

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire

Présenté par

BELARBI Fafa Meriem

BENAHMED Amina Ahlam

BENAHMED Sihem

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER II académique

En Génétique moléculaire et Amélioration des Plantes.

Thème

***L'effet d'inhibiteur d'auxine 1-Acide naphtoxyacétique sur
la formation des tissus chez le « Zea mays »***

Soutenu publiquement le 04 juillet 2019

devant le jury composé de :

Président : Mr. AIT HAMMOU M. MCA

Promoteur: Mr. RAHMOUNE B. MCB

Co- Promoteur : Mr. ZERROUK I. MCB

Examineur : Mlle. BELMOKHTAR R. MAA

Année universitaire 2018-2019.

Remerciement

Pour nous avoir octroyé le savoir et la patience nécessaires et pour parcourir ce long chemin je voudrais remercier le tout puissant : O Allah que serions-nous sans votre aide.

*Avant d'achever ce travail nous tenons à exprimer toutes notre reconnaissance à notre encadreur **Mr RAHMOUNE Bilal** pour avoir guidé nos premiers pas vers le vaste monde de la science et de nous avoir encouragé et poussé d'aller de l'avant et de nous avoir traité non comme des novices mais comme des scientifiques.*

*A **Mr ADDA Ahmed** pour nous avoir accueilli au sein de la promotion de génétique et qui pour nous n'était pas qu'une simple promotion mais une deuxième chance et un refuge après une éprouvante expérience. L'ambiance chaleureuse que nous trouvâmes nous donna l'envie de faire partie de l'élite et de montrer ce qu'on vaut vraiment, votre dévouement à la science nous est considérable.*

*A **Mr AIT HAMMOU Mohammed** merci de nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury.*

*A **Mlle BELMOKHTAR Rahma** merci d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Notre énorme gratitude à **Mr. BENAISSA Toufik** de nous avoir accompagné durant l'intégralité de notre parcours universitaire et d'être un symbole de caractère de justice et de modestie pour beaucoup d'entre nous. A tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail merci du fond du cœur.*

Dédicace

J'aimerai dédier ce travail dont j'y ai mis tout mon cœur à ma chère petite famille

*A vous **Papa** le grand homme qui m'a encouragé tout au long du chemin qui a cru en moi et forgé ma personnalité et qui a mis la barre de ses attentes haut pour que je puisse un jour franchir mes limites.*

*A vous **Mama** la femme au grand caractère pleine de sagesse et de réconfort si je suis ce que je suis aujourd'hui c'est sans doute grâce à tes prières que Dieu vous donne longues vie et beaucoup de santé a tous les deux,*

*A toi **Fati** ma douce petite sœur à qui je dois beaucoup de mes sourires et beaux souvenirs ma vie sans toi et tous simplement vide. Et a mon chère grand frère **Mohamed** et son épouse **Amel** à qui je souhaite le bonheur et la santé et plein de jolis bébés que me ressemblent.*

*A toi **Abdeljalil** mon chère futur mari merci de m'avoir soutenue durant les mauvais moments et d'avoir partagé les bons et d'être toujours là a me dire ce qu'il faut quand il faut ta présence donne du gout a tout ce que je fais.*

*A mes chères tentes **Amel** et **Kadia** et à toi **Fayrouz** qui même la distance nous sépare je sais que ma réussite est la vôtre que Dieu vous protège. a toutes mes familles **Belarbi** et **Beldjalali** et ma belle-famille **Salaheddine** et à la mémoire de mes grands-parents que le bon dieu les accueillent dans son vaste paradis*

*A toi mon double **Amina** qui a su protéger le lien qui nous relie depuis des années malgré les tempêtes. A notre avenir et la réalisation de nos rêves.*

*A toi **Souad** l'amie de ma vie et son époux **Oussama** à qui je souhaite tout le bonheur du monde et si j'ai envie de voir quelqu'un réaliser ses rêves devant moi ça serai vous.*

*A mes chères **Amira**, **Sabrina**, **Imene**, **Yousra**, **Rachida**, **Ismahen**, **Wahiba**, **Sarah**, **Houda** et toutes mes sœurs c'est avec vous que j'ai savouré le vrai gout de l'amitié. A vous **Sihem** et **Ahlam** avec qui j'ai partagé ces dernières belles années merci d'avoir supporté mes exigences et mes caprices et d'avoir réalisé ce rêve à mes cotés*

Belarbi Fafa Meriem

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études

*A ma chère sœur **SAADIA** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral*

*A mes chers frères **AHMED** et **IBRAHIM** pour que leur soutien soit maintenu,*

*A mon mari **EL HOCINE** merci d'être pour moi à tout moment tu m'as donné le courage d'affronter le monde avec confiance*

A ma deuxième petite famille pour la positivité infinie

A mon trinôme et amies merci énormément pour votre aide

Mes meilleurs familles Benahmed , Abdelli et Zidane

Merci d'être tous à mes côtés

Benahmed Amina Ahlam

DEDICACE

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner l'amour pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Je n'arrive pas à exprimer mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

*A MES CHERS ET ADORABLES FRÈRE ET SŒURS, **Khalida** la prune de mes yeux, **Sif Eddine** que j'aime profondément et **Maya** la petite princesse que j'adore. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.*

*À MES CHERS PETIT NEVEU ET NIECE, Le petit prince **Mohamed Saïd** et La jolie **Rïmesse Maria**, Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, Votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur. Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.*

*À MES AMIS DE TOUJOURS, **Imen** l'amie d'enfance, **Fafa** et **Amina** mes plus belles sœurs et l'armature de ce travail, **Souad**, **Minina**, **Tamani** et **Wassila**... En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.*

À TOUTE MA FAMILLE, Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ À L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL À TOUS CEUX QUE J'AI OMIS DE CITER.

Benahmed Sihem

Liste des Abréviations

°C: Degrés Celsius

- 1-NOA :** Acide 1-naphtoxyacétique
- 2,4-D :** Acide 2,4-dichlorophenoxyacétique
- 2-NAA :** Acide naphthalène-2-acétique
- 2-1-NOA :** Acide 2-naphtoxyacétique
- 4Cl-AIA :** Acide 4-chloroindole-3-acétique
- ABA :** Acide abscissique
- ABCB:** ATP Binding Cassette type B
- AIA :** Acide indole acétique
- AIB :** Acide indole 3-butyrique
- ANA :** Acide α -naphthalène acétique
- APA :** Acide phenylacétique
- Bt04 :** *Bacillus toyonensis*
- CHPAA :** Acide 3-chloro-4-hydroxyphénylacétique
- h:** Heure
- ml :** Millilitre
- nm :** Nanomètre
- PGPR:** Plant Growth Promoting Rhizobacteria

Liste des figures

Figure 1 : Expérience de Darwin en 1880.....	5
Figure 2 : Structure chimique de l'auxine.....	5
Figure 3 : Structure chimique des molécules à activité auxinique.....	6
Figure 4 : Transport de l'auxine dans l'apex racinaire	8
Figure 5 : Interactions entre plantes et rhizobactéries.....	11
Figure 6 : Le développement du maïs au fils du temps.....	13
Figure 7 : Les différentes formes et couleurs du maïs	14
Figure 8 : Morphologie d'un plant de maïs.....	15
Figure 9 : Mise en germination des graines du maïs dans des boites de Pétri	17
Figure 10 : La germination des graines dans des papiers filtre.....	17
Figure 11 : Multiplication de la souche Bt04 sur un milieu solide et son incubation dans l'étuve	18
Figure 12 : Préparation de l'inoculum bactérien.....	18
Figure 13 : Mesure et ajustement de la densité bactérienne	19
Figure 14 : Application des traitements sur les plantules	20
Figure 15 : Mesure de paramètres de croissance	21
Figure 16 : Le dosage de la teneur en sucre	22
Figure 17 : La fixation des échantillons	23
Figure 18 : Le rinçage des échantillons.....	23
Figure 19 : La déshydratation des échantillons.....	24
Figure 20 : L'imprégnation	24
Figure 21 : L'inclusion.....	25
Figure 22 : le découpage	26
Figure 23 : la double coloration	26

Figure 24 : Réalisation des coupes à main levée.....	27
Figure 25 : l'observation des coupes histologiques	28
Figure 26 : Longueur de la racine du maïs après l'application des traitements	29
Figure 27 : Longueur de la partie aérienne du maïs après l'application des traitements	30
Figure 28 : Nombre moyen de racines secondaires du maïs après l'application des traitements	31
Figure 29 : Effet des traitements sur la teneur en sucre, dans les feuilles et les racines	32
Figure 30 : Coupe histologique de la tige de plantule de <i>Zea mays</i>	33
Figure 31 : Coupe histologique de la racine de plantule du <i>Zea mays</i>	34
Figure 32 : Coupe histologique des vaisseaux conducteurs des racines de <i>Zea mays</i>	35
Figure 33 : Coupe histologique des vaisseaux conducteurs de la tige de <i>Zea mays</i>	36
Figure 34 : Comparaison histométrique entre xylème et phloème des racines des différents traitements de <i>Zea mays</i>	38
Figure 35 : Comparaison histométrique entre xylème et phloème des tiges des différents traitements de <i>Zea mays</i>	39

Liste des tableaux

Tableau 01 : Les mesures des tissus des racines du maïs pour les quatre traitements (coupes transversales) en μm	37
--	----

Table des Matières

Liste des abréviations	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	III
Introduction	1

Chapitre I: Synthèse Bibliographique

1 Les phytohormones	4
1.1 DEFINITION DES HORMONES VEGETALES	4
1.2 PRINCIPALES PHYTOHORMONES	4
1.2.1 L'AUXINE	4
1.2.1.1 Decouverte des auxines	4
1.2.1.2 Definition de l'auxine	5
1.2.1.3 Les composes auxiniques	5
1.2.1.3.1 Composes naturels	5
1.2.1.3.2 Composes synthetiques	6
1.2.1.4 Biosynthese de l'auxine (aia)	6
1.2.1.5 Importance de l'auxine	7
1.2.1.6 Transport	7
1.2.1.6.1 Un transport non-polarise	7
1.2.1.6.2 Un transport polarise	7
2 Les inhibiteurs des phytohormones	9
2.1 ORIGINE	9
2.2 INHIBITEURS DU TRANSPORT D'AUXINE	9
2.3 CONSEQUENCES DE L'INHIBITION DES PHYTOHORMONES	10
3 Les PGPR	10

3.1	LA RHIZOSPHERE	10
3.2	LES PGPR	10
3.2.1	MODE D'ACTION DES PGPR	11
3.2.1.1	La production des phytohormones par les pgpr	12
3.2.1.1.1	La biosynthese de l'aia	12
4	Le maïs	12
4.1	ORIGINE DU MAÏS	13
4.2	TAXONOMIE	13
4.3	LAMORPHOLOGIE	14
4.3.1	LA PARTIE AERIENNE	14
4.3.2	LA PARTIE SOUTERRAINE	14
4.4	CONDITIONS DE CROISSANCE DU MAÏS	15

Chapitre II : Matériel et Méthodes

1	Materiel.....	16
1.1	MATERIEL VEGETAL.....	16
1.2	MATERIEL BACTERIEN.....	16
2	Methodes.....	16
2.1	GERMINATION DES GRAINES :.....	16
2.2	ENTRETIEN ET MULTIPLICATION DE LA SOUCHE BT04	17
2.2.1	MULTIPLICATION DE LA SOUCHE SUR UN MILIEU SOLIDE.....	17
2.2.2	PREPARATION DE L'INOCULUM BACTERIEN.....	18
2.2.3	DOSAGE DE LA CONCENTRATION DE LA SOUCHE BACTERIENNE	18
3	Inoculation des plantules par la souche bt04 et l'inhibiteur d'auxine (1-NOA) :.....	19
4	Parametres mesure	20
4.1	PARAMETRES DE CROISSANCE	20
4.2	PARAMETRE CHIMIQUE.....	21

