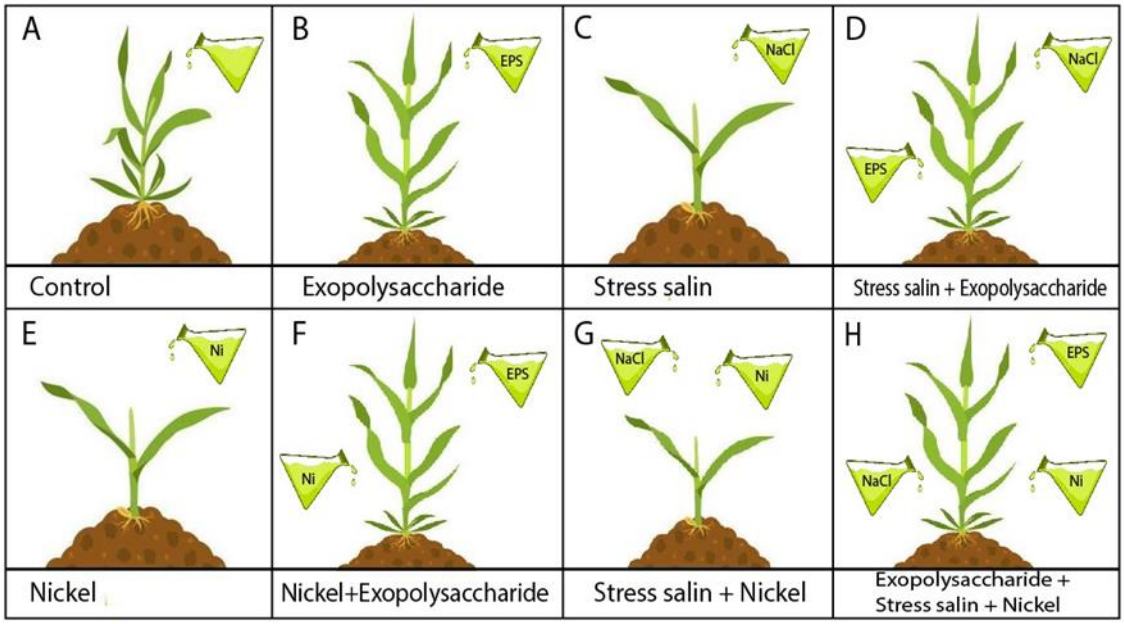


Figure 8: Plan expérimental de l'expérience, indiquant les huit boîtes expérimentales et l'application du stress salin et nickel.(A) montre les plantes témoins. (B) montre les plantes traitées uniquement à l'exopolysaccharide. (C) montre les plantes exposées au stress salin. (D) montre des plantes traitées à l'exopolysaccharide exposée au stress salin. (E) montre les plantes exposées au stress de nickel. (F) montre des plantes traitées à l'exopolysaccharide exposée au stress de nickel. (G) montre des plantes exposées au stress combiné du sel et de nickel. (H) plantes traitées à l'exopolysaccharide exposées au stress combiné sel et nickel.



Figure 9: Dispositif expérimental montrant l'impact de: (A) l'EPS. (B) stress salin et EPS+stress salin. (C) nickel et EPS+ nickel. (D) stress salin+ nickel et EPS+ stress salin+ nickel.

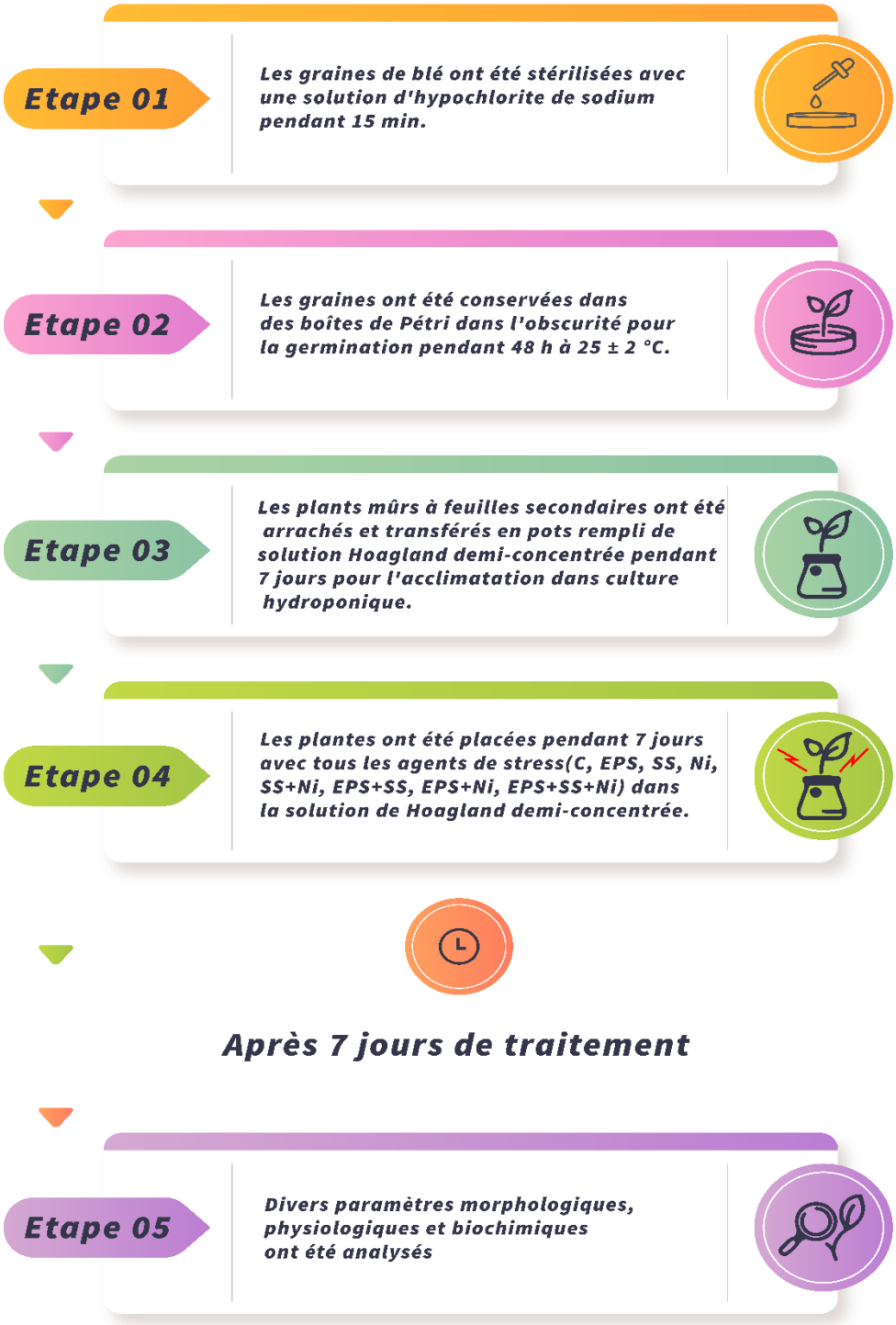


Figure.

Figure 10: Conception expérimentale.

4 Analyses morphologiques

4.1 Mesures de croissance

La croissance a été analysée en termes de poids frais des pousses (PFP), de poids frais des racines (PFR), de poids sec des pousses et des racines (PS), longueur des pousses (LP) et longueur des racines (LR). Après 7 jours de traitement, les semis de chaque pot ont été récoltés et épongés pour mesurer la longueur des racines et des pousses à l'aide d'un échelle de mètres, puis séparés en pousses et racines pesées pour enregistrer le PFP et le PFR des plantes à l'aide d'une balance numérique, Ensuite, les semis ont été mises dans une étuve à 70 °C pour mesurer le poids sec (M. Singh et al., 2017).

5 Analyses physiologiques

5.1 Extraction et estimation de la teneur en pigments photosynthétiques : chlorophylle (Chl) et caroténoïdes (Car)

Les 20 mg de feuilles fraîches de chaque plantule d'échantillons traités et non traités ont été prélevé et coupé en petits morceaux et homogénéisé en utilisant de l'acétone à 80 % (v/v). L'extrait obtenu a été centrifugé et les culots ont été remis en suspension dans de l'acétone à 80 %, jusqu'à ce qu'ils sont devenus transparents. L'absorbance des solutions extraites a été enregistrée à 663,2, 646,5 et 470 nm par spectrophotométrie. Les teneurs en chlorophylle (Chl a et b) et en caroténoïdes étaient estimé à l'aide de l'équation de (Lichtenthaler, 1987):

- Chl a (µg/ml) = 12, 25 (A663.2) — 2, 79 (A646.5)
- Chl b (µg/ml) = 21, 50 (A646.5) — 5, 10 (A663.2)
- Car (µg/ml) = [(1000 A470 — 1, 82 (Chl a) —85, 02 (Chl b)] /198

5.2 Teneur relative en eau

La teneur relative en eau a été mesurée selon le protocole de (González & González-Vilar, 2001). Après avoir enregistré le poids frais, les feuilles ont été flottées dans eau distillée pour déterminer le poids turgescent. Ensuite, les feuilles ont été mises dans un étuve à 70 °C pour mesurer le poids sec des feuilles. La teneur relative en eau (RWC) de la feuille de la plante a été déterminée comme suit :

$$RWC\ (\%) = [(FW - DW) / (TW - DW)] \times 100, \text{ où}$$

- FW est du poids frais,

- DW est le poids sec obtenu après lyophilisation à –55 ◦C pendant 72 h,
- Et TW est le poids turgescent analysé après déshydratation pendant 3 h.

6 Analyses biochimiques

6.1 Stress oxydatif : génération d'espèces réactives de l'oxygène et dommages oxydatifs

6.1.1 Peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)

Réactifs

- PPB (pH 7,0) : 10,0 mM
- Iodure de potassium (KI) : 1,0 M
- Acide trichloroacétique (TCA) : 0,1 % (p/v)

Procédure

Les 100 mg de feuilles fraîches ont été homogénéisées dans 3 ml de TCA (0,1 %) pour quantifier la teneur en peroxyde d'hydrogène. Le mélange préparé a été centrifugé à 15 000 g pendant 15 min à 40°C. Le mélange réactionnel a été préparé en utilisant 0,5 ml de PPB (10 mM, pH 7,0), 1 ml de KI (1 M) et 0,5 ml de surnageant (extrait enzymatique). L'absorbance de la solution préparée a été prise à 390 nm par rapport à un blanc (Velikova et al., 2000).