5	Préparation des échantillons pour effectuer des coupes au microtome	22
5.1	FIXATION DES ÉCHANTILLONS.....	23
5.2	RINÇAGE DES ÉCHANTILLONS	23
5.3	DESHYDRATATION DES ÉCHANTILLONS	23
5.4	L'IMPREGNATION.....	24
5.5	L'INCLUSION.....	25
6	La réalisation des coupes histologiques par le microtome	25
6.1	LE DECOUPAGE	26
6.2	LA DOUBLE COLORATION	26
7	Réalisation de coupes à main levée	27
7.1	LE DECOUPAGE	27
7.2	LA DOUBLE COLORATION	27
8	L'observation	28
9	L'analyse statistique	28

Chapitre III : Résultats et interprétation

1	Effet des traitements sur la croissance du maïs	29
1.2	LONGUEUR DE LA PARTIE RACINAIRE	29
1.3	LONGUEUR DE LA PARTIE AÉRIENNE.....	29
1.4	NOMBRE MOYEN DE RACINES SECONDAIRES.....	30
2	Effet des traitements sur la teneur en sucre.....	31
3	Étude anatomique des tiges du maïs	32
3.1	L'ÉCORCE	32
3.2	LE CYLINDRE CENTRAL	32
4	Étude anatomique des racines de <i>zea mays</i>	33
4.1	L'ÉCORCE	33
4.2	LE CYLINDRE CENTRAL	33

5	Effet des traitements sur la formation des tissus du <i>maïs</i>	34
5.1	DANS LES RACINES	35
5.2	DANS LES TIGES	36
6	Effet des traitements sur l'histometrie de <i>zea mays</i>	37
7	Interpretation des resultats	37
7.1	HISTOGRAMMES	37
7.1.1	AU NIVEAU DES RACINES	37
7.1.2	AU NIVEAU DES TIGES	38
	Discussion	39
	Conclusion	42
	Références	44
	Annexe	
	Résumé	

Introduction

Introduction

Introduction

Tous les organismes multicellulaires, y compris les plantes, doivent réguler et coordonner leurs activités de croissance et leur développement. Les régulations spatiales et temporelles sont nécessaires pour une exécution et un traitement corrects d'événements de développement, ainsi que pour la réponse appropriée d'un individu donné à différentes conditions environnementales. Dans le cas des plantes, les substances de signalisation ou appelée aussi les hormones végétales ou les phytohormones interviennent dans la régulation et la coordination. Les phytohormones sont des substances organiques endogènes synthétisées à très faible concentration dans une partie de la plante, puis transportées dans une partie différente du lieu de production, elles agissent rarement seules, le plus souvent en coordination avec d'autres hormones pour le déclenchement d'un ou plusieurs événements biologiques. Les principales phytohormones sont les cytokinines, les gibbérellines, l'acide abscissique, l'éthylène et les auxines.

L'auxine, ou l'acide indole acétique est la première hormone à été découverte au début du XXe siècle par sa capacité à faire courber des coléoptiles des graminées vers une source lumineuse. Des travaux ultérieurs permettent la découverte d'autres composés naturels et synthétiques homologue à cette hormone. L'auxine intervient dans de nombreux phénomènes physiologiques comme le développement de la racine, des parties aériennes, la régulation des différents types de tropismes mais également pour la floraison et la fructification ou encore la réponse aux pathogènes. La sensibilité aux auxines dépend des espèces, des tissus et des récepteurs. Elle est généralement produite dans l'apex collinaire et transportée vers les racines selon deux trajectoires : la voie non polarisée assurée par le système vasculaire et/ou la voie polarisée qui représente une migration de cellule en cellule à travers des protéines transmembranaires (transporteurs), ce type de transport peut être soumis à une altération par d'autres substances organiques ou synthétiques.

En conditions de stress (salin, thermique...) la plante est sujette à un déséquilibre hormonal qui provoque l'inhibition de certaines phytohormones. Le transport de l'auxine polarisé est bloqué par plusieurs inhibiteurs qui sont de différentes origines : substances végétales endogènes, des composés indigènes non végétal ou entièrement d'origine synthétique. Leur action est soit de manière compétitive ou non compétitive. Parmi ces substances, le 1-NOA (l'acide 1-naphtoxyacétique et 2-naphtoxyacétique) qui est un dérivé de l'auxine. Le 1-NOA et le 2-NOA ont comme fonction l'inhibition des transporteurs d'influx d'auxine (AUX1), alors que le 1-NOA est capable d'inhiber également le transport d'efflux d'auxine

Introduction

(PIN1). Cette inhibition a comme conséquences la dormance des bourgeons et le ralentissement puis l'arrêt de la croissance des racines. Le 1-NOA fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et beaucoup de chercheurs s'intéressent à étudier et à comprendre son effet sur le transport d'auxine et sur la croissance des plantes.

Cependant, l'effet de ces inhibiteurs peut être inversé grâce à l'interaction avec des bactéries telles les PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) qui sont des bactéries qui se développent dans la rhizosphère des plantes (à proximité des racines). Elles sont caractérisées par leurs capacités à stimuler la croissance des plantes de plusieurs façons : via la solubilisation d'éléments nutritifs tels que le phosphore et le fer, en fixant l'azote atmosphérique et en produisant des phytohormones de croissance telles l'auxine. En plus de leurs effets qui favorisent la croissance des plantes, les PGPR présentent également des caractéristiques de contrôle biologique, notamment par la sécrétion d'antibiotiques, la production d'enzymes lytiques et l'induction de la résistance systémique des plantes. Elles regroupent plusieurs genres de bactéries comme : *Pseudomonas* ; *Bacillus*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, *Burkholderia*, et *Serratia* dont chacune a ces fonctions et caractéristiques propres mais ont toutes des propriétés bénéfiques à la plante.

Le maïs, la première production de céréale devant le riz et le blé et la deuxième plante modèle après l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*), est largement utilisée dans les travaux de recherche et d'expérimentation pour étudier la physiologie et les interactions des plantes. Le maïs est cultivé pour l'alimentation humaine et animale mais aussi pour de nombreuses utilisations dans l'industrie textile, pharmaceutique et dans la production de plastique biodégradable et de biocarburants.

L'objectif de notre travail consiste à étudier l'effet d'inhibiteur d'auxine 1-NOA sur la formation et la structure des tissus du maïs et de tester la capacité d'une PGPR (la souche Bt04) à réduire l'effet de cet inhibiteur, par comparaison des coupes histologiques de la partie racinaire et aérienne de la plante.

Cependant pour atteindre ces objectifs, le présent travail se focalise sur trois parties principales :

- La première présente une synthèse bibliographique sur les travaux portant sur les phytohormones, les PGPR et leur aptitude de sécrétion d'auxine ainsi que leur inhibition.
- La deuxième indique le matériel et les méthodes utilisés au cours des parties expérimentales.

Introduction

- La troisième démontre les résultats obtenus et les discute en les comparant avec d'autres travaux dans cet axe de recherche.

Synthèse Bibliographique

1 Les Phytohormones

1.1 Définition des hormones végétales

Les hormones végétales, encore appelées phytohormones, sont des substances organiques naturelles qui influencent l'ensemble des processus physiologiques de croissance, de différenciation et de développement des plantes et leur confèrent leurs capacités d'adaptation aux variations de conditions de l'environnement (Morot-Gaudry *et al.*, 2017). Elles sont synthétisées dans divers organes végétaux, transportées dans l'intégralité ou une seule partie d'une plante et agissent en fonction de leurs concentrations, en synergie ou en antagonisme, mais aussi en relation étroite avec des stimuli extérieurs comme la lumière, la température, la disponibilité en eau et en nutriments (Suty, 2014).

1.2 Principales phytohormones

Les hormones végétales sont réparties en cinq groupes : Les auxines, les gibbérellines, les cytokinines, l'acide abscissique (ABA) et l'éthylène. En plus de ces cinq principaux groupes, deux autres groupes semblent exercer une activité régulatrice de la croissance des plantes : les brassinostéroïdes et les polyamines. Les gibbérellines sont impliquées dans la mobilisation des réserves de l'albumen lors de la germination et dans le développement des fleurs et des fruits (Hopkins, 2003). Les cytokinines interviennent dans les divisions cellulaires, le retard de sénescence et aux interactions avec les pathogènes (Suty, 2014). L'acide abscissique intervient dans l'induction de la synthèse des protéines de réserve et dans la réaction au stress hydrique (Hopkins, 2003), ainsi que dans l'inhibition de la dormance (Suty, 2014). A son tour l'éthylène semble être synthétisé dans des situations de stress et pour accélérer le mûrissement et la sénescence (Hopkins, 2003). Il a été montré qu'il stimule l'initiation des racines ainsi que d'autres aspects du développement (Abeles *et al.*, 1992).

1.2.1 L'auxine

1.2.1.1 Découverte des auxines

L'existence d'une hormone de croissance chez les végétaux fut établie par une longue série de travaux, Darwin en 1880 (**Fig1**) a étudié un phénomène que nous qualifions actuellement de phototropisme. Les premières feuilles des graminées sont enfermées dans la coléoptile, Darwin observa que les coléoptiles orientaient leur croissance vers la source lumineuse. Il a également démontré que le signal phototropique était perçu par l'extrémité et

transmis depuis la partie extérieure vers la partie inférieure qui la fait se courber. La suite a été étudiée par Peter Boysen Jensen (1910-1913). Il a démontré, en greffant une extrémité de coléoptile sur une autre décapitée, que celui-ci retrouvait sa capacité à s'orienter vers la lumière. Il a observé que la stimulation de la courbure et la croissance de ces dernières sont conservées. L'angle de la courbure dépend de la concentration en substance active, qu'il nomme auxine (Hopkins, 2003).

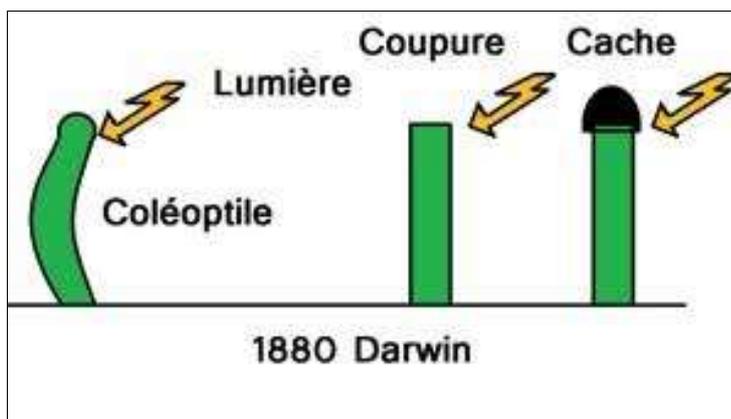


Figure 1 : Expérience de Darwin en 1880

1.2.1.2 Définition de l'auxine

C'est un composé à noyau indole dont la formule brute est : $C_{10}H_9O_2N$ (Fig.2).

Elle doit son nom à son action sur l'élongation cellulaire (auxèse) (Augé *et al.*, 1982).

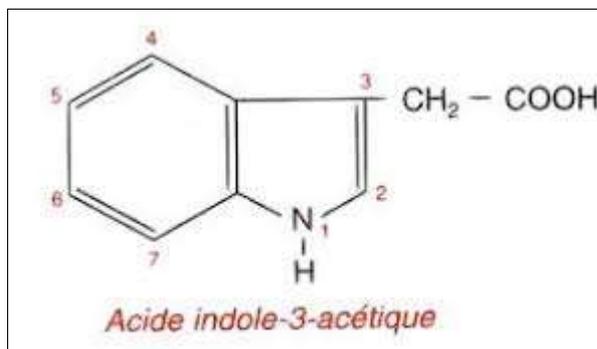


Figure 2 : Structure chimique de l'auxine

1.2.1.3 Les composés auxiniques

1.2.1.4 Les composés naturels

La plus fréquente auxine est l'acide indole acétique (AIA) (Hopkins, 2003). En plus de l'AIA de nombreux composés de structure et de conformation stéréochimique voisines ont été expérimentés (Augé *et al.*, 1982). Ces composés auxiniques présentent comme point commun

un noyau aromatique et une fonction carboxylique. La plante n'est capable de produire qu'une petite quantité d'auxine naturelle comme l'acide indole 3-butyrique (AIB), l'acide phenylacétique (APA) et l'acide 4-chloroindole-3-acétique (4Cl-AIA), mais leurs rôles respectifs ne sont pas encore clairement définis (**Fig3.A**).

1.2.1.4.1 Les composés synthétiques

Des molécules synthétiques, plus stables, présentent un effet également auxinique, dont l'acide 2,4-dichlorophenoxyacétique (2,4-D) et l'acide α -naphthalène acétique (ANA) ...(**Fig3.B**) (Simon & Petrašek, 2011; Simon *et al.*, 2013).

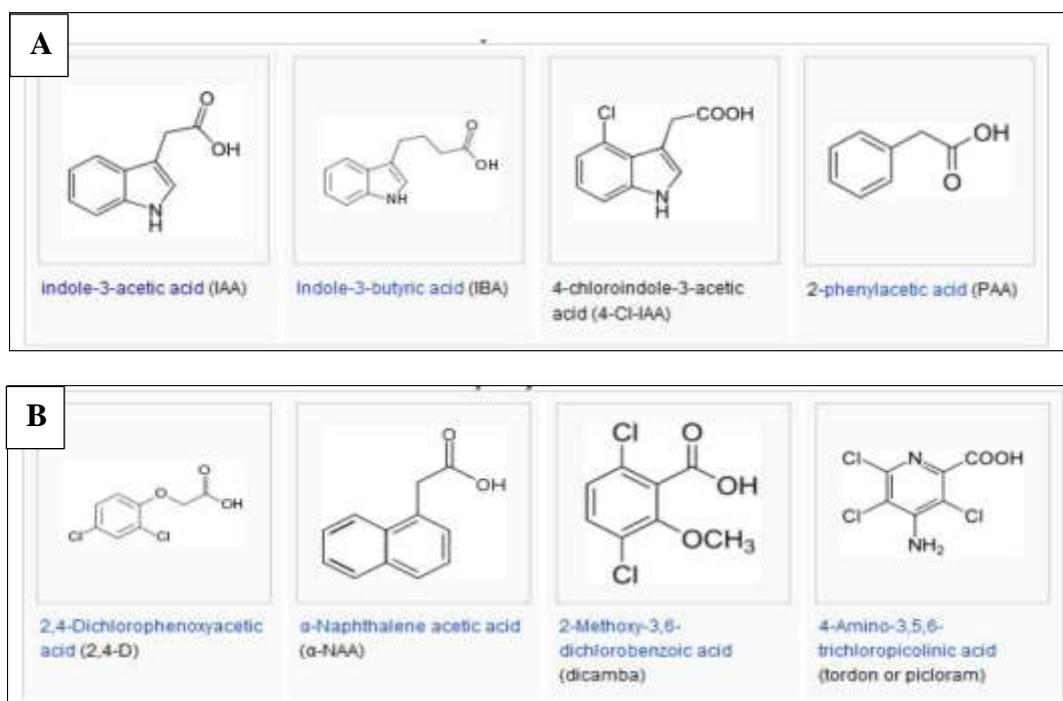


Figure 3 : Structure chimique des molécules à activité auxinique

(Source : Syngenta molecule library)

1.2.1.5 Biosynthèse de l'auxine (AIA)

L'AIA ou Acide Indole Acétique est synthétisé à partir d'indole, selon plusieurs voies de biosynthèse impliquant ou non le tryptophane (Quittenden *et al.*, 2009). Il est aussi produit par les jeunes feuilles et les graines des végétaux à partir de réactions de transamination et de décarboxylation du L-tryptophane. En général, le L-tryptophane constitue le précurseur principal pour l'AIA (Chung et Tzeng, 2004).

1.2.1.6 Importance de l'auxine

Les auxines sont des hormones végétales qui jouent un rôle majeur dans le contrôle de la croissance et du développement des plantes. Elles interviennent dès les premiers stades de l'embryogenèse, puis contrôlent aussi bien l'organisation du méristème caulinaire, le développement des tissus vasculaires de la feuille (Vanneste et Friml, 2009), la ramification des parties aériennes de la plante (dominance apicale) ainsi que la formation de la racine principale, l'initiation des racines latérales et des racines adventives (Rhizogénèse), et interviennent dans les tropismes en réponse à la gravité (gravitropisme) ou à la lumière (phototropisme). Ces multiples effets se traduisent par la régulation du cycle cellulaire ainsi que par les processus d'élongation et de différenciation cellulaires (Perrot-Rechenmann, 2010). Il a été constaté que les effets induits par l'auxine au sein des tissus sont en fonction de la concentration et de l'organe concerné suggérant des différences de sensibilité des tissus vis-à-vis de l'auxine (Thimann, 1938; Evans *et al.*, 1994).

1.2.1.7 Transport

Cette hormone est produite dans les jeunes feuilles de l'apex principal (Ljung *et al.*, 2001)

L'AIA est ensuite transportée en direction des racines par deux systèmes :

1.2.1.7.1 Un transport non-polarisé

C'est un transport à longue distance où l'auxine est chargée dans le phloème qui un tissu végétal permettant la circulation de la sève élaborée au sein de la plante. Ce transport est important à l'échelle de la plante et permet un flux d'auxine des organes sources aux organes puits (Petrašek et Friml, 2009).

1.2.1.7.2 Un transport polarisé

Il permet une mobilité de cellule à cellule de l'auxine et donc une répartition contrôlée de l'hormone. Il joue un rôle important dans les mécanismes développementaux en permettant l'établissement de gradients d'auxine (Friml, 2003). Ce transport est assuré à l'échelle cellulaire par un mécanisme actif dû à des protéines transmembranaires, chaque cellule possède deux types de protéines de contrôle : l'un permettant l'entrée de l'AIA dans la cellule (influx) et l'autre permettant sa sortie (efflux) (Rubery et Sheldrake, 1974).

A- Les transporteurs d'influx d'auxine

Sont codés par les gènes de la famille AUX-LAX qui appartiennent aux perméases (perméase-like) (Bennett *et al.*, 1996 ; Parry *et al.*, 2001b) dont le mécanisme d'action précis n'est pas encore déterminé mais qui sembleraient agir comme des symports IAA/protons (Kerr et Bennett, 2007). La protéine AUX1 est impliquée dans le transport basipète puis acropète de l'auxine au niveau de l'apex racinaire (**Fig.4 A et B**).

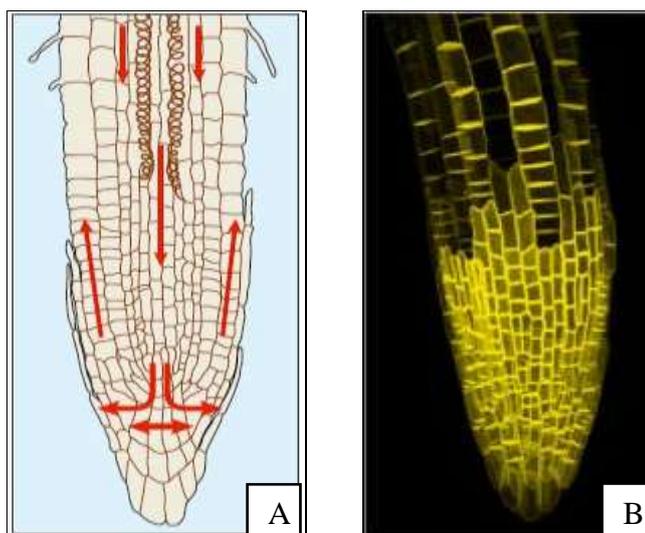


Figure 4 : Transport de l'auxine dans l'apex racinaire
(Swarup *et al.*, 2001)

Depuis, trois autres gènes phylogénétiquement proches, les gènes *LAX* (pour like *AUX1*) ont été déterminés par le même rôle de transporteurs d'influx de l'auxine. (Bennett *et al.*, 1996; Peret *et al.*, 2012). A ce jour, *LAX3* et *AUX1* sont les mieux caractérisés car leur rôle dans la biologie de la racine a été mis en évidence (Marchant *et al.*, 2002; Swarup *et al.*, 2008). Les quatre gènes ne partagent pas les mêmes profils d'expression ni la même implication dans les phénomènes auxiniques (Peret *et al.*, 2012).

B- Les transporteurs d'efflux d'auxine

Plusieurs gènes peuvent coder les transporteurs d'efflux d'auxine, les acteurs les plus importants sont les protéines PIN-FORMED (PIN) et les transporteurs ATP-BINDING CASSETTE de type B (ABCB) (Benkova *et al.*, 2003; Wisniewska *et al.*, 2006).

- **Les PINs :** 8 membres dans cette famille de protéines transmembranaires, divisés en deux sous-groupes qui correspondent à la longueur de leurs séquences protéiques. Cette

différence de taille semble également être corrélée à leurs localisations, les PINs longs sont situés sur la membrane plasmique, au contraire des PINs courts qui seraient dans le réticulum endoplasmique (Zazimalova *et al.*, 2010).

- **Les ABCB :** La famille des ABC (pour ATP Binding Cassette) est extrêmement large et regroupe certains transporteurs qui présentent une relative spécificité pour l'auxine (Blakeslee *et al.*, 2007). L'hypothèse actuelle est que les ABC transporteurs soutiennent l'action des PINs, bien que leur localisation soit non polaire (Mravec *et al.*, 2008).

2 Les inhibiteurs d'hormones

Le transport par la voie vasculaire ne peut être soumis à l'action d'aucun inhibiteur. Par contre l'activité des transporteurs peut être affectée par des inhibiteurs plus ou moins spécifiques (Klíma *et al.*, 2015).

2.1 Origine

Les inhibiteurs du transport des phytohormones peuvent être des substances végétales endogènes, des composés indigènes d'origine non végétale ou totalement drogues synthétiques. Ils peuvent agir soit de manière compétitive ce sont généralement des analogues synthétiques d'une phytohormone donnée qui sont principalement (Simon *et al.*, 2013) physiologiquement actifs comme la phytohormone native elle-même ou de manière non compétitive. Comme déjà mentionné, les inhibiteurs désirés ne devraient interférer avec le mouvement des phytohormones induit par les transporteurs. Il existe cependant des composés qui interfèrent avec la perméabilité de la membrane ou d'autres propriétés liées à la membrane telle la formation de gradients de protons (Klíma *et al.*, 2015).

2.2 Inhibiteurs du transport d'auxine

Parmi les inhibiteurs d'auxine, l'acide 1-naphtoxyacétique (1-NOA), l'acide 2-naphtoxyacétique (2-NOA) et l'acide 3-chloro-4-hydroxyphénylacétique (CHPAA) qui ont été dérivés sur des bases de similitudes structurales avec l'auxine de synthèse l'analogue (2,4-D), un substrat porteur d'influx d'auxine ou avec l'acide naphthalène-2-acétique (2-NAA), inhibe les transporteurs d'influx d'auxines (Imhoff *et al.*, 2000). L'acide 1-naphtoxyacétique (1-NOA) et l'acide 2-naphtoxyacétique (2-NOA), inhibent les transporteurs d'influx d'auxine (AUX1). Cependant, le 1-NOA est capable d'inhiber également le transporteur d'efflux d'auxine (PIN1). Il a été démontré que le mode d'action du 1-NOA, du 2-NOA et du CHPAA est lié à la dynamique de la membrane plasmique. Le plus puissant inhibiteur, le 1-NOA, bloque les activités des transporteurs d'influx d'auxines et d'efflux, alors que le 2-NOA et le

CHPAA à la même concentration ont inhibé préférentiellement l'influx d'auxines (Laňková *et al.*, 2010).

2.3 Conséquences de l'inhibition des phytohormones

Les inhibiteurs du transport d'auxine sont des outils importants pour évaluer le rôle du transport d'auxine polaire dans le développement des cellules, des tissus et des plantes, en général. L'inhibition de quelques régulateurs de croissance peut induire une dormance au niveau des bourgeons et un ralentissement puis un arrêt de la croissance des racines (Augé *et al.*, 1982). Conduisant à un arrêt de la croissance de la plante entière et provoquant des dégâts sur le rendement et la production dans le cas des plantes cultivées.