6.2 Analyse des indices de dommages oxydatifs

6.2.1 Estimation de la peroxydation lipidique

Peroxydation lipidique dans les plantules traitées et témoins de *T. aestivum* a été estimé en termes de teneur en équivalents MDA (malondialdéhyde), formés en raison à la peroxydation des acides gras insaturés. Les contenus en MDA ont été estimés par suivant la méthode de (Heath & Packer, 1968). Peroxydation lipidique dans les feuilles de chaque échantillon ont été mesurées en teneur en équivalents de MDA (malondialdéhyde), un produit de la peroxydation des acides gras insaturés.

Réactifs

- Tampon phosphate (pH 7,0) : 50,0 mM
- Acide 2-thiobarbiturique (TBA) : 00,5 % (p/v) dans 0,2 N HCl
- Acide trichloroacétique (TCA) : 20,0 % (p/v) dans une solution TBA

- TCA : 05,0 % (p/v) en EUP

Procédure

Les 100 mg de feuilles fraîches ont été homogénéisées dans du TCA à 5 % et centrifugées. À 10 000 g pendant 10 min. Dans 20 % de TCA contenant 0,5 % de TBA, 0,5 ml d'extrait ont été ajoutés. Et le mélange a été chauffé à 90 °C pendant 20 min. Après chauffage, le mélange réactionnel a été rapidement refroidi dans un bain de glace suivi d'une centrifugation. Ensuite, l'absorption de la solution réactionnelle a été prise à 532 et 600 nm.

6.3 Estimation du système de défense des antioxydants enzymatiques

6.3.1 Activité de l'ascorbate peroxidase (APX)

L'activité de l'ascorbate peroxidase a été mesurée en utilisant la méthode de Nakano & Asada, (1981).

Réactifs

- Ascorbate : 01,0 et 2,0 mM
- EDTA : 01,0 mM
- H_2O_2 : 00,4 mM
- PPB (pH 7,0) : 50,0 mM

Procédure

Pour l'estimation de l'APX, 50 mg de feuilles fraîches ont été homogénéisés dans 1 ml de PPB réfrigéré (50 mM, pH 7,0) contenant 1 mM EDTA et ascorbate 1 mM, et ont été centrifugés à 10 000 g pendant 15 min à 4 °C. Le L'extrait brut obtenu par centrifugation a été utilisé pour l'estimation de l'APX. Le mélange réactionnel préparé contenait 0,5 ml de H_2O_2 (0,4 mM), 0,5 ml d'ascorbate (2 mM), 0,8 ml de PPB (50 mM, pH 7,0) et 0,2 ml d'extrait brut (l'extrait enzymatique a été ajouté pour initier la réaction). L'absorbance de la solution a été prise à 290 nm par Spectrophotomètre UV-VIS pendant 1 min à 250C. L'activité APX a été calculée grâce au coefficient d'extinction de 2,8 mM^{-1} cm^{-1}. Une unité (U) d'activité APX est exprimé en 1 nmol d'ascorbate oxydé min^{-1}.

6.3.2 Activité du gaïacol peroxidase (POD)

L'activité du gaïacol peroxidase dans chaque ensemble a été estimée selon (Zhang & Dasgupta, 1992).

Réactifs

- Tampon phosphate de potassium (PPB, pH 6,1) : 50 mM
- Gaïacol : 1% (v/v en PPB, pH 6,1)
- H_2O_2 : 0,4% (v/v en PPB, pH 6,1)

Procédure

Les 50 mg de feuilles fraîches provenant d'échantillons non traités et traités ont été homogénéisés dans 50 Tampon phosphate de potassium mM (pH 6,1). L'homogénat a été centrifugé à 10 000 g pendant 15 min à 4°C et le surnageant a été utilisé comme extrait enzymatique brut. Le mouvement de la peroxidase a été estimé avec le gaïacol comme substrat dans un volume total de 3 ml. Le mélange réactionnel comprenait 50 mM de PPB (pH 6,1), 1 % de gaïacol, 0,4 % H_2O_2 et extrait enzymatique. Augmentation de l'absorbance due à l'oxydation du gaïacol (ε = 25,5 mM $^{-1}$ cm $^{-1}$) a été estimé à 470 nm. Une unité de l'activité POD est la quantité d'enzyme oxydante 1 nmol de gaïacol min^{-1}.

6.4 Métabolites secondaires

Extraction

Les feuilles fraîches (500 mg) ont été homogénéisées en utilisant 5 ml de solution réfrigérée à 80 % méthanol, suivi d'une centrifugation à 8 000 g (4°C) pendant 10 min. L'extrait méthanolique de feuilles obtenu a été utilisé pour déterminer les propriétés phénoliques et teneur en flavonoïdes.

6.4.1 Dosage des Polyphénols Totaux

Pour quantifier les polyphénols totaux, nous avons utilisé une version modifiée d'une méthode décrite précédemment par (Singleton & Rossi, 1965). En bref, 0,25 mL de l'extrait a été mélangé à 1,25 mL de réactif Folin-Ciocalteau à 10 % (v/v). Après une réaction de 3 minutes, 1 mL d'une solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3) avec une concentration de 75 g/L a été

ajouté. Après une incubation de 30 minutes dans l'obscurité à une température de 25 °C ± 2 °C, l'absorbance a été mesurée à 765 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV.

Les concentrations de polyphénols ont été déterminées en faisant référence à la courbe d'étalonnage, qui a été établie à l'aide d'un polyphénol d'acide gallique standard à des concentrations allant de 0 µg/mL à 125 µg/mL. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent acide gallique par gramme d'extrait sec (mg Eq GAE/g DW). Pour garantir la fiabilité des résultats, les tests ont été effectués trois fois pour la reproductibilité.

6.4.2 Dosage des Flavonoïdes Totaux

La détermination de la teneur totale en flavonoïdes dans l'extrait méthanolique des parties aériennes a été mise en œuvre par la méthode au trichlorure d'aluminium ($AlCl_3$). La quantification des flavonoïdes totaux a suivi une méthode décrite par (Zhishen et al., 1999). Plus précisément, 2 ml de l'extrait et de l'étalon ont été combinés avec 0,1 ml de solution d'AlCl3 (10 %) (m/v), 0,1 ml d'acétate de sodium (1 M) et 2,8 ml d'eau distillée. Le mélange résultant a été agité et incubé pendant 1 heure dans l'obscurité à 25 °C ± 2 °C. Après l'incubation, l'absorbance a été mesurée à 415 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV. Les concentrations de flavonoïdes ont été déterminées sur la base de la courbe d'étalonnage établie avec un flavonoïde standard (quercétine). Les résultats sont exprimés en milligrammes équivalents à la quercétine par gramme d'extrait sec (mg Eq QE/g DW). Pour garantir la reproductibilité des résultats, les tests ont été réalisés trois fois.

6.5 Les antioxydants non enzymatiques

6.5.1 Estimation de la teneur en Proline

La teneur en Pro endogène a été déterminée selon le protocole de (Bates et al., 1973). 0,5 g de tissu a été homogénéisé dans 5 ml d'acide sulfosalicylique aqueux à 3 % (p/v), centrifugé à 10 000 × g pendant 10 min et le surnageant a été collecté. À 0,5 ml d'extrait, 1 ml chacun d'acide acétique glacial et de ninhydrine acide fraîchement préparée (1: 1) ont été mélangés et bouillis au bain-marie pendant 1 h. La réaction a été terminée en plaçant le mélange sur un bain de glace et en mesurant enfin l'intensité de la couleur rouge à 520 nm. La teneur en Pro a été déterminée par comparaison avec une courbe étalon préparée avec une concentration connue de Pro.

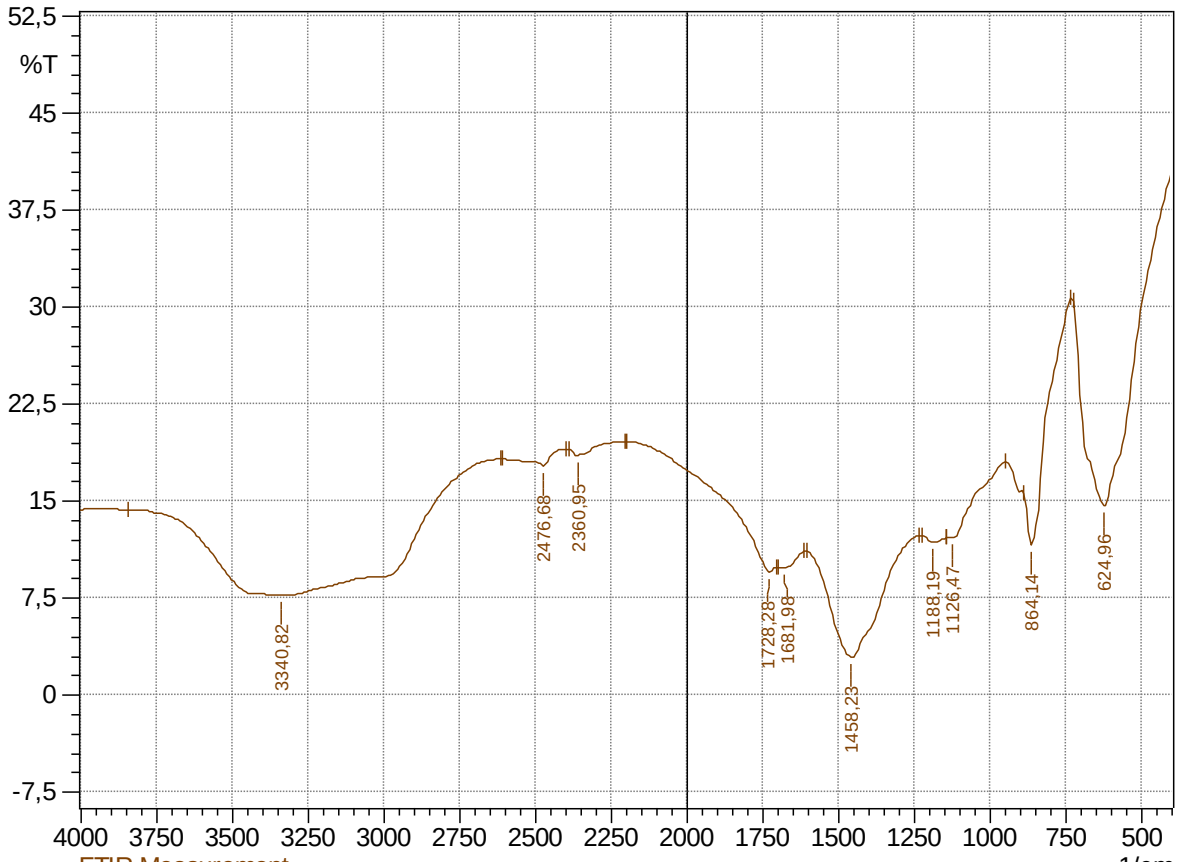
6.6 Analyses statistiques

L'analyse de variance (ANOVA, unidirectionnelle) et le logiciel de traitement de données SPSS ont été utilisés pour effectuer une analyse statistique en considérant trois répétitions indépendantes par traitement. Sur la base des résultats de l'ANOVA, et pour un niveau de réfutation de 95 %, un test de Duncan a été réalisé pour comparer les moyennes. Des différences significatives entre les traitements étaient reflétées par des lettres différentes dans les figures.