3 Les PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)

3.1 La rhizosphère

La rhizosphère est la zone du sol qui entoure les racines des plantes (Hartmann *et al.*, 2008). Elle est soumise à leur influence et représente donc l'environnement d'interaction entre les rhizobactéries et les végétaux grâce aux processus physicochimiques imposés par l'activité racinaire (Bowen et Roriva, 1991)

3.2 Les PGPR

Le terme PGPR a été introduit pour la première fois à la fin des années 1970 par Klepper et Schroth. (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) ou les rhizobactéries promotrices de croissance végétale, sont des bactéries qui se multiplient et rivalisent avec les autres microorganismes tout en colonisant la rhizosphère et en bénéficiant des exsudats racinaires pour rendre cette zone riche en éléments nutritifs (Dey *et al.*, 2004 .Hartmann *et al.*, 2008). Elles regroupent plusieurs genres de bactéries telles les *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, *Burkholderia*, et *Serratia* dont chacune a ces fonctions et caractéristiques propres mais ont toutes des propriétés bénéfiques à la plante (Barea *et al.*, 2005).

3.2.1 Mode d'action des PGPR

Les PGPR sont utilisées comme améliorateurs de croissance des plantes. Elles sont classées selon leurs activités fonctionnelles directes comme étant biofertilisants en augmentant la teneur nutritive dans la rhizosphère à travers la solubilisation d'éléments nutritifs tels le phosphore et le fer, en fixant l'azote atmosphérique, ainsi que des phytostimulants en produisant des phytohormones de croissance ou indirecte en jouant le rôle

d'agent de biocontrôle en dégradant les polluants et luttant contre les pathogènes par la sécrétion d'antibiotiques (Verma *et al.*, 2010), la production d'enzymes lytiques et l'induction de la résistance systémique des plantes (Glick, 1995).

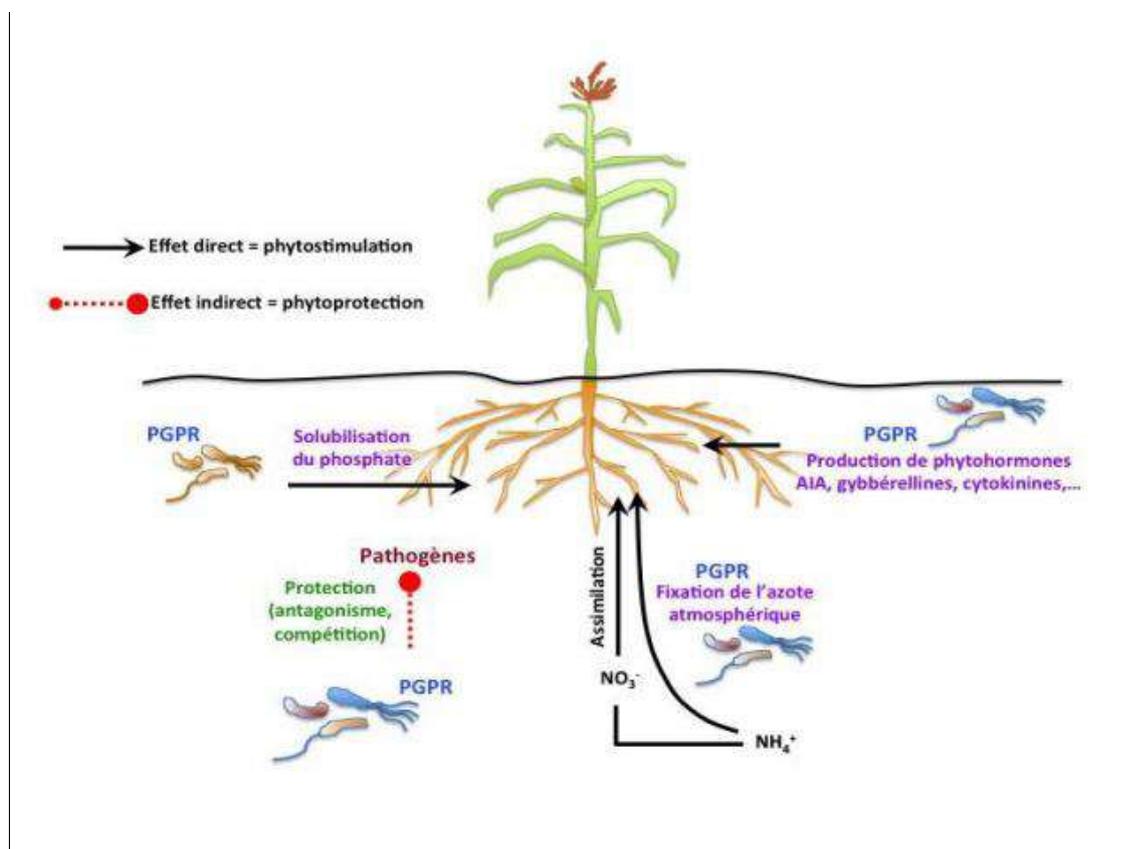


Figure 5 : Interactions entre plantes et rhizobactéries

(Khan *et al.*, 2009)

3.2.1.1 La production des phytohormones

Parmi ses diverses fonctions les PGPR peuvent produire des substances qui régulent la croissance et le développement des plantes, telles les auxines, les cytokines, les gibbérellines et l'éthylène (Arora *et al.*, 2013).

3.2.1.1.1 La biosynthèse de l'AIA

L'AIA est très couramment produite par les PGPR et impliquée dans leurs mécanismes de promotion de la croissance des plantes. On a estimé que 80% des bactéries isolées de la rhizosphère peuvent produire l'AIA (Patten et Glick 1996; Patten et Glick 2002). Cependant, l'effet de l'AIA sur les plantes dépend de la sensibilité de la plante, de la quantité d'AIA produite à partir de bactéries et de l'induction et productions des autres phytohormones (Reddy, 2014). L'AIA bactérienne de *Pseudomonas putida* a joué un rôle majeur dans le

développement du système racinaire de la plante hôte. Le plus souvent, on pense que les PGPR producteurs d'AIA augmentent la croissance et la longueur des racines, Il en résulte une plus grande surface racinaire qui permet à la plante d'avoir accès à plus de nutriments du sol (Patten et Glick, 2002).

La Biosynthèse de l'AIA par les PGPR implique une de ces trois voies. La première voie par l'intermédiaire de l'acide indole-3-pyruvique et d'acide-3-indole-acétaldéhyde. Elle a été rencontrée chez la majorité des bactéries. La deuxième voie est la conversion du tryptophane en acide-3- indole acétaldéhyde, peut constituer une voie alternative dans laquelle la tryptamine est formée (Khan *et al.*, 2014). Et la troisième voie est la biosynthèse de l'AIA par la formation de l'indole-3- acétamide (Manulis *et al.*, 1994 ; Khan *et al.*, 2014).

4 Le maïs

Le maïs (*Zea mays .L*) est une plante tropicale, herbacée, annuelle qui appartient à la famille des poacées (ou graminées) et la sous-famille des panicoïdées. . Il est cultivé pour ses grains très riches en amidon ce qui fait qu'aujourd'hui, le maïs est devenu la première céréale cultivée dans le monde, devant le riz et le blé. Cette plante est largement utilisée dans l'alimentation animale et humaine, et pour des usages industriels (Rouanet, 1984 ; Doré *et al.*, 2006).

4.1 L'Origine du maïs

Son origine reste encore imprécise mais on suspecte qu'elle est de l'Amérique centrale plus précisément des hauts plateaux mexicains où de nombreux échantillons témoignent de sa présence depuis plus de 5000ans avant Jésus-Christ. (Rouanet ,1984) Et certains ouvrages disent qu'il est encore plus vieux (environ -7000 ans).

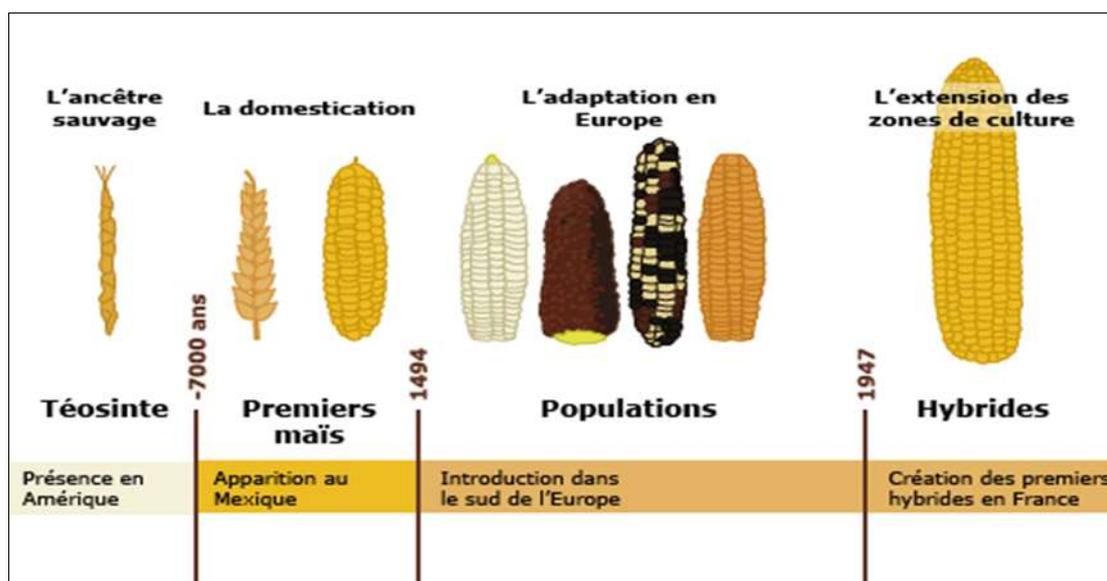


Figure 6 : Le développement du maïs au fil du temps

4.2 La Taxonomie

Le maïs appartient au règne végétal, à la classe des Liliopsidées, à l'ordre des cypéales, à la famille des Poacées, à la sous-famille des panicoidées, au genre *Zea* et à l'espèce *Zea mays*. C'est une plante qui ne peut se multiplier à l'état naturelle sans l'intervention de l'homme c'est ce qui expliquerait son absence à l'état sauvage (Doré *et al*, 2006).

4.3 La Morphologie

4.3.1 La partie aérienne

Le plant de Maïs est composé d'une seule tige, de gros diamètre, pleine, lignifiée et formée de plusieurs entrenœuds d'une vingtaine de centimètres, séparés par des nœuds. Sa taille est variable, pour les variétés actuellement cultivées, la taille varie de 1 à 3 m. Au niveau de chaque nœud, de manière opposée, s'insèrent les feuilles à limbe allongées et à nervures parallèles. Le Maïs est une espèce à pollinisation croisée où les inflorescences femelles (épis) et les inflorescences mâles (panicules) sont disposées à des endroits distincts sur la plante. Les épis, souvent à raison d'un épi par tige sont formés d'un nombre variable de rangés de grains (de 12 à 16), qui fournissent entre 300 à 1000 grains. Le grain de Maïs est formé d'un embryon, d'un tissu de réserve (l'albumen) et d'une enveloppe fine et translucide (le péricarpe). L'albumen est constitué essentiellement de grains d'amidon; c'est l'amidon corné qui donne une couleur aux grains de Maïs, généralement jaune, blanc, rouge ou noir.



Figure 7 : Les différentes formes et couleurs du maïs

4.3.2 La partie souterraine

Le système racinaire du maïs est composé d'un grand nombre de racines adventives situées sur les nœuds à la base de la tige. Il est caractérisé par des racines de surface, qui prélèvent l'eau et les nutriments nécessaires à la plante dans les couches les plus superficielles du sol. Ce type d'exploitation des ressources du sol fait que la plante est très exigeante en azote et en eau, proportionnellement aux rendements élevés qu'elle permet, ce qui pose de graves problèmes environnementaux dans les régions tempérées.

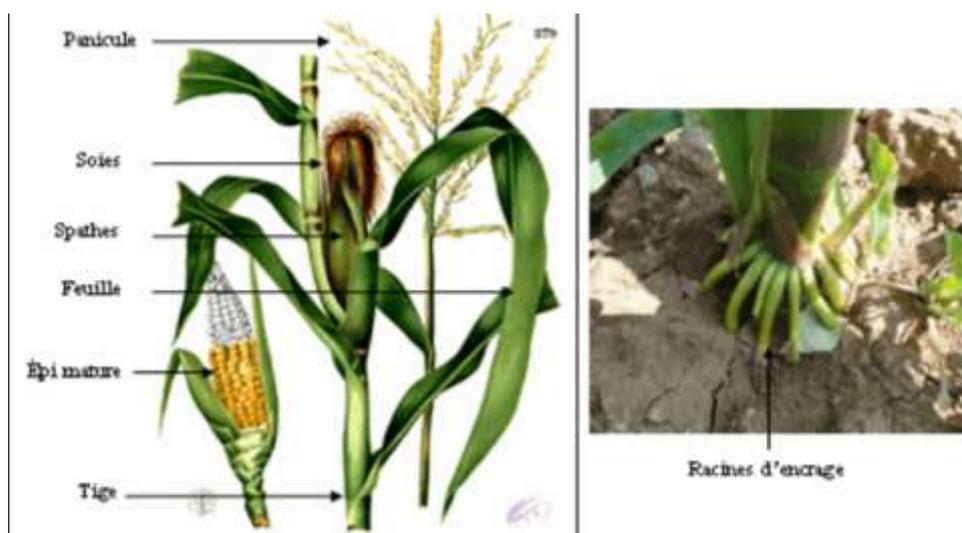


Figure 8 : Morphologie d'un plant de maïs

4.4 Conditions de croissance du maïs

Le maïs ainsi que d'autres graminées tropicales (comme la canne à sucre ou le sorgho), fait partie des plantes dites en C4. (Denhière, 1984). La culture du Maïs nécessite une température minimum de 10°C pour une germination active. Son rendement dépend de la satisfaction de ses besoins en eau en particulier dans les deux semaines précédant et suivant la floraison qui est une période critique. C'est une culture qui préfère les sols profonds et riches mais qui peut s'accommoder à des conditions plus difficiles comme les sols sableux ou argileux voire calcaires, sous réserve d'assurer les apports d'eau et d'éléments nutritifs nécessaires (Denhière, 1984).

Matériel et méthodes

Notre expérimentation a eu lieu au sein du laboratoire de physiologie végétale, au laboratoire de microbiologie et au laboratoire de biotechnologie végétale dans la Faculté des sciences de la nature et de la vie, Université Ibn Khaldoun, Tiaret.

1 Matériel

1.1 Matériel végétal

Ce travail est mené sur le Maïs (*Zea mays*), sur une population appelé DZ originaire d'Adrar. Elle est récoltée dans le sud algérien et expérimentée au niveau du laboratoire de recherche LRGB (laboratoire de ressources génétique et de biotechnologie, ENSA, ELHARACH).

1.2 Matériel bactérien

La bactérie PGPR utilisée dans la présente étude est une *Bacillus toyonensis* souche Bt04 qui a un numéro d'accèsion : KU321234. Elle a été isolée à partir de la rhizosphère du palmier dattier à Bechar (Algérie) (Rahmoune *et al.* 2017). Elle a été identifiée à l'aide de la technique de séquençage de l'ARNr 16S. Toutes les données sur cette souche ont été déposées dans la base de données nucléotidique NCBI GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>).

2 Méthodes

2.1 Germination des graines

Les graines du maïs ont été désinfectées puis mises en germination selon les étapes suivantes (Schwachtje *et al.* 2011) (**Fig.9A et B**):

- Mise des graines dans de l'eau de javel pendant 2mins.
- Rinçage par l'eau distillée, plusieurs fois.
- Mettre dans des boîtes de Pétri couvertes par un papier filtre imbibé
- Enfin, les boîtes de Pétri sont mises dans des conditions ambiantes pour la germination.



Figure 9 : Mise en germination des graines du maïs dans des boîtes de Pétri

Après deux jours de germination, les graines ont ensuite été mises dans quatre papiers filtre (12 graines/papier). Ces derniers ont été enroulés (**Fig. 10A**) et disposés verticalement dans un seul béccher contenant de l'eau distillée (**Fig. 10B**). Le béccher a été mis en incubation dans une chambre de culture réglée à 28°C avec un photopériodisme de 16h lumière/8h d'obscurité, jusqu'à l'apparition des premières feuilles (10-12 jours après la mise en culture).



Figure 10 : La germination des graines dans des papiers filtre

2.2 Entretien et multiplication de la souche Bt04

2.2.1 Multiplication de la souche sur un milieu solide

La souche Bt04 a été multipliées (ensemencement), sur un milieu King B solide (pH : 7,2) (**Fig. 11A**) puis incubée dans l'étuve à 30°C pendant 24h (**Fig. 11B**).

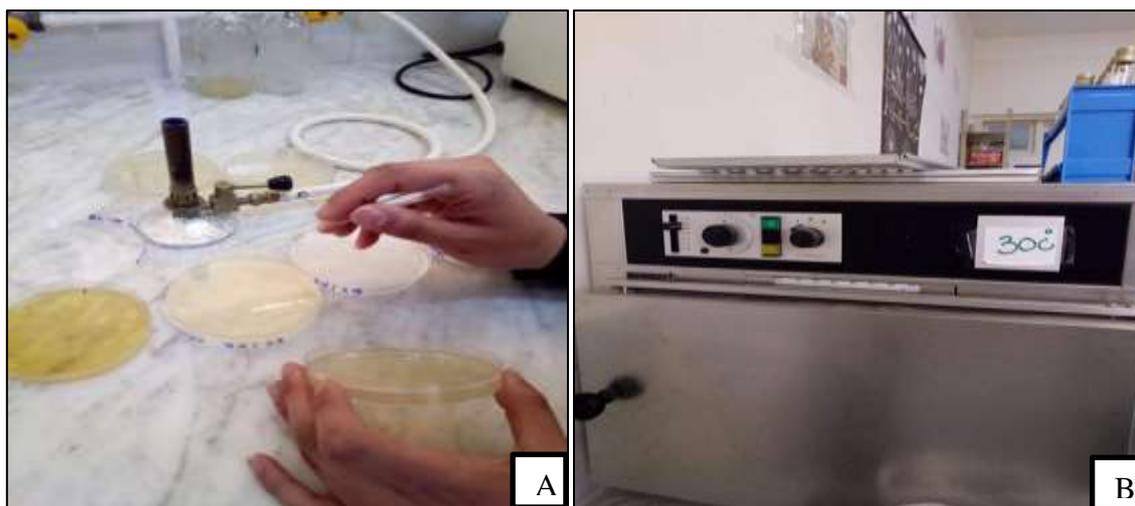


Figure 11 : Multiplication de la souche Bt04 sur un milieu solide et son incubation dans l'étuve

2.2.2 Préparation de l'inoculum bactérien

La bactérie Bt04 a été cultivée dans une solution de l'eau péptonée (Fig. 12A) et incubée, sous agitation à 120 t/m, pendant 24h à 28°C (Fig. 12B).

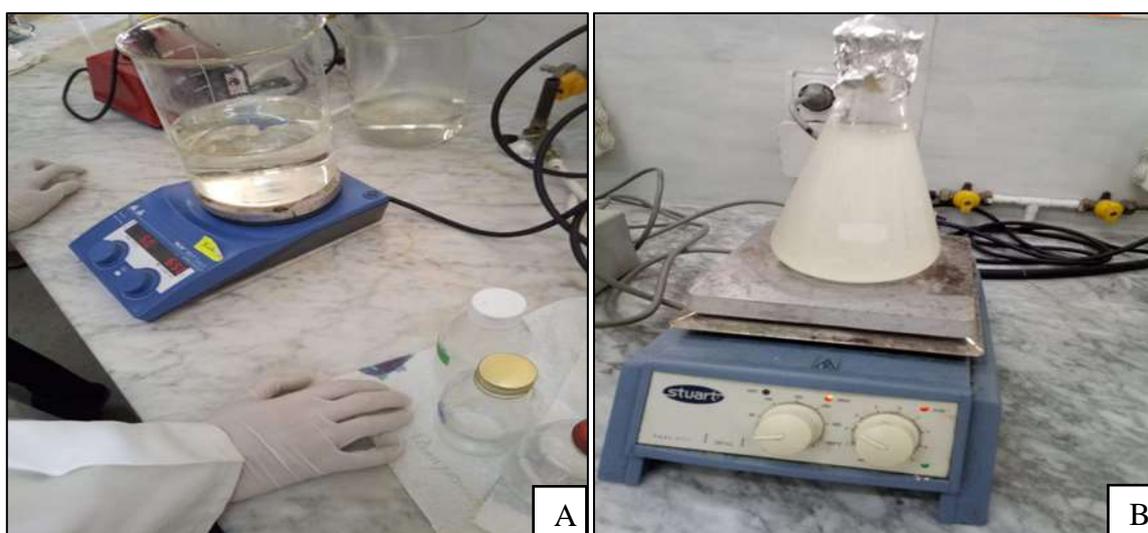


Figure 12 : Préparation de l'inoculum bactérien

2.2.3 Dosage de la concentration de la souche bactérienne

Après 24 heures d'incubation, on a procédé à la mesure et l'ajustement de la concentration pour parvenir à une densité optique de 1,00 (lecture spectrophotométrique à 630 nm de longueur d'onde) (Fig. 13 A et B).

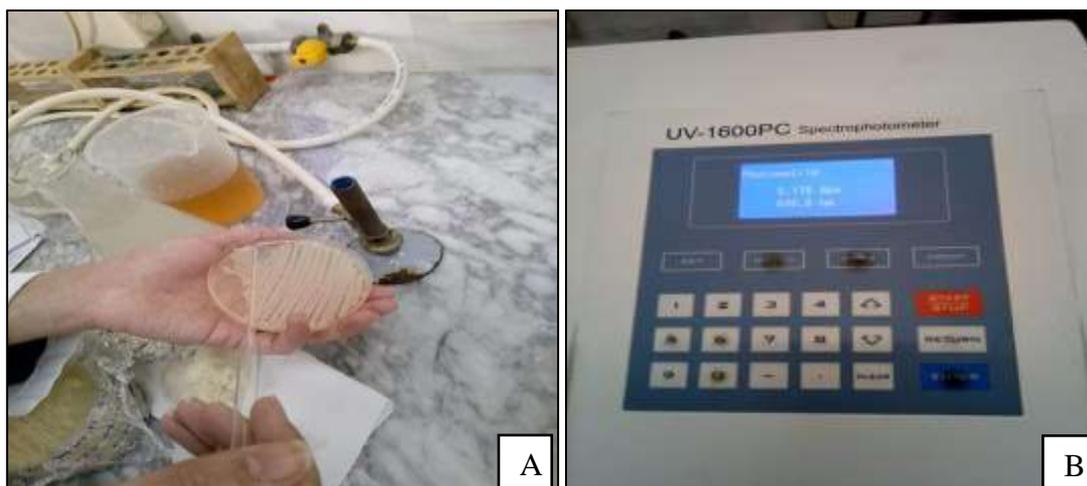


Figure 13 : Mesure et ajustement de la densité bactérienne

3 Inoculation des plantules par la souche Bt04 et l'inhibiteur d'auxine (1-NOA)

L'inoculation des plantules de *Zea mays*, par la souche Bt04 et l'inhibiteur d'auxine 1-NOA, a été réalisée en suivant la méthode décrite par Shimamura *et al.* (2014). Dès l'apparition des premières feuilles, les rouleaux de papier filtre contenant les jeunes plantes ont subi quatre traitements différents, chaque papier est mis dans un Bécher de 300ml, puis installé dans la chambre de culture à 28° C avec un phototropisme de 16h lumière/8h d'obscurité, pendant 7 jours. Les quatre traitements effectués sont les suivants (**Fig. 14A et B**) :

- 1- **T0** (Témoin) : On met un rouleau de papier filtre dans une solution contenant 250 ml d'eau distillée.
- 2- **T1** : On met un rouleau de papier filtre dans une solution de 250 ml contenant la souche bactérienne Bt04, pour l'inoculation des plantules pendant 12h, puis cette solution a été remplacée par une solution de l'eau distillée.
- 3- **T2** : On met un rouleau de papier filtre dans une solution de 250 ml contenant l'inhibiteur d'auxine (1-NOA).
- 4- **T3** : On met un rouleau de papier filtre dans une solution de 250 ml contenant la souche Bt04 dans 250 ml d'eau péptonée pour l'inoculation des plantules pendant 12h. Par la suite, cette solution a été remplacée par une solution de 250 ml contenant 75µl d'inhibiteur d'auxine (1-NOA).