Chapitre 02
Résultats

1 Caractérisation physicochimique des EPS

Eps0.2 g



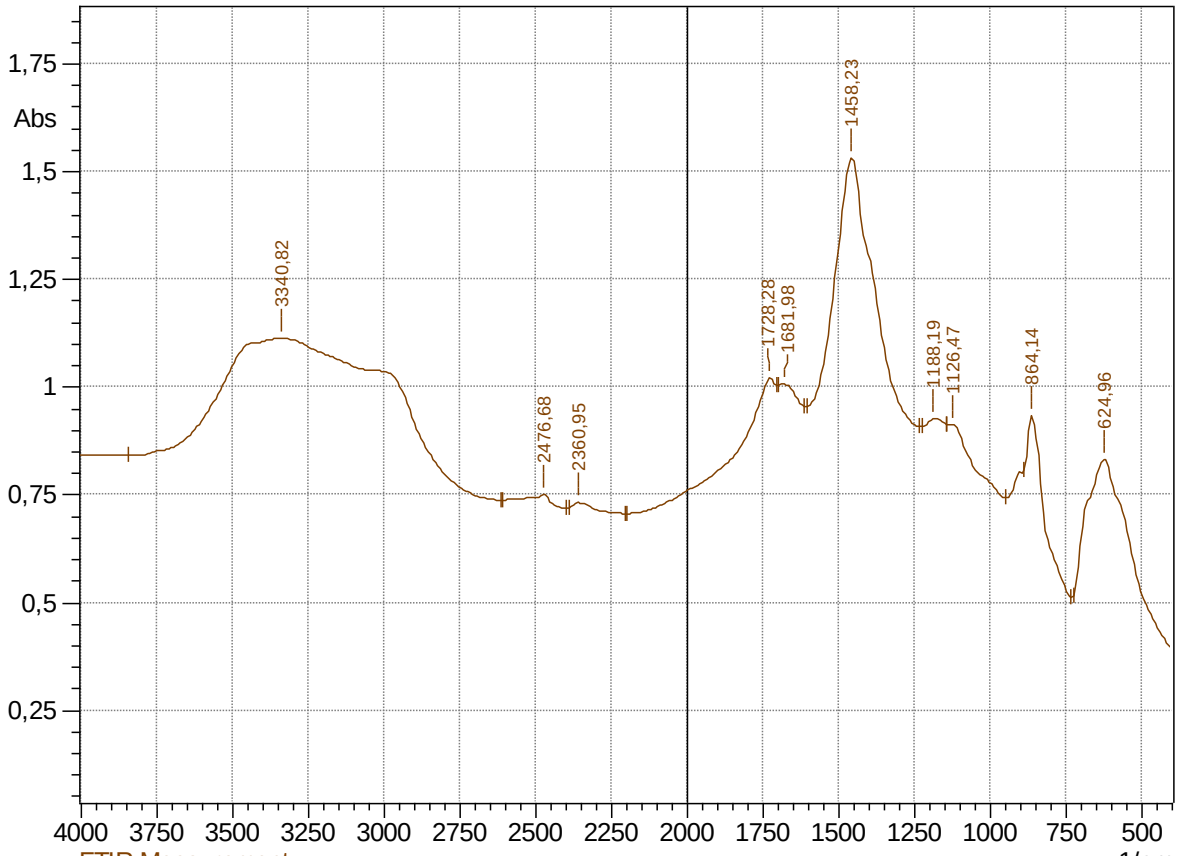


Figure 11: FTIR.

1.1 Caractérisation chimique des EPS

Tableau 2: Teneurs en sulfates et en glucides de l'EPS libérés dans le milieu d'*A. platensis*.

	Sulfate	Carbohydrate
%/EPS	12.4 ± 9.8	49.52 ± 26.5

2 Croissance des plantes sous stress salin et/ou nickel et effets des exopolysaccharides

Dans cette expérience, nous avons évalué divers paramètres de croissance des plants de blé en réponse au sel et nickel, contrainte combinée et individuelle, comme indiqué sur la figure (Fig. 12A). Le stress dû au sel et le nickel a réduit de manière significative la longueur de la partie aérienne des plantes de 37 % en (SS), 31 % en (Ni) et 43 % en (SS +Ni), et longueur des racines de 43 % (SS), 40 % (Ni) et 11 % (SS +Ni) par rapport à control (CK). Cependant, les plantes traitées par les exopolysaccharides (EPS) ont entraîné une augmentation de la hauteur des plantes de 34 % par rapport à (EPS+SS), de 33 % à (EPS+Ni) et de 28 % à (EPS+SS+Ni) ainsi

qu'une augmentation de la longueur des racines de 29 % à (EPS+SS), 29 % à (EPS+Ni) et 29 % à (EPS+SS+Ni) respectivement. De plus, l'application des EPS augmenté la longueur de la partie aérienne de 42.66 % en (EPS+SS), 31.78 % en (EPS+Ni) et 67.83 % en (EPS+SS+Ni), respectivement. De même, les EPS ont montré une augmentation de la longueur des racines des plantes de 54.88 % en (EPS+SS), 48.16 % en (EPS+Ni) et 84.06 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à leur stress respectif (SS), (Ni) et (SS+Ni).

Le stress dû au sel et nickel a considérablement diminué le poids frais de la partie aérienne (49 %, 44 % et 60 %), poids frais des racines (56 %, 51 % et 61 %) en (SS), (Ni) et (SS+Ni) par rapport à (CK). Plantes traitées exclusivement par les exopolysaccharides (EPS) a présenté un poids frais de de la partie aérienne amélioré (40 %, 36.5% et 96 %), le poids des racines fraîches (45 %, 42 % et 48 %) en comparaison avec (EPS+SS), (EPS+Ni) et (EPS+SS+Ni). De la même manière, une application des EPS a induit une augmentation significative du poids frais des plantes. Le poids frais de la partie aérienne a connu des augmentations de 88.9 % en (EPS+SS), 79.25 % en (EPS+Ni) et 117.15 % en (EPS+SS+Ni), tandis que le poids frais des racines a présenté des augmentations de 104.55 % en (EPS+SS), 92.62 % en (EPS+Ni) et 123.13 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni).

Le stress salin et le nickel réduit de manière significative le poids sec des plantes de 57.5% en (SS), 53% en (Ni) et 59% en (SS+Ni) par rapport à (CK). Cependant, les plantes traitées par les exopolysaccharides (EPS) ont entraîné une augmentation de poids des plantes de 68% par rapport à (EPS+SS), de 70 % à (EPS+Ni) et de 75 % à (EPS+SS+Ni) respectivement. De plus, le poids sec a été amélioré de 107.28 % en (EPS+SS), 84.25 % en (EPS+Ni) et 101.73 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni).

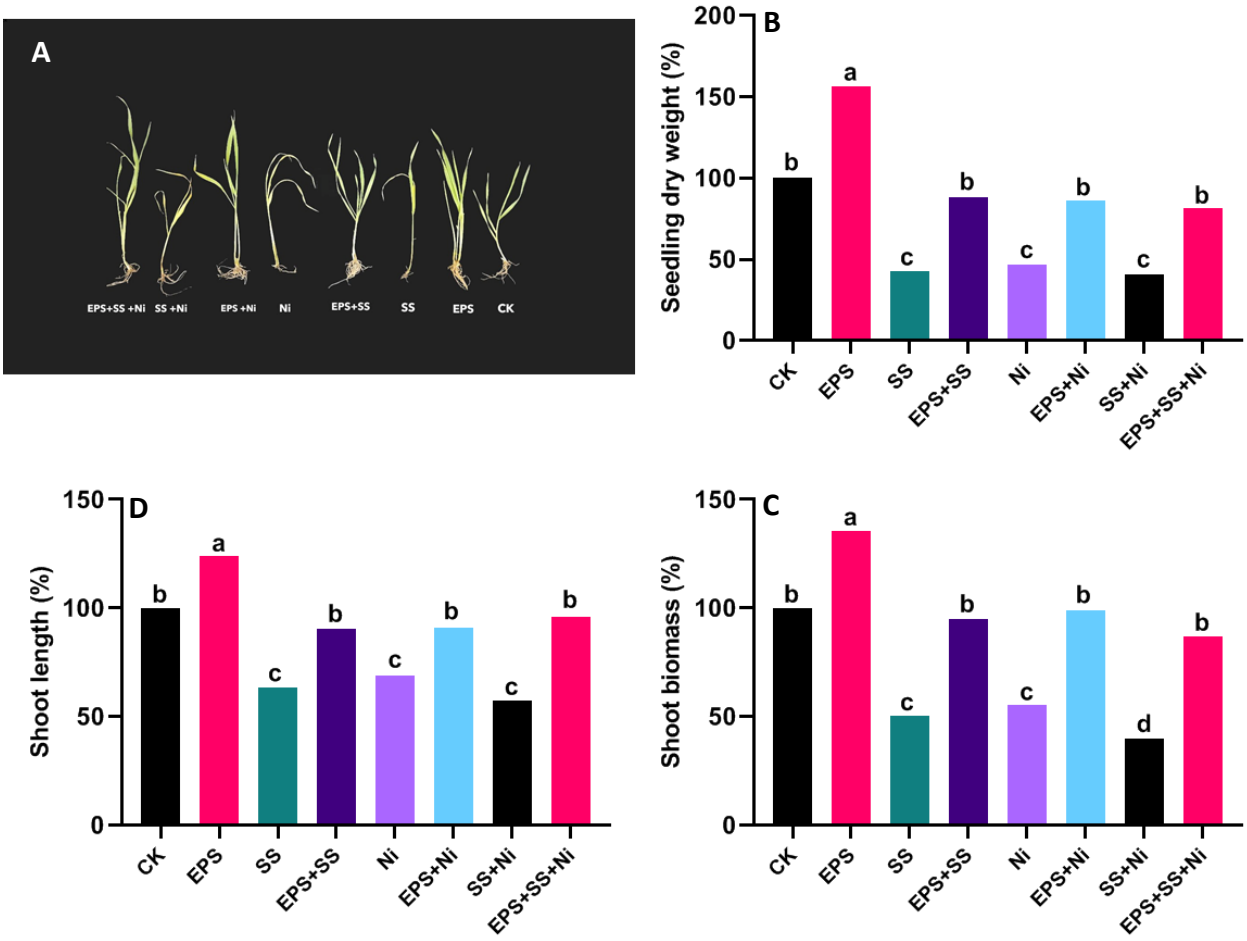


Figure 12: Évaluation des paramètres de croissance des plants de blé soumis au stress salin et/ou nickel et le rôle des EPS. Les chiffres montrent que l'EPS a augmenté la longueur des parties aériennes et la biomasse végétale en cas de stress salin et nickel individuellement ainsi qu'en combiné. (A) Montre les dommages causés par le sel et le nickel et le rôle des EPS. (B) poids sec des plantes, (C) biomasse des parties aériennes, (D) longueur des parties aériennes.

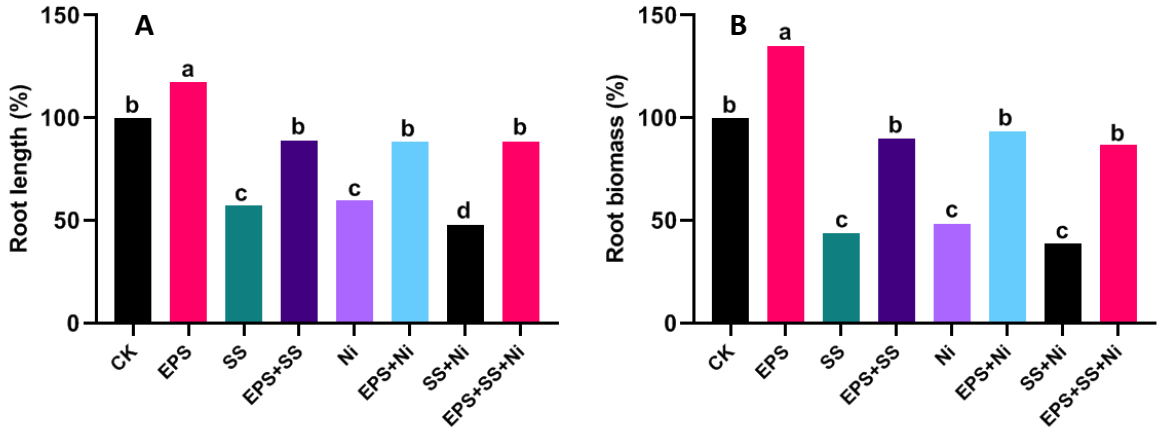


Figure 13: Evaluation des paramètres de croissance des plants de blé sous stress salin et le nickel. Les chiffres montrent que l'EPS a augmenté la longueur et la biomasse des racines en cas de stress salin et nickel individuellement ainsi qu'en combiné. (A) longueur des racines, (B) biomasse des racines.

3 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu en chlorophylle et le rôle des exopolysaccharides (EPS)

Le stress lié au sel et au nickel a entraîné une diminution significative de la teneur en chlorophylle de 60.06 %, 51.62 % et 63.75 % dans (SS), (Ni) et (SS+Ni) par rapport au témoin (CK). Cependant, 68.14 %, 50.63 % et 58.07 % d'augmentation ont été observés dans les plantes traitées par exopolysaccharides (EPS) par rapport à (EPS+SS), (EPS+Ni) et (EPS+SS+Ni). De même, le traitement par EPS a entraîné une augmentation notable de la teneur en chlorophylle, avec des augmentations de 73.72 % en (EPS+SS), 79.64 % en (EPS+Ni) et 119.25 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni).

4 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu en caroténoïdes et le rôle des exopolysaccharides (EPS)

Le stress lié au sel et au nickel a entraîné une augmentation significative de la teneur en caroténoïdes de 46.64 %, 2.17 % dans (SS), (Ni) et une diminution de 52.65% dans (SS+Ni) par rapport au témoin (CK). Cependant, 53.8 %, 98.27 % et 153.09% d'augmentation ont été observés dans les plantes traitées par exopolysaccharides (EPS) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni) respectivement. De même, le traitement par EPS a entraîné une augmentation notable de la teneur en caroténoïdes, avec des augmentations de 23.02 % en (EPS+SS), 79.32 % en (EPS+Ni) et 337.59 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni).

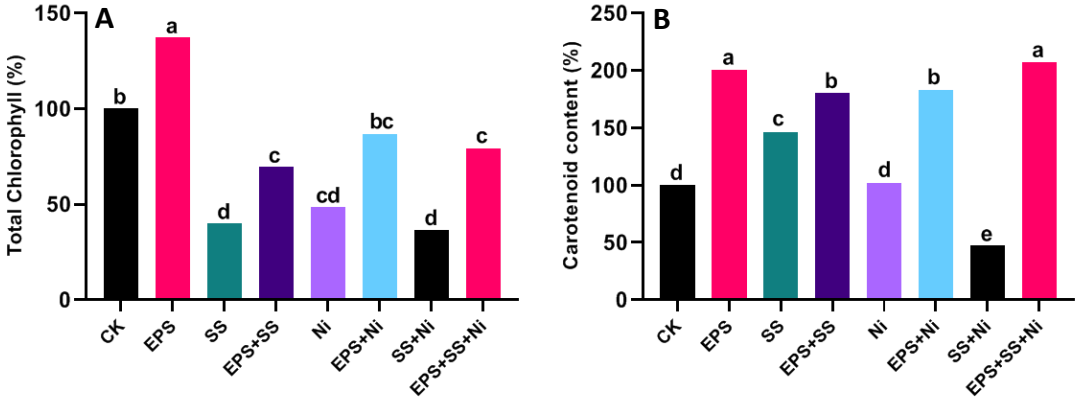


Figure 14: L'application d'EPS réduit les effets du stress salin et le nickel sur le teneur en chlorophylle (A). Le contenu en caroténoïdes (B) par traitement d'EPS.

5 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur la teneur relative en eau et le rôle des exopolysaccharides (EPS)

En tant que mesure de l'état hydrique des plantes, la teneur relative en eau (TRE) fournit non seulement un aperçu de l'hydratation niveau d'une plante mais sert également de reflet de son activité métabolique. Le TRE est étroitement lié à la fonction physiologique des plantes, et cela indique également la capacité de la plante à maintenir sa teneur en eau et son degré de flétrissement de feuilles. Une réduction significative de 67% sous stress salin (SS), de 61.5% sous stress de nickel (Ni) et de 75% sous un stress combiné lié au sel et nickel (SS+Ni) a été enregistré par rapport au contrôle (CK). Alors que le contenu de TRE était 26 %, 19 % et 43 % plus élevés dans les plantes traitées par les exopolysaccharides (EPS) par rapport à (EPS+SS), (EPS+Ni) et (EPS+SS+Ni). De même, les plantes traitées par EPS ont présenté une augmentation significative de leur teneur relative en eau, enregistrant une augmentation de 173 % en (EPS+SS), 146.5 % en (EPS+Ni) et 185.75 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni).

6 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le teneur en proline et le rôle des exopolysaccharides (EPS)

Une augmentation significative de 100% sous stress salin (SS), de 90.17% sous stress de nickel (Ni) et de 161.16% sous un stress combiné lié au sel et nickel (SS+Ni) a été enregistré par rapport au contrôle (CK). Cependant, 167.41 %, 138.4 % et 215.63% de réduction ont été observés dans les plantes traitées par les exopolysaccharides (EPS) par rapport à (EPS+SS),

(EPS+Ni) et (EPS+SS+Ni). De même, les plantes traitées par EPS ont présenté une augmentation significative de leur contenu en proline, enregistrant une augmentation de 44.41 % en (EPS+SS), 36.61 % en (EPS+Ni) et 29.05 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni).

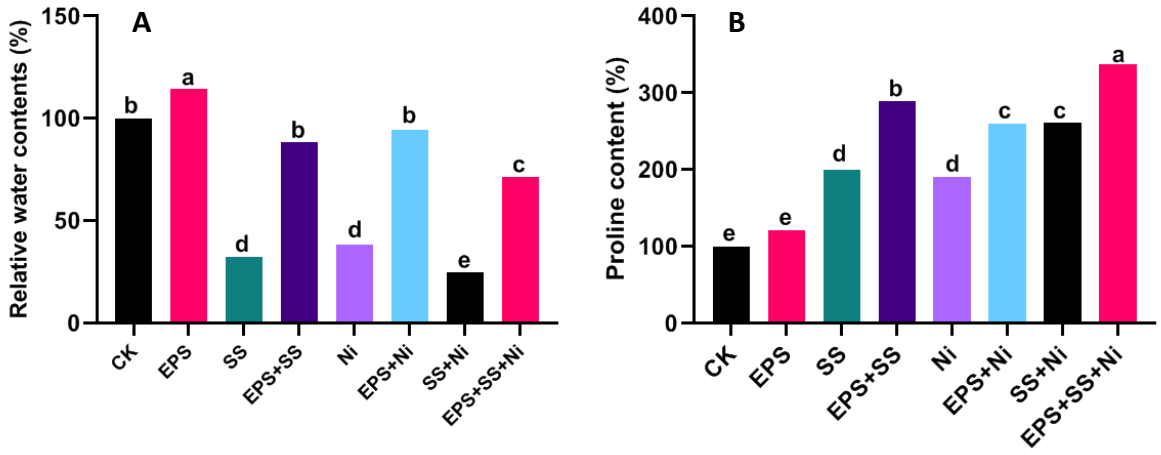


Figure 15: L'application d'EPS réduit les effets du stress salin et le nickel sur la teneur relative en eau (A) et la teneur en proline (B).