Figure 14 : Application des traitements sur les plantules

4 Paramètres mesurés

4.1 Paramètres de croissance

Avant et 7 jours après l'application des quatre traitements, des mesures ont été réalisées (Fig.15), ces mesures porte sur les paramètres suivants :

- **Longueur de la racine principale**

Toute la partie qui s'étale du point d'initiation de la racine de la graine à l'extrémité de la coiffe a été mesurée.

- **Longueur de la partie aérienne**

Toute la partie qui s'étale du point d'initiation de la tige de la graine à l'extrémité de la feuille la plus longue a été mesurée.

- **Nombre de racines secondaires**

Toutes les racines apparues sur l'extrémité de la tige (collet) y compris les racines séminales et adventives ont été comptées.

- **La masse fraîche**

Le poids de la partie aérienne et souterraine est également mesuré.

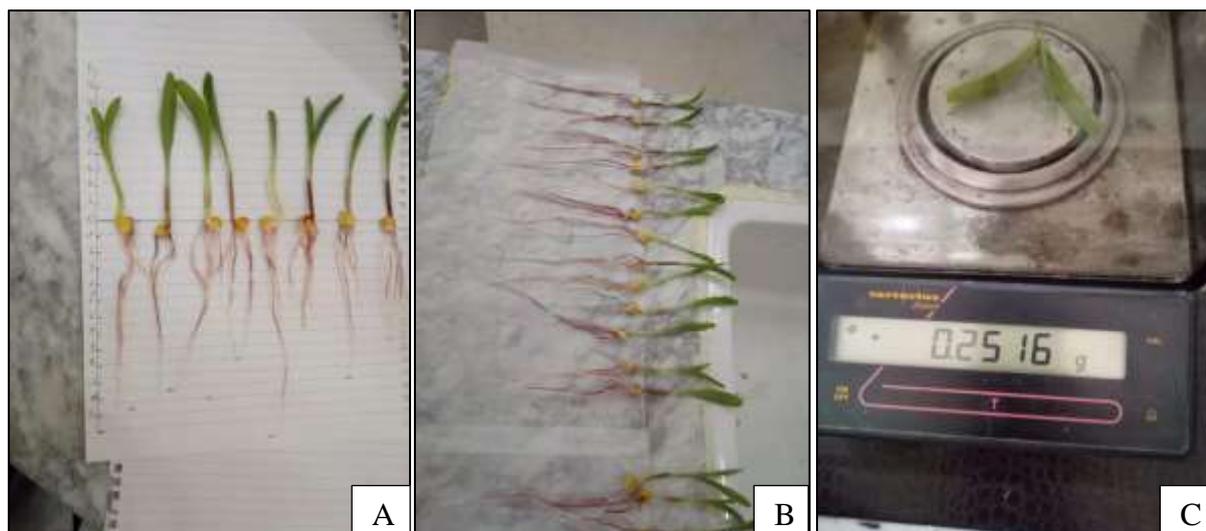


Figure 15 : Mesure de paramètres de croissance

4.2 Paramètre chimique

Dosage de la teneur en sucre de la partie aérienne et la partie souterraine

Cette opération a été réalisée en suivant les étapes suivantes (Fig. 16) :

- Peser de 100g de la partie aérienne et la partie souterraine des échantillons, pour chaque traitement (Fig. 16A).
- Dans des tubes à essai, ajouter pour chaque échantillon, 5 ml d'éthanol à 80%, et mettre ces tubes dans des conditions obscures pendant 48h (Fig. 16B).
- Faire passer chaque tube au vortex pendant 5 min (Fig. 16C).
- Traiter 1ml de surnageant avec 5ml d'acide sulfurique et 1ml d'acide acétique en les remuant doucement (Fig.16D).
- Mettre les tubes au bain marie à 30°C pendant 30 min (Fig. 16E).
- Lecture spectrophotométrique avec une longueur d'onde de 485 nm en utilisant le glucose 1% comme étalon (Fig. 16F).

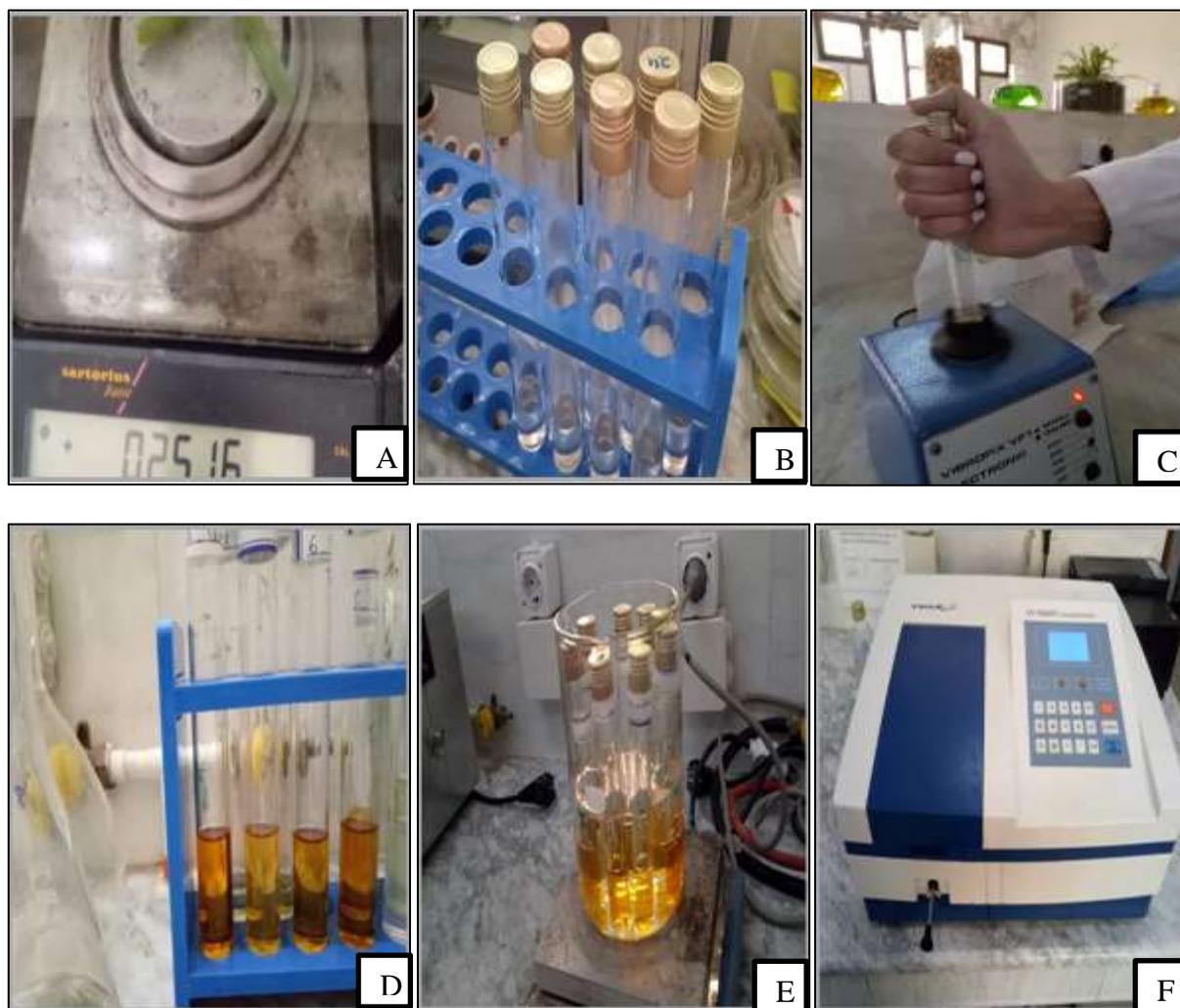


Figure 16 : Dosage de la teneur en sucre.

5 Préparation des échantillons pour effectuer des coupes au microtome

5.1 Fixation des échantillons

7 jours après l'application des traitements, on a prélevé des morceaux de 1,5 à 2 cm des tiges et des racines pour chaque traitement. Ces échantillons ont été fixés, par la suite, dans 5ml d'une solution de fixation qui contient 17V d'éthanol, 3V de formol et 1V d'acide acétique (Fig. 17A et B).

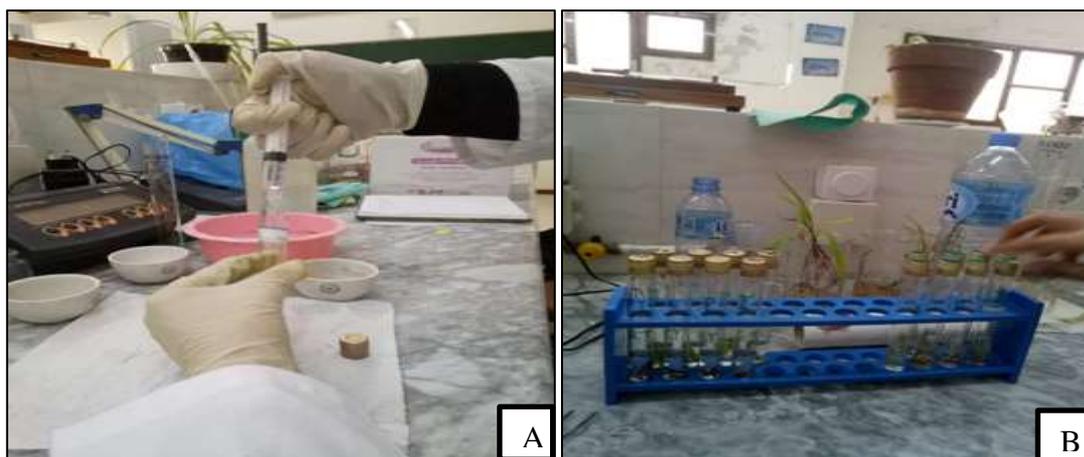


Figure 17 : Fixation des échantillons

5.2 Rinçage des échantillons

Les tubes contenant les échantillons de la solution de fixation ont été débarrassés puis ont été couverts par un tissu perméable (**Fig. 18A**). Par la suite, ces tubes ont été mis dans un récipient plein de l'eau courante pendant un temps équivalent à celui de la fixation pour assurer un rinçage approfondi des échantillons (**Fig. 18B**).