7 Effets individuelle et combiné de NaCl et Ni sur les teneurs en H_2O_2 et en MDA et le rôle des exopolysaccharides (EPS)

Le peroxyde d'hydrogène sert d'indicateur de la capacité de piégeage des espèces réactives de l'oxygène (ERO) dans les plantes soumises à divers stress, et il est généré comme sous-produit du métabolisme cellulaire. Les résultats montrent que H_2O_2 a montré une augmentation substantielle de 130.89 % sous stress salin (SS), de 79.51 % sous stress de nickel (Ni) et de 208.94 % sous stress combiné sel et nickel (SS+Ni) par rapport au témoin (CK). Les plantes traitées par exopoysaccharides (EPS) ont présenté une réduction de la teneur en H_2O_2 de 101.3 %, 49.92 % et 179.35 % par rapport aux niveaux observés dans les plantes soumises à un stress salin (SS), à nickel (Ni) et à un stress combiné salin et nickel (SS+Ni), respectivement. De plus, l'application des EPS a démontré une réduction substantielle de l'accumulation de H_2O_2, montrant des diminutions de 45.78 % en (EPS+SS), 51.27 % en (EPS+Ni) et 57.53 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni).

Le stress lié au sel et au nickel a démontré un impact notable sur la teneur en malondialdéhyde (MDA), élevant les niveaux de 108.33 %, 120.58 % et 199.50 % dans les cas de stress salin (SS), de nickel (Ni) et de stress combiné sel et nickel (SS + Ni) plantes,

respectivement, par rapport au témoin (CK). En revanche, les plantes traitées par exopolysaccharides (EPS) ont présenté une augmentation significative des niveaux de MDA de 43.13 %, 14.7 % et 33.33 % par rapport aux (EPS+SS), (EPS+Ni), et (EPS+SS+Ni), respectivement. De même, les teneurs en MDA ont été significativement diminuées par le traitement des EPS, enregistrant des réductions de 42.8 % en (EPS+SS), 58.89 % en (EPS+Ni) et 63.51 % en (EPS+SS+Ni) par rapport aux plantes soumises à un stress salin (SS), nickel (Ni) et conditions combinées de stress salin et de nickel (SS+Ni), respectivement.

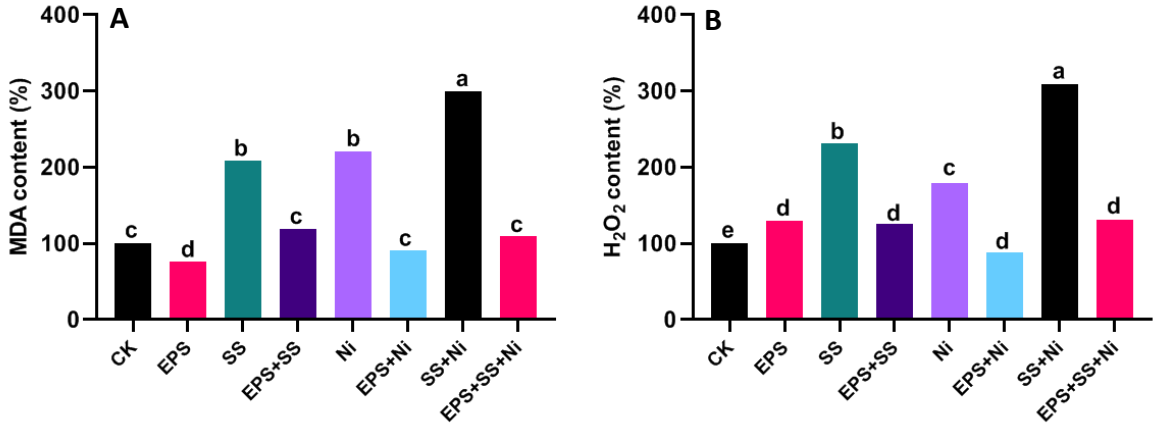


Figure 16: L'application d'EPS atténue le stress dû au sel et le nickel en éliminant l'accumulation de ERO (A, B) Affiche le contenu MDA et H2O2.

8 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur les Antioxydants enzymatiques et le rôle des exopolysaccharides (EPS)

Les antioxydants enzymatiques tels que POD et APX étaient significativement augmentés en cas de stress lié au sel et nickel (Fig.17). Dans cette étude, les effets du stress salin et nickel sur les activités antioxydants du ascorbate peroxidase (APX) et de peroxidase (POD) dans les plants de blé ont été étudiés avec et sans traitement par exopolysaccharide. Les résultats ont révélé une augmentation significative d'ascorbate peroxidase (APX) de 56.70 %, 59.38 % et 180.68 % dans les cas de stress salin (SS), de stress de nickel (Ni) et de stress combiné sel et nickel (SS+Ni) par rapport au témoin (CK). Ascorbate peroxidase (APX) a également été enregistrée plus élevée de 11.53%, 8.45 % et 188.4 % dans les groupes traités au sel et exopolysaccharide (EPS+SS), traités par nickel et exopolysaccharide (EPS+Ni) et combinés au sel, nickel et exopolysaccharides (EPS+SS+Ni) par rapport aux plantes traitées par exopolysaccharide (EPS). De même, l'exopolysaccharide a réduit les activités du (APX) de

33.75 % en (EPS+SS), 36.8 % en (EPS+Ni) et 65.03 % en (EPS+SS+Ni) par rapport aux plantes soumises à un stress salin (SS), nickel (Ni) et stress combiné lié au sel et nickel (SS+Ni).

L'activité de polyphénol oxydase (POD) a montré une augmentation progressive en raison du stress salin et de nickel ; cependant, le traitement par exopolysaccharide a accéléré son activité. L'activité de peroxidase (POD) a augmenté de 58.81 % sous stress salin (SS), de 38.04 % sous stress de nickel (Ni) et de 86.42 % sous stress combiné sel et nickel (SS+Ni) par rapport au contrôle (CK). Les plantes traitées par exopolysaccharides (EPS) ont présenté une diminution des niveaux de polyphénol oxydase (POD) de 67.86 %, 47.09 % et 95.47 % par rapport à (SS), (Ni) et (SS+Ni) respectivement. L'exopolysaccharide a réduit les activités du (POD) de 42.42 % en (EPS+SS), 39.66 % en (EPS+Ni) et 45.01 % en (EPS+SS+Ni) par rapport aux plantes soumises à un stress salin (SS), nickel (Ni) et stress combiné lié au sel et nickel (SS+Ni).

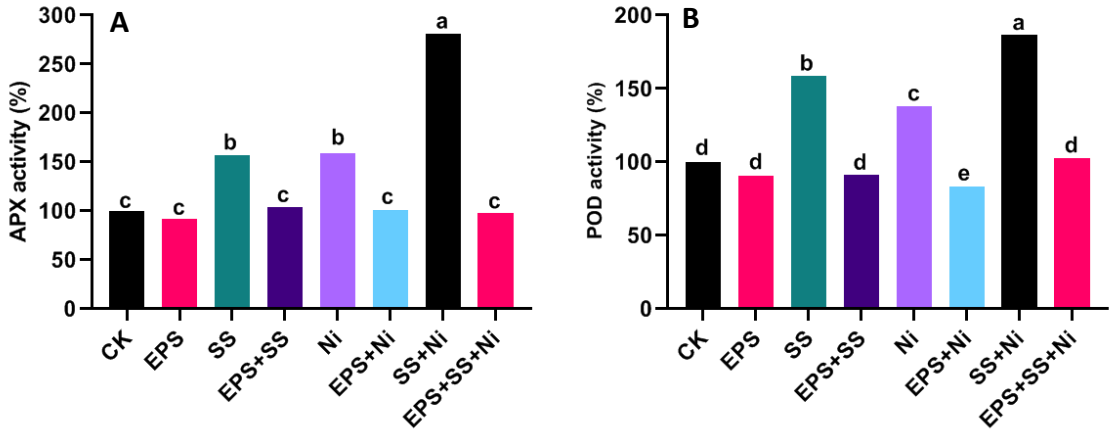


Figure 17: Activités enzymatiques antioxydants des plants de blé après exposition ou EPS et SS et/ou Ni. (A,B) représentent respectivement les activités APX et POD.

9 Effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu phénolique total et en flavonoïdes et le rôle des exopolysaccharides (EPS)

Contenu phénolique total (TPC) a montré une augmentation substantielle de 62.14 % sous stress salin (SS), de 58.31 % sous stress de nickel (Ni) et de 46.84 % sous stress combiné sel et nickel (SS+Ni) par rapport au témoin (CK). Les plantes traitées par exopoysaccharides (EPS) ont présenté une réduction de TPC de 51.06 %, 47.23 % et 35.76 % par rapport aux niveaux observés dans les plantes soumises à un stress salin (SS), à nickel (Ni) et à un stress

combiné salin et nickel (SS+Ni), respectivement. De plus, le traitement par EPS a entraîné une augmentation de TPC de 13.33 % en (EPS+SS) par rapport à (SS) et diminution de 43.24 % en (EPS+Ni) et 17.58 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (Ni) et (SS+Ni).

Le stress lié au sel et au nickel a entraîné une augmentation significative de contenu en flavonoïdes de 120.1 %, 71.54 % et 160.5% dans (SS), (Ni) et (SS+Ni) par rapport au témoin (CK). Cependant, 84.33 %, 50.06 % et 56.04% de réduction ont été observés dans les plantes traitées par exopolysaccharides (EPS) par rapport à (EPS+SS), (EPS+Ni) et (EPS+SS+Ni) respectivement. De même, le traitement par EPS a entraîné une augmentation de 11.24 % en (EPS+SS), 22.75 % en (EPS+Ni) par rapport à (SS) et (Ni), et une diminution de 16.87 % en (EPS+SS+Ni) par rapport à (SS+Ni).

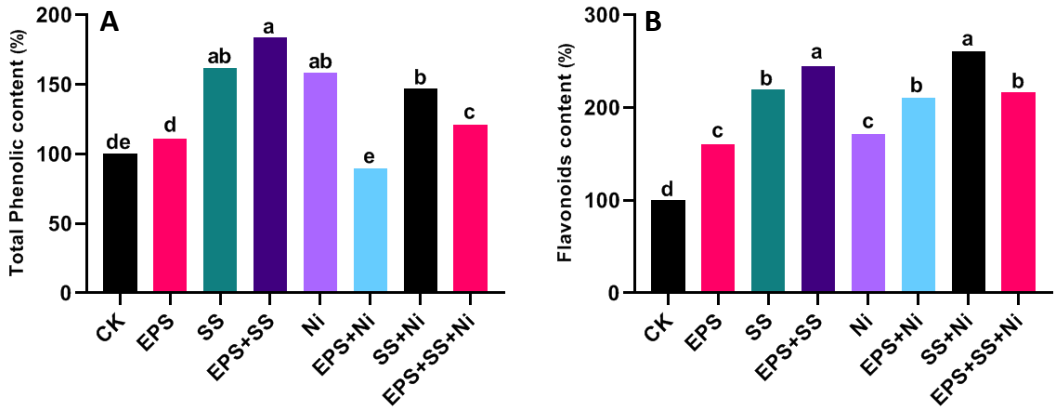


Figure 18: effet individuelle et combiné de NaCl et Ni sur le contenu phénolique total et en flavonoïdes et le rôle des EPS.

Chapitre 03

Discussion

Les stress abiotiques, tels que la salinité et le stress lié aux métaux lourds, limitent les performances des plantes en affectant leurs attributs morpho-physiologiques, biochimiques et moléculaires. La présente étude a été menée pour examiner comment l'application des exopolysaccharides (EPS) contribue à réduire les impacts négatifs du stress dû à la salinité (SS) et/ou le Nickel (Ni) sur la croissance et les attributs physiologiques et biochimiques du blé.

Les résultats de la présente étude confirment notre hypothèse selon laquelle le stress causé par la salinité et le nickel a eu des effets néfastes sur les plants de blé et l'application des EPS a considérablement amélioré les activités morphologiques, physiologiques et enzymatiques (Sabir et al., 2024). Dans cette étude, le stress salin et le nickel, indépendamment ou en combinaison, ont entraîné un appauvrissement substantiel de la croissance du blé. L'inhibition de la croissance des feuilles et le développement du système racinaire dû à la salinité et au nickel sont des facteurs largement reconnus contribuant à la réduction de l'accumulation de biomasse. La salinité et le nickel réduisent considérablement la longueur des pousses et des racines, ainsi que la biomasse globale des plants de blé, ce qui entrave la croissance des plantes. Cette étude confirme que la salinité et le nickel ont sévèrement limité la croissance et le développement du blé. Et ces facteurs de stress ont considérablement réduit à la fois le poids frais aérien et le poids sec.

De plus, la chlorophylle joue un rôle essentiel dans la croissance, le développement et la synthèse des produits photosynthétiques. Le stress salin entrave la synthèse de la chlorophylle, impactant directement la photosynthèse, retardant la croissance des plantes et diminuant le rendement (Touzout, 2023). Dans cette expérience, lors de stress salin et de nickel, la teneur en chlorophylle était considérablement réduite. Cela peut être dû à une augmentation des niveaux de Na+, MDA et H_2O_2, perturbant la stabilité de la membrane chloroplastique et provoquant une dégradation du complexe protéine-pigment-lipide (Khan et al., 2024). Les résultats ont également montré une réduction substantielle de la teneur en caroténoïdes en raison des conditions de salinité (SS) et/ou le nickel (Ni). Il a été déterminé que les caroténoïdes sont cruciaux dans des conditions de stress, remplissant plusieurs fonctions clés : (i) capter la lumière via un transfert d'énergie à l'état singulet, (ii) maintenir l'intégrité de la structure des plastes, (iii) sauvegarder les chlorophylles en éteignant leur état triplet, (iv) neutraliser certaines espèces

réactives de l'oxygène (ERO), en particulier l'oxygène singulet, et (v) dissiper l'énergie excédentaire (Elnajar et al., 2024).

L'application des exopolysaccharides a inversé la tendance à la baisse et favorisé la croissance des plantes, la biomasse et la teneur en chlorophylle et en caroténoïdes. Les résultats étaient conformes aux découvertes réalisées sur la tomate par (Gitau et al., 2022; K.V. et al., 2020), brocoli par (Kusvuran, 2021), blé par (Sneha et al., 2024) et le riz par (Lamb et al., 2023), suggérant que l'impact potentiel des EPS sur les enzymes contribue à l'amélioration du niveau de chlorophylle, favorisant ainsi la croissance et le développement des plantes (Khan et al., 2024).

Les résultats de cette étude indiquent que des niveaux élevés de stress salin et de nickel ont entraîné une diminution de la teneur relative en eau. Cette baisse de la teneur relative en eau pourrait avoir contribué à une réduction de divers facteurs de croissance des plantes. Un traitement préalable à l'exopolysaccharides a considérablement amélioré la teneur relative en eau des feuilles et des plants de blé dans des conditions de stress salin et de nickel. Ces résultats sont cohérents avec les découvertes antérieures de (Kusvuran, 2021) sur le brocoli, blé par (Sneha et al., 2024). L'augmentation observée de la teneur relative en eau pourrait être attribuée à l'implication potentielle des EPS dans la modulation du comportement stomatique, régulant efficacement leur ouverture et leur fermeture pour éviter une perte excessive d'eau des feuilles (Khan et al., 2024). D'autre part, Les résultats ont également montré une augmentation substantielle de proline en raison des conditions de salinité SS et/ou Ni. Les résultats étaient conformes aux découvertes réalisées par (Rady et al., 2023a) sur le haricot commun. L'application des EPS ont amélioré la tolérance au stress en augmentant la concentration de proline, ce qui a amélioré la tolérance au stress abiotique. Proline, un composant essentiel de spiruline, s'accumule et joue un double rôle d'antioxydant non enzymatique et de modulateur osmotique cellulaire dans la réduction des dommages et de la toxicité des ERO chez les plantes stressées (Touzout, 2023). L'augmentation de la teneur en proline résultant de l'application de cet extrait a contribué à l'amélioration du système antioxydant des plantes pour contrecarrer la dégradation induite par le double stress dans la présente étude. La teneur en proline peut être liée à la restauration du volume cellulaire ainsi qu'à la stabilisation et à la protection des structures membranaires et des enzymes (Rady et al., 2023a).

Dans la présente recherche, les plants de blé soumis à le SS et/ou Ni ont présenté des dommages oxydatifs accrus, comme en témoignent les accumulations de MDA dans les plants stressés. En revanche, l'application des exopolysaccharides (EPS) a entraîné une réduction de l'accumulation de MDA dans les plantes à stress unique et double, ce qui implique que l'application des EPS a atténué les dommages oxydatifs chez ces plantes stressées. Nos conclusions sont supportées par les résultats de rapports précédents sur le brocoli par (Kusvuran, 2021), blé par (Sneha et al., 2024), haricot commun par (Rady et al., 2023b). Nos résultats ont révélé que les plantes stressées traitées par les EPS présentaient des activités enzymatiques antioxydantes plus prononcées que les plantes stressées traitées à l'eau (Rahman et al., 2024).

Dans les recherches actuelles, en cas de stress salin et/ou le nickel, la concentration de H_2O_2 a augmenté, ce qui a entraîné une baisse notable de la stabilité de la membrane cellulaire, ce qui a favorisé la fuite de métabolites par les cellules dans les espaces intercellulaires. Cependant, une augmentation maximale de H_2O_2 a été observée dans le stress combiné par rapport au contrôle. Les applications des EPS ont amélioré la tolérance au stress en diminuant la concentration de H_2O_2, ce qui a conduit à une meilleure tolérance au stress abiotique. Pour contrôler le stress oxydatif provoqué par la salinité et le stress lié au nickel et pour éliminer les oxygènes réactifs, les plantes augmentent la teneur en antioxydants par divers mécanismes physio et biochimiques (Ishaq et al., 2023). Les résultats étaient conformes aux découvertes réalisées sur le blé par (Sneha et al., 2024), haricot commun par (Rady et al., 2023a).

La régulation positive du système de défense oxydative est une stratégie clé dans la lutte contre le stress dû au NaCl et Ni chez les plantes de blé. Dans ce mécanisme de défense, APX, et POD remplissent tous des rôles spécifiques et les réactions qui en résultent influencent l'homéostasie des ERO au sein des cellules de la plante. Cela affecte à son tour la tolérance des plantes aux conditions stressantes. L'APX est connu pour être présent dans les chloroplastes et fonctionne pour détoxifier le H_2O_2 dans les cellules végétales. Dans cette étude, l'activité de POD et APX a augmenté en cas de stress salin et/ou le nickel. Les applications des EPS ont amélioré la tolérance au stress en diminuant la concentration de POD et APX. Des conclusions similaires ont été rapportées dans des recherches sur blé par (Sneha et al., 2024), haricot commun par (Rady et al., 2023a), tomate par (Gitau et al., 2022).