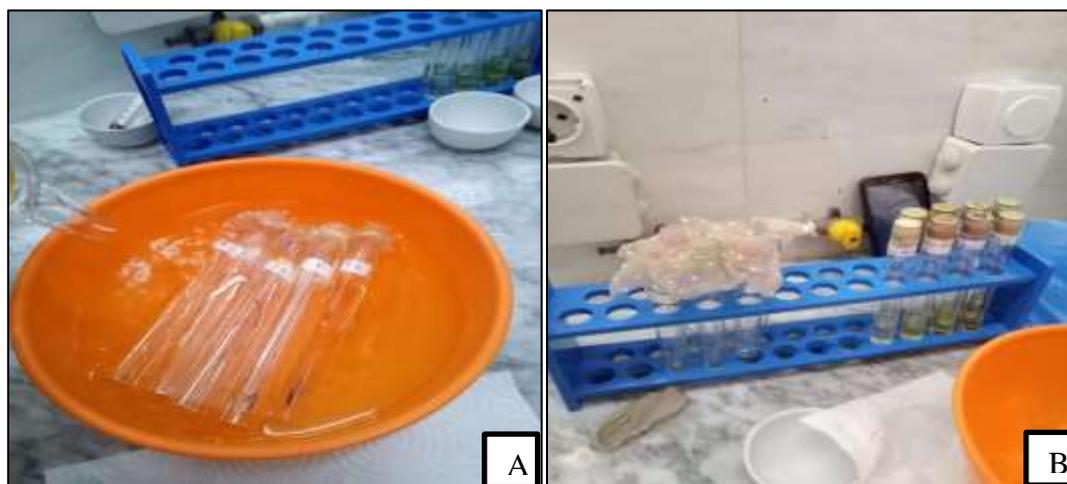


Figure 18 : Rinçage des échantillons

5.3 Déshydratation des échantillons

La déshydratation des échantillons a été établie par un passage progressif des échantillons dans des bains d'éthanol à des concentrations de 70% (**Fig. 19A**) et de 100% pendant 1h (**Fig. 19B**).

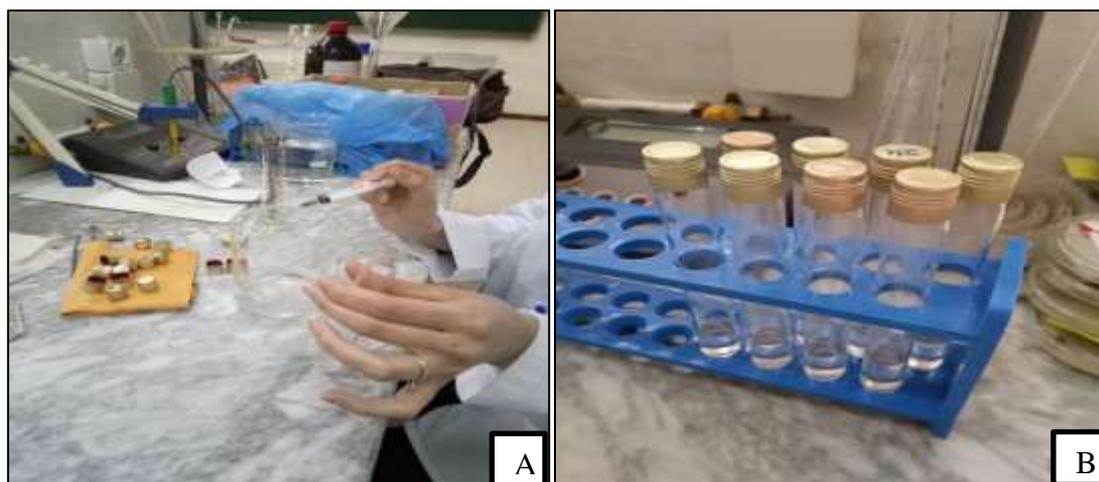


Figure 19 : Déshydratation des échantillons

5.4 L'imprégnation

Cette étape a été effectuée par la préparation d'une solution contenant 50ml de toluène et 50ml de paraffine fondue à une température de 60°C (**Fig. 20A**). Les échantillons sont transmis dans des capsules puis inondés par la solution préparée et installés dans une étuve à 60°C pendant 3h (**Fig. 20B**).



Figure 20 : L'imprégnation

5.5 L'inclusion

L'inclusion a été réalisée par la solidification des échantillons dans de la paraffine pure et les remettre dans l'étuve pendant 4h à la même température de fusion de la paraffine (**Fig. 21A**). Le remplissage des blocs déposés sur une surface en verre par la paraffine puis l'ajout des échantillons de façon latérale et transversale avant que la paraffine se solidifie ce qui permet de les faire couper par un microtome (**Fig. 21B**).



Figure 21 : L'inclusion

6 La réalisation des coupes histologiques par le microtome

6.1 Le découpage

Les blocs de paraffine solidifiés, contenant les échantillons ont été coupés par un microtome Leica. Tout d'abord on a commencé par la fixation d'un bloc sur un manche porte-bloc verticalement en le chauffant à une plaque chauffante, puis on le refroidissant dans un bain d'eau. (Fig. 22A)

Après la fixation du porte-bloc au microtome, la réalisation des coupes se fait à l'aide d'une lame spéciale fine et tranchante. Des coupes de section de 2 à 5 μm sont disposées sous forme de rubans puis étalées sur des lames dégraissées auparavant, puis collées par une solution de gélatine (1%). (Fig. 22 B)

Les lames ont été séchées, par la suite, en les disposant sur une plaque chauffante à 40°C pendant 15-30 secondes.

Le déparaffinage des lames a été réalisé par trempage dans trois bains de toluène de 5 min pour chacun. Puis les laisser sécher pendant 24h.

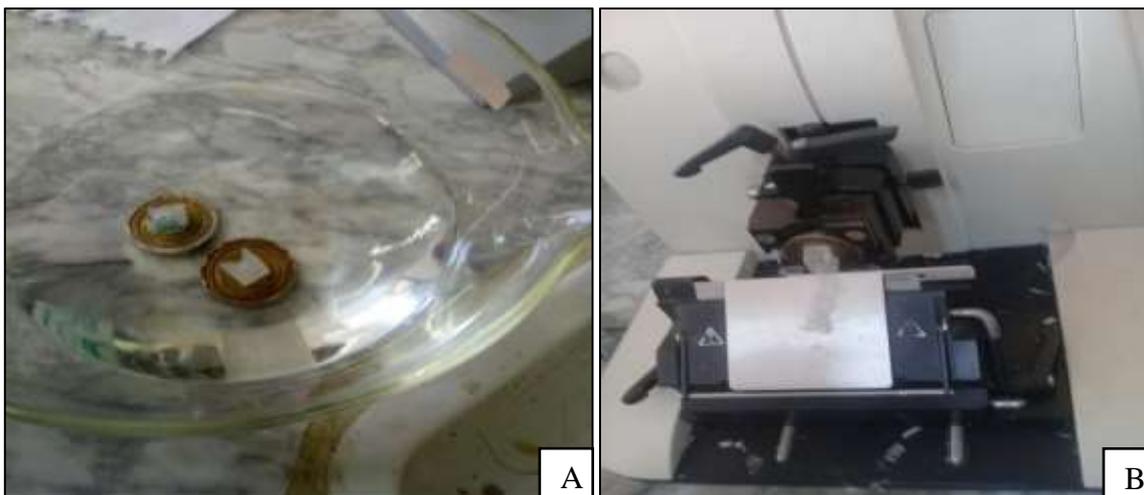


Figure 22 : Le découpage

6.2 La double coloration

Les coupes obtenues sont colorées par un mélange de rouge Congo et vert d'iode. Après un séchage de 24h, les coupes sont surmontées d'une goutte de baume de Canada et couvertes par une lamelle. (Fig. 23 A et B)

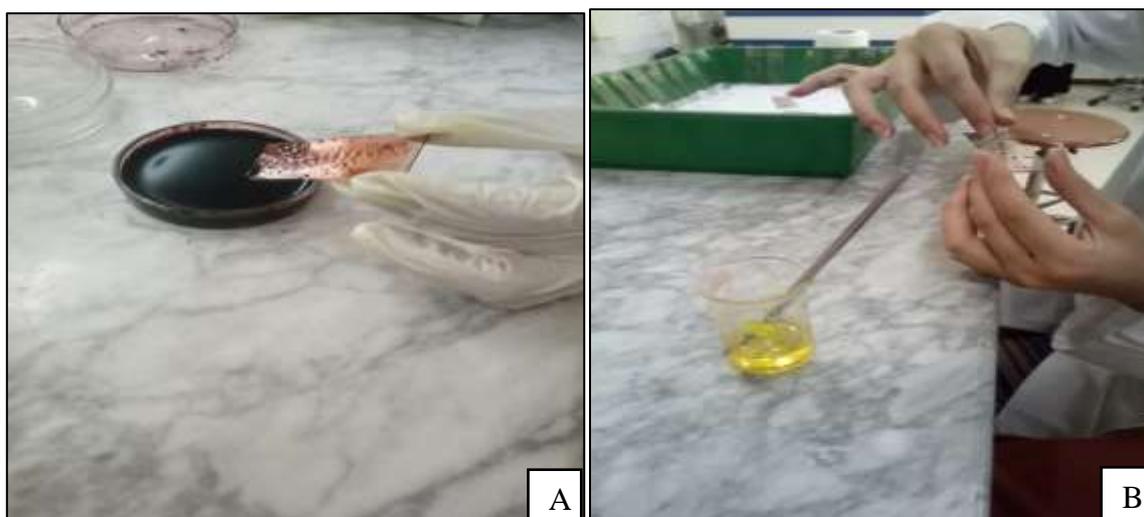


Figure 23 : La double coloration

7 Réalisation des coupes à main levée

7.1 Le découpage

Il est réalisé sur des racines qui sont tenus verticalement et des coupes très fines transversales et latérales sont réalisées à l'aide d'une lame tranchante, puis mises dans de l'eau de javel pendant 20 minutes, Rincées puis mises dans un bain d'acide acétique pendant 1 minute et rincées une dernière fois (**Fig24 A**).

7.2 La double coloration

Les coupes sont transmis dans le vert d'iode pendant 8 minutes puis dans du rouge Congo pendant 13 minutes avec un rinçage après chaque coloration pour éliminer le surplus de colorant (**Fig24 B**).

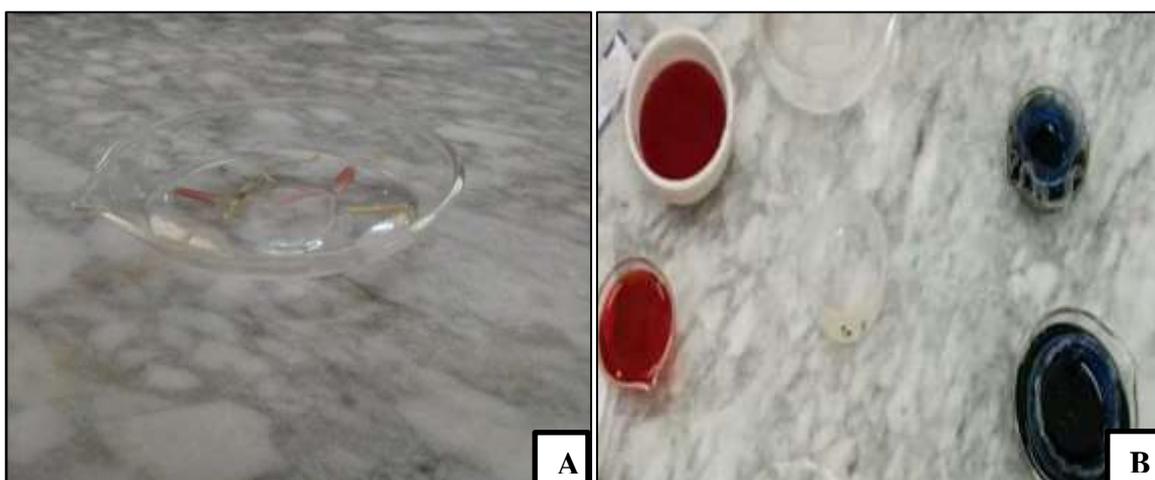


Figure 24 : Réalisation des coupes à main levée

8 L'observation

Les observations sont réalisées à l'aide d'un microscope optique doté d'un micromètre oculaire où les mesures effectuées visent principalement la structure et le diamètre des vaisseaux conducteurs et du parenchyme. (Fig. 25 A et B)



Figure 25 : Observation des coupes histologiques

9 L'analyse statistique

L'analyse de la variance est effectuée à l'aide du logiciel STATGRAPHICS centurion XV (version 15.2.05). Cette analyse est complétée par le test de LSD de Fisher pour la comparaison des moyennes réalisées à l'aide du logiciel STATGRAPHICS.

Les résultats obtenus sont présentés sous formes de graphes grâce au logiciel EXCEL et dans lesquels sont présentés les groupes homogènes sous forme des lettres. Cette analyse illustre les observations de la dernière semaine (**AnnexesII**).