Les valeurs obtenues pour les phénols et flavonoïdes totaux ont augmenté significativement dans des conditions de SS et/ou Ni par rapport au témoin. Les applications des EPS ont favorisé l'accumulation de ces métabolites, étant plus élevées dans EPS+SS. Il a été rapporté que les composés phénoliques s'accumulent dans des conditions stressantes en raison de leur rôle positif dans l'atténuation des dommages causés par le stress oxydatif (Touzout, 2023). Ces métabolites pourraient être utilisés dans des conditions de stress pour agir comme des piégeurs de ERO et leur vitesse de régénération est inférieure à leur consommation (Gill & Tuteja, 2010). Les EPS ont présenté un effet biostimulant en induisant l'accumulation de composés phénoliques lors du contrôle et du traitement du stress, et ainsi, la plante a pu renforcer ses mécanismes de défense antioxydants en reconstituant de manière exogène les composés phénoliques utilisés pour purifier les ERO sous les conditions de stress étudiées (Toscano Adamo et al., 2024). Les résultats étaient conformes aux découvertes réalisées sur le brocoli par (Kusvuran, 2021) et haricot commun par (Rady et al., 2023a).

Conclusion et Perspectives

Les résultats de la présente étude ont démontré que le stress salin et le nickel avaient un impact négatif sur les attributs morphologiques, physiologiques des plantes et la teneur des pigments chlorophylliens dans le blé. Cependant, il a été observé que l'application d'exopolysaccharide améliorait la résilience des plants de blé à la salinité et/au nickel. En particulier, l'application des EPS a montré des résultats prometteurs sur le système de défense antioxydant des plantes. Cela a conduit à une amélioration des attributs physiologiques et des pigments chlorophylliens des plantes, renforçant ainsi leur capacité à lutter contre le stress dû à la salinité et/ou nickel. Les applications des EPS jouent un rôle dans la régulation du statut hydrique des plantes, leur permettant de maintenir une teneur plus élevée en chlorophylle, essentielle au maintien de la croissance et du développement des plantes. Dans l'ensemble, les résultats de cette étude mettent en évidence le rôle physicochimique important des EPS dans l'amélioration de la tolérance à la salinité et au stress du nickel chez les plants de blé. Ces résultats fournissent également une base solide pour les applications potentielles des EPS dans les domaines de la recherche agricole et connexes, afin d'améliorer la résilience des cultures face à la salinité et au stress du nickel.

La salinité et les métaux lourds sont des éléments hautement toxiques qui non seulement nuisent à la croissance des cultures, mais peuvent également s'accumuler dans le corps humain par bioamplification, mettant ainsi en danger la santé. Il a été démontré que les exopolysaccharides améliorent la résistance des plantes au stress lié au nickel et au sel en renforçant l'activité du système antioxydant, mais les mécanismes sous-jacents ne sont pas clairs. Par conséquent, cette étude vise à étudier attentivement l'effet des exopolysaccharides sur le système antioxydant et le processus de détoxification du nickel et du sel du blé. Les résultats de l'étude ont révélé que l'EPS a une capacité écologique à modifier la toxicité des métaux lourds et de la salinité, à restaurer les régimes contaminés et, par conséquent, pourrait être utilisé dans des applications environnementales et biotechnologiques dans de futurs programmes.

Références

Bibliographiques

Akmukhanova, N. R., Leong, Y. K., Seiilbek, S. N., Konysbay, A., Zayadan, B. K., Sadvakasova, A. K., Sarsekeyeva, F. K., Bauenova, M. O., Bolatkhan, K., Alharby, H. F., Chang, J. S., & Allakhverdiev, S. I. (2023). Eco-friendly biopesticides derived from CO2-Fixing cyanobacteria. *Environmental Research*, *239*(P2), 117419. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117419

Ali, S. K., & Saleh, A. M. (2012). Spirulina - An overview. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, *4*(SUPPL.3), 9–15. https://doi.org/10.1201/9780203025901.ch14

Arserim Ucar, D. K., Konuk Takma, D., & Korel, F. (2021). *Exopolysaccharides in Food Processing Industrials*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75289-7_8

Bates, L. S., Waldren, R. P. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205–207.

Bhalerao, S. A., Sharma, A. S., & Poojari, A. C. (2015). Toxicity of Nickel in Plants. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, *3*(2), 345–355. www.ijpab.com

Chaudhuri, R., & Balasubramanian, P. (2023). Evaluating the potential of exopolysaccharide extracted from the spent cultivation media of Spirulina sp. as plant biostimulant. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04865-8

Chittora, D., Meena, M., Barupal, T., & Swapnil, P. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. *Biochemistry and Biophysics Reports*, *22*(November 2019), 100737. https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100737

Conti, F., & Bartolucci, F. (2015). Materials and methods. *Geobotany Studies*, *17*, 17–18. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09701-5_6

Cui, J., Sun, T., Chen, L., & Zhang, W. (2020). Engineering salt tolerance of photosynthetic cyanobacteria for seawater utilization. *Biotechnology Advances*, *43*(May), 107578. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107578

Dahija, S., Pili, S., & Be, R. (2024). *of Cadmium in Soil – Microbe – Plant System : An Overview* (Issue Cd).

Debnath, S., Muthuraj, M., Bandyopadhyay, T. K., Bobby, M. N., Vanitha, K., Tiwari, O. N., & Bhunia, B. (2024). Engineering strategies and applications of cyanobacterial exopolysaccharides: A review onEngineering past achievements and recent perspectives. *Carbohydrate Polymers*, *328*(November 2023), 121686. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121686

Dia. (2021). *École Doctorale Sciences et Technologies Étude de la biodiversité des cyanobactéries et leurs toxines dans le barrage de Foum-Gleita (Mauritanie)*. 2020–2021.

Dubey, S., Shri, M., Gupta, A., Rani, V., & Chakrabarty, D. (2018). Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism. *Environmental Chemistry Letters*, *16*(4), 1169–1192. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0741-8

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, *28*(3), 350–356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017

Elnajar, M., Aldesuquy, H., Abdelmoteleb, M., & Eltanahy, E. (2024). Mitigating drought stress in wheat plants (Triticum Aestivum L.) through grain priming in aqueous extract of spirulina platensis. *BMC Plant Biology*, *24*(1), 1–27. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04905-z

Franco-Morgado, M., Amador-Espejo, G. G., Pérez-Cortés, M., & Gutiérrez-Uribe, J. A. (2023). Microalgae and cyanobacteria polysaccharides: Important link for nutrient recycling and revalorization of agro-industrial wastewater. *Applied Food Research*, *3*(1). https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100296

Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *48*(12), 909–930. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016

Gitau, M. M., Farkas, A., Ördög, V., & Maróti, G. (2022). Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (Solanum lycopersicum). *Journal of Cleaner Production*, *364*(June). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132689

González, L., & González-Vilar, M. (2001). Determination of relative water content. In *Handbook of plant ecophysiology techniques* (pp. 207–212). Springer.

Hasanuzzaman, M., & Tanveer, M. (2020). *Signaling and Communication in Plants Salt and Drought Stress Tolerance in Plants Signaling Networks and Adaptive Mechanisms*. http://www.springer.com/series/8094

Heath, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*(1), 189–198.

Ishaq, H., Waraich, E. A., Hussain, S., Ahmad, M., Ahmad, Z., & Saifullah. (2023). Silicon-Mediated Growth, Physiological, Biochemical and Root Alterations to Confer Drought and Nickel Stress Tolerance in Maize (Zea mays L.). *Silicon*, *15*(15), 6579–6589. https://doi.org/10.1007/s12633-023-02536-x

Jenkins, P. A. (1991). Mycobacteria in the environment. *Journal of Applied Bacteriology Symposium Supplement*, *20*.

Joshi, H., Shourie, A., & Singh, A. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. In *Advances in Cyanobacterial Biology*. INC. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819311-2.00025-5

K.V., S., Behera, B., & P., B. (2020). Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. *Industrial Crops and Products*, *151*(January), 112453. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453

Khan, Tanveer, Shaukat, Ali, & Pirdad. (2020). *Salt and Drought Stress Tolerance in Plants*. http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-40277-8

Khan, Z., Jan, R., Asif, S., Farooq, M., Jang, Y. H., Kim, E. G., Kim, N., & Kim, K. M. (2024). Exogenous melatonin induces salt and drought stress tolerance in rice by promoting plant growth and defense system. *Scientific Reports*, *14*(1), 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-024-51369-0

Kumar, D., Kaštánek, P., & Adhikary, S. P. (2018). Exopolysaccharides from cyanobacteria and microalgae and their commercial application. *Current Science*, *115*(2), 234–241. https://doi.org/10.18520/cs/v115/i2/234-241

Kusvuran, S. (2021). Microalgae (Chlorella vulgaris Beijerinck) alleviates drought stress of broccoli plants by improving nutrient uptake, secondary metabolites, and antioxidative defense system. *Horticultural Plant Journal*, *7*(3), 221–231. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.03.007

Lamb, T. I., Berghahn, E., Pita, F. M., de Oliveira Neves, L., dos Reis Blasi, É. A., Hofstetter, J. S., Dammann, M., da Silva, L. C. O., Buffon, G., Dullius, A., Granada, C. E., & Sperotto, R. A. (2023). Isolation and selection of microalgae capable of stimulating rice plant development and seed production. *Algal Research*, *74*(March). https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103203

Levi, Y., Harvey, M., & Cervantès, P. (2006). Évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives. *Afseet Agence Française de Sécurité Sanitaire et de l'environnement*, 1–231.

Lichtenthaler, H. K. (1987). [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in enzymology* (Vol. 148, pp. 350–382). Elsevier.

Liu, L., Huang, Q., & Qin, B. (2018). Characteristics and roles of Microcystis extracellular polymeric substances

(EPS) in cyanobacterial blooms: A short review. *Journal of Freshwater Ecology*, *33*(1), 183–193. https://doi.org/10.1080/02705060.2017.1391722

Min, X., Hua, H., Sun, B., Dai, Q., & Luo, J. (2024). Phosphatised calcified cyanobacteria at the terminal Ediacaran and the earliest Cambrian transition stage : Response to the paleoenvironment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *638*(January), 112057. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112057

Mosha, S. (2019). The Significance of Spirulina Meal on Fishmeal Replacement in Aquaculture: A Review. *J Fish Aqua Dev*, *2*(January), 145. https://doi.org/10.29011/2577-1493.

Mousavian, Z., Safavi, M., Azizmohseni, F., Hadizadeh, M., & Mirdamadi, S. (2022). Characterization, antioxidant and anticoagulant properties of exopolysaccharide from marine microalgae. *AMB Express*, *12*(1). https://doi.org/10.1186/s13568-022-01365-2

Mutoti, M., Gumbo, J., & Jideani, A. I. O. (2022). Occurrence of cyanobacteria in water used for food production: A review. *Physics and Chemistry of the Earth*, *125*, 103101. https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103101

Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, *22*(5), 867–880.

Parikh, A., & Madamwar, D. (2006). Partial characterization of extracellular polysaccharides from cyanobacteria. *Bioresource Technology*, *97*(15), 1822–1827. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.008

Poveda, J. (2021). Cyanobacteria in plant health: Biological strategy against abiotic and biotic stresses. *Crop Protection*, *141*(August 2020), 105450. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105450

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. (2023b). 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*(xxxx), 240–257. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.09.011

Rahman, M. M., Mostofa, M. G., Keya, S. S., Ghosh, P. K., Abdelrahman, M., Anik, T. R., Gupta, A., & Tran, L. S. P. (2024). Jasmonic acid priming augments antioxidant defense and photosynthesis in soybean to alleviate combined heat and drought stress effects. *Plant Physiology and Biochemistry*, *206*, 108193. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108193

Rizwan, M., Usman, K., & Alsafran, M. (2024). Ecological impacts and potential hazards of nickel on soil microbes, plants, and human health. *Chemosphere*, *357*(February), 142028. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142028

Rocha, M. F., Magalhães-Ghiotto, G. A. V., Bergamasco, R., & Gomes, R. G. (2023). Cyanobacteria and cyanotoxins in the environment and water intakes: Reports, diversity of congeners, detection by mass spectrometry and their impact on health. *Toxicon*, 107589.

Sabir, A., Waraich, E. A., Ahmad, M., Hussain, S., Asghar, H. N., Haider, A., Ahmad, Z., & Bibi, S. (2024). Silicon-Mediated Improvement in Maize (Zea mays L.) Resilience: Unrevealing Morpho-Physiological, Biochemical, and Root Attributes Against Cadmium and Drought Stress. *Silicon*. https://doi.org/10.1007/s12633-024-02907-y

Sánchez-Quintero, Á., Fernandes, S. C. M., & Beigbeder, J. B. (2023). Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO2 streams towards sustainable agriculture: A review. *Microbiological Research*, *277*. https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127505

Singh, M., Kushwaha, B. K., Singh, S., Kumar, V., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2017). Sulphur alters chromium (VI) toxicity in Solanum melongena seedlings: role of sulphur assimilation and sulphur-containing antioxidants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *112*, 183–192.

Singh, S., Kant, C., Yadav, R. K., Reddy, Y. P., & Abraham, G. (2018). Cyanobacterial Exopolysaccharides:

Composition, Biosynthesis, and Biotechnological Applications. In *Cyanobacteria: From Basic Science to Applications*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814667-5.00017-9

Singh, Singh, & Shekhar. (2023). Antioxidant Defense: A Key Mechanism of Lead Tolerance. *Environmental Science and Engineering*, *Part F1251*(Cd), 127–144. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37327-5_7

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, *16*(3), 144–158.

Sneha, G. R., Govindasamy, V., Singh, P. K., Kumar, S., & Abraham, G. (2024). Priming of seeds with cyanobacteria improved tolerance in wheat (Triticum aestivum L.) during post-germinative drought stress. *Journal of Applied Phycology*, *2019*. https://doi.org/10.1007/s10811-023-03170-1

Toscano Adamo, M. L., Yonny, M. E., Villalba, G. F., & Nazareno, M. A. (2024). Natural biostimulants foliar application as sustainable mitigation strategy of drought stress damage on the melon crop (Cucumis melo L.). *Scientia Horticulturae*, *323*(May 2023). https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112471

Touzout, N. (2023). Efficacy of Silicon in Mitigating the Combined Phytotoxic Effects of Salt and Insecticide in Solanum lycopersicum L. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(4), 5048–5059.

Ullah, S., Javed, S., Akhtar, N., & Shoukat, L. (2024). *The Cadmium in Soil and Plants*. *Cd*, 3–29.

Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, *151*(1), 59–66.

Wan, D., Wu, Q., & Kuča, K. (2016). Spirulina. *Nutraceuticals: Efficacy, Safety and Toxicity*, 569–583. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802147-7.00042-5

Yao, D. R. A. (2020). *Étude des cyanobactéries de la lagune aghien et de leur potentialité à produire des métabolites secondaires*. Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire); Numéro d'ordre ….

Zahra, Z., Choo, D. H., Lee, H., & Parveen, A. (2020). Cyanobacteria: Review of current potentials and applications. *Environments - MDPI*, *7*(2). https://doi.org/10.3390/environments7020013

Zeng, M. T., & Vonshak, A. (1998). Adaptation of Spirulina platensis to salinity-stress. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, *120*(1), 113–118. https://doi.org/10.1016/S1095-6433(98)10018-1

Zhang, G., & Dasgupta, P. K. (1992). Hematin as a peroxidase substitute in hydrogen peroxide determinations. *Analytical Chemistry*, *64*(5), 517–522.

Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, *64*(4), 555–559.

Annexe

Spectrophotomètre



Centrifugeuse



Spectroscopie infrarouge à transformée de fourier



الملخص :

تركز الدراسة على التحدي العالمي المتمثل في الملوحة وإجهاد النيكل، الذي يعيق بشكل كبير إنتاج القمح. تؤدي الملوحة والإجهاد الناتج عن النيكل إلى تعطيل العمليات الخلوية والفسيولوجية في القمح، مما يؤدي إلى خسائر كبيرة في المحصول، خاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. تقوم الدراسة بالبحث عن استخدام عديدات السكاريد الخارجية كمنشط حيوي لتحسين الملوحة ومقاومة النيكل في القمح. شارك في ذلك ثماني مجموعات من نباتات القمح. كان لكل مجموعة من هذه المجموعات سبعة مكررات، وفي كل مكرر كان هناك نباتين. بعد سبعة أيام من العلاج، تم حصاد النباتات وتحليلها لمختلف المعايير المورفولوجية والفسيولوجية والكيميائية الحيوية. أظهرت النتائج أن معالجة عديدات السكاريد الخارجية قللت بشكل كبير من أضرار الملح والنيكل من خلال تعزيز طول الجذر، وطول البراعم، والوزن الطازج والجاف، وزيادة محتوى الكلوروفيل، وتثبيط إنتاج العلامات الزائدة. أدى إجهاد الملح والنيكل إلى انخفاض كبير في توازن الماء وإتلاف غشاء الخلية عن طريق تقليل محتوى الماء النسبي. يبدو أن استخدام عديدات السكاريد الخارجية يخفف من التأثيرات الضارة لإجهاد الملح و/أو النيكل على القمح، مما يحسن قوة النمو والتمثيل الغذائي وإنتاجية القمح. يشير هذا إلى إمكانات عديدات السكاريد الخارجية كمنشط حيوي صديق للبيئة لتحسين مرونة المحاصيل وتغذيتها وإنتاجيتها في مواجهة التحديات البيئية المختلفة، وبالتالي المساهمة في الأمن الغذائي العالمي.

الكلمات المفتاحية: الملوحة؛ النيكل؛ قمح؛ السكريات الخارجية؛ المنشطات الحيوية؛ الاكسدة؛ البكتيريا الزرقاء

Résumé :

L’étude se concentre sur le défi mondial du stress dû à la salinité (NaCl) et nickel (Ni), qui entrave considérablement la production de blé, pierre angulaire de la sécurité alimentaire mondiale. Le stress dû à la salinité et le nickel perturbe les processus cellulaires et physiologiques du blé, entraînant des pertes de rendement substantielles, en particulier dans les régions arides et semi-arides. La recherche étudie l'utilisation des exopolysaccharides (EPS) comme biostimulant pour améliorer la résistance à la salinité et le nickel de blé. Huit groupes de plants de blé au total ont été impliqués. Chacun de ces groupes avait sept répétitions, et dans chaque répétition, il y avait deux plantes. Après 7 jours de traitement, les plants ont été récoltés et analysés pour divers paramètres morphologique, physiologiques et biochimiques. Les résultats ont montré que le traitement par EPS réduit considérablement les dommages causés par le sel et le nickel en favorisant la longueur des racines, des pousses, le poids frais et sec, en augmentant la teneur en chlorophylle et en inhibant la production excessive de marqueurs de stress oxydatif. Le stress dû au sel et nickel a considérablement diminué l'équilibre hydrique et endommagé la membrane cellulaire en réduisant la teneur relative en eau. L'application des EPS semble atténuer les effets néfastes du stress salin et/ou nickel sur le blé, en améliorant la vigueur de croissance, le métabolisme et la productivité de blé. Cela indique le potentiel des EPS en tant que biostimulant écologique pour améliorer la résilience, la nutrition et le rendement des cultures face à divers défis environnementaux, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire mondiale.

Mots-clés: Salinité ; Nickel; Blé; Exopolysaccharides ; Biostimulants ; Stress oxydatif ; Cyanobactéries

Abstract

The study focuses on the global challenge of salinity (NaCl) and nickel (Ni) stress, which significantly hampers wheat production, the basis of global food security. Salinity and nickel stress disrupt cellular and physiological processes in wheat, leading to substantial yield losses, particularly in arid and semi-arid regions. The research is investigating the use of exopolysaccharides (EPS) as a biostimulant to improve salinity and nickel resistance of wheat. Eight groups of wheat plants were involved. Each of these groups had seven replicates, and in each replicate, there were two plants. After 7 days of treatment, the plants were harvested and analyzed for various morphological, physiological and biochemical parameters. Results showed that EPS treatment significantly reduced salt and nickel damage by promoting root length, shoot length, fresh and dry weight, increasing chlorophyll content, and inhibiting excess marker production. Oxidative stress. Salt and nickel stress significantly decreased water balance and damaged the cell membrane by reducing relative water content. The application of EPS appears to mitigate the adverse effects of salt and/or nickel stress on wheat, by improving growth vigor, metabolism and wheat productivity. This indicates the potential of EPS as an ecological biostimulant to improve crop resilience, nutrition and yield in the face of various environmental challenges, thereby contributing to global food security.

Keywords: Salinity; Nickel; Wheat; Exopolysaccharides; Biostimulants; Oxidative stress; Cyanobacteria