Résultats et interprétations

1 Effet des traitements sur la croissance du maïs

Cette partie dans notre travail, a pour but de vérifier et de confirmer l'effet des traitements par la souche Bt04 (PGPR), par l'inhibiteur d'auxine (1-NOA) et par la combinaison (Bt04 + 1-NOA) sur la croissance et le développement des plantules de maïs (*Zea mays*) âgées de 12 jours.

1.2 Longueur de la partie racinaire

Les résultats obtenus montrent que les traitements affectent de manière significative la longueur des racines de maïs. Après 12 jours de l'application des traitements, les valeurs les plus élevées ont été obtenues par les traitements PGPR+ 1-NOA et PGPR qui ont montré des longueurs de 13,28 et 12,3, respectivement. Alors que, le traitement d'inhibiteur d'auxine a donné une longueur inférieure à celle du témoin (**Fig.26**).

L'analyse de la variance à la fin de la culture a révélé un effet significatif des traitements sur la longueur des racines (**Annexe II**).

Le test LSD de Fisher a montré l'existence de deux groupes homogènes dont les traitements PGPR+1-NOA et PGPR représentent le groupe A (**Annexe II**).

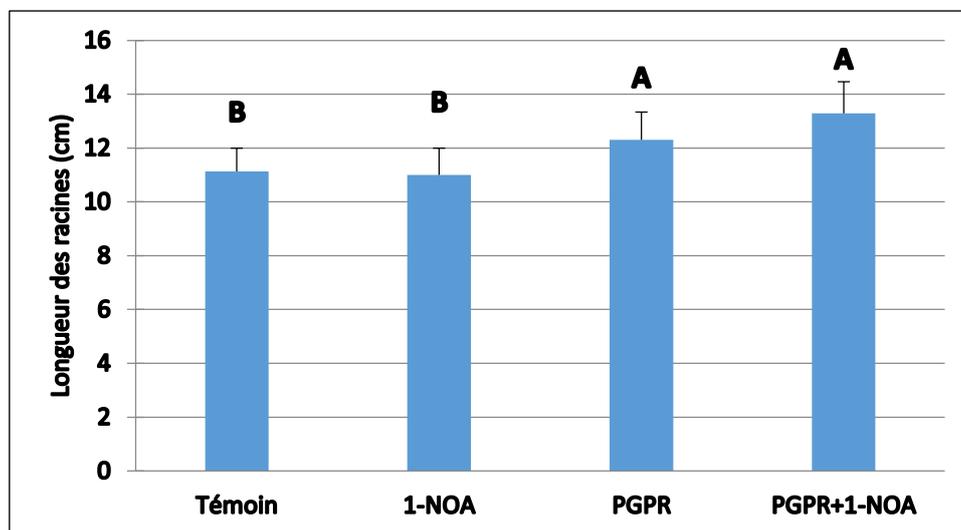


Figure 26: Longueur de la racine du *Zea mays* après l'application des traitements

1.3 Longueur de la partie aérienne

Les traitements ont affectée de manière significative la hauteur de la partie aérienne du maïs par rapport au témoin. La valeur la plus élevée a été obtenue par le traitement PGPR+1-

NOA qui a augmenté la longueur de la partie aérienne de la plante de 11,75% par rapport au témoin. Cependant, les traitements PGPR et 1-NOA ont enregistré des valeurs inférieures à celle du témoin (**Fig.27**).

L'analyse de la variance à la fin de la culture a révélé un effet significatif des traitements sur la longueur de la partie aérienne (**Annexe III**).

Le test LSD de Fisher a montré l'existence de deux groupes homogènes (**Annexe III**).

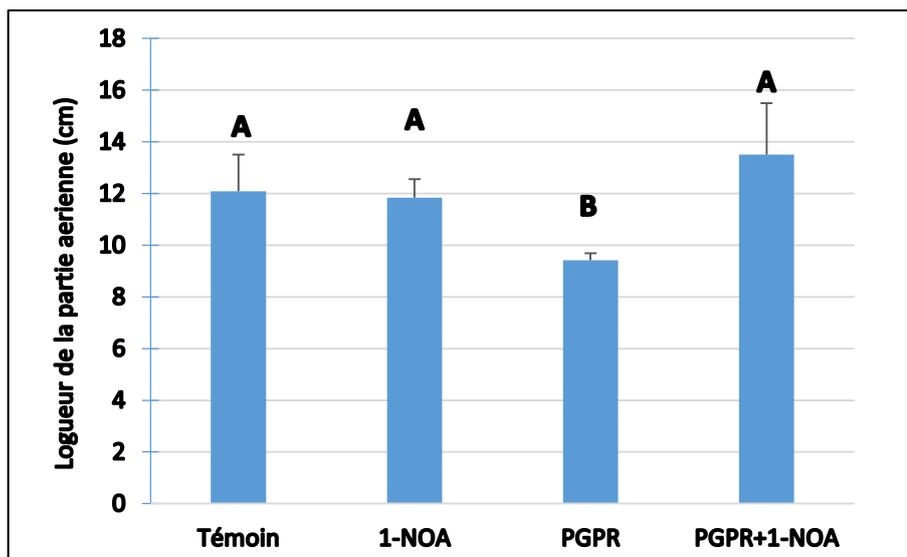


Figure 27: Longueur de la partie aérienne du *maïs* après l'application des traitements

1.4 Nombre moyen de racines secondaires

La figure 28 montre que le nombre moyen de racines secondaires par traitement, après 12 jours de culture, est presque le même pour le traitement (PGPR+1-NOA) et le témoin avec un nombre moyen de 7 et 8, respectivement. Alors que les traitements PGPR et 1-NOA ont présenté un nombre moyen de 5 pour les deux (**Fig.28**).

L'analyse de la variance à la fin de la culture a révélé un effet très hautement significatif des traitements sur la longueur de la partie aérienne (**Annexe IV**).

Le test LSD de Fisher a montré l'existence de trois groupes homogènes (**Annexe IV**).

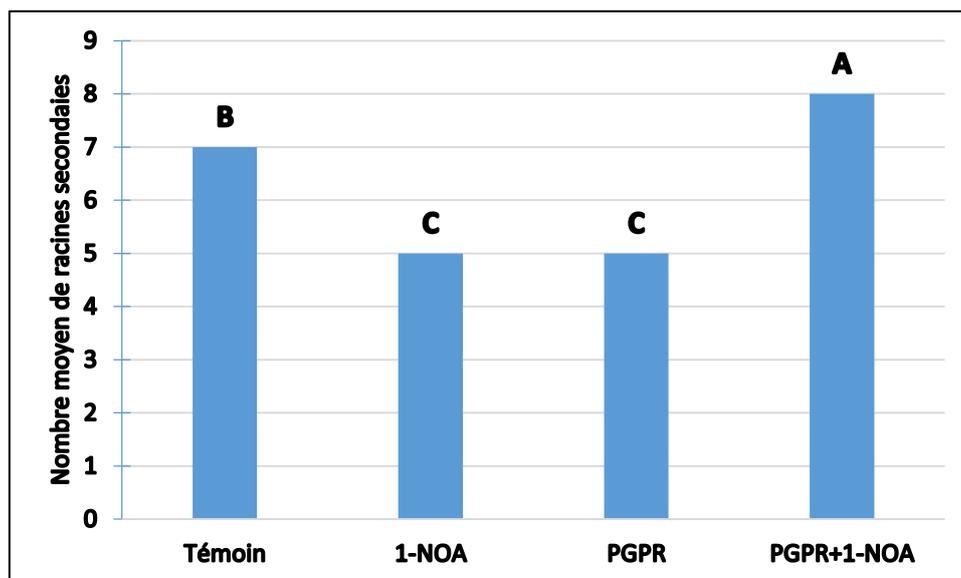


Figure 28 : Nombre moyen de racines secondaires du maïs après l'application des traitements

2 Effet des traitements sur la teneur en sucre

- Dans la partie aérienne

D'après la figure 29 on remarque que la valeur la plus élevée, de la teneur en sucres totaux, est notée chez le traitement '1-NOA', avec une valeur de 1.21 mg/ml. Suivie par le témoin avec des valeurs de 0,75 mg/ml.

- Dans la partie racinaire

La comparaison des teneurs en sucres obtenues entre les différents traitements étudiés a montré que le taux du sucre augmente chez les traitements '1-NOA', PGPR et PGPR+1-NOA par rapport au témoin. Avec des teneurs enregistrés de 0,85 mg/ml, 0,75 mg/ml et 0,60 mg/ml, respectivement (**Fig. 29**).

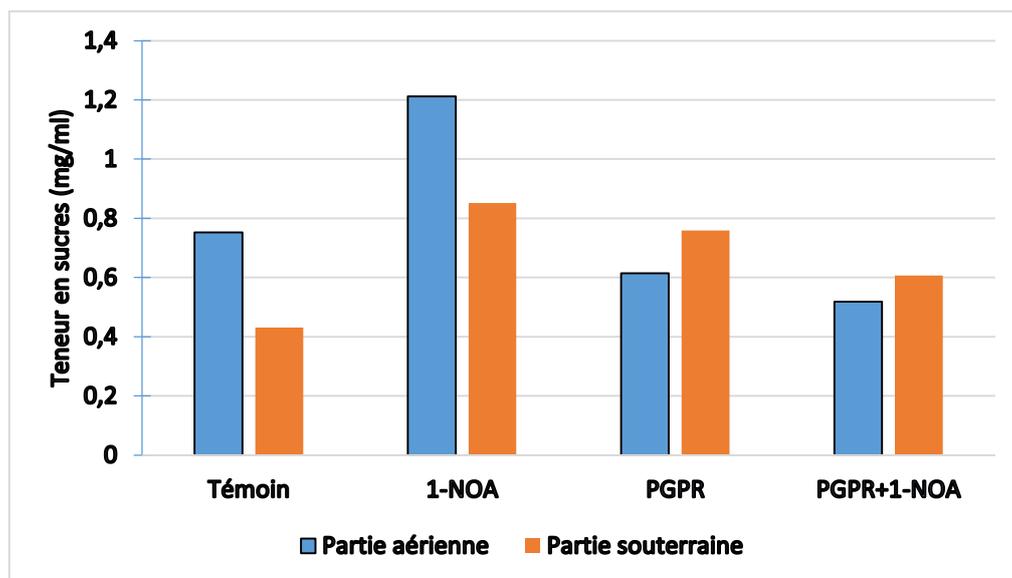


Figure 29 : Effet des traitements sur la teneur en sucre, dans les feuilles et les racines

3 Etude anatomique des tiges du maïs

L'étude anatomique des tiges du *Zea Mays* L, sous le microscope optique, a permis de distinguer deux parties, l'écorce et le cylindre central.:

3.1 L'écorce :

- **L'épiderme (Tissu de revêtement)** : L'épiderme constitue la couche de cellules la plus externe recouvrant la plante, son importance pour la protection des tissus internes.
- **Le parenchyme (Tissu fondamental)** : est constitué des cellules à parois minces habituellement celluloses, méatiques, disposées d'une manière anarchique. (DESTOVER, 2003).
- **Sclérenchyme (Tissus de soutien)** : Est un tissu soutien primaire forme de cellules mortes, à paroi secondaire entièrement lignifiée. Il assure la protection mécanique du végétal contre les agressions par les grains de sable, il est bien développé qui se colore en vert (par le vert d'iode)

3.2 Le cylindre central : On distingue les tissus conducteurs et le parenchyme médullaire

- **Le Xylème** : il conduit la sève brute, contenant l'eau et les sels minéraux puisés dans le sol par les racines au niveau de l'assise pilifère, vers les feuilles.

- **Le phloème:** Le phloème, ou liber, conduit la sève élaborée, solution de substances organiques riches en glucides, des feuilles vers les autres organes.
- **La moelle** (parenchyme médullaire) : des cellules arrondies occupant le centre de la tige avec la présence de méats bien visibles - **Rayon médullaire** : C'est un ensemble des cellules situés entre les faisceaux conducteurs.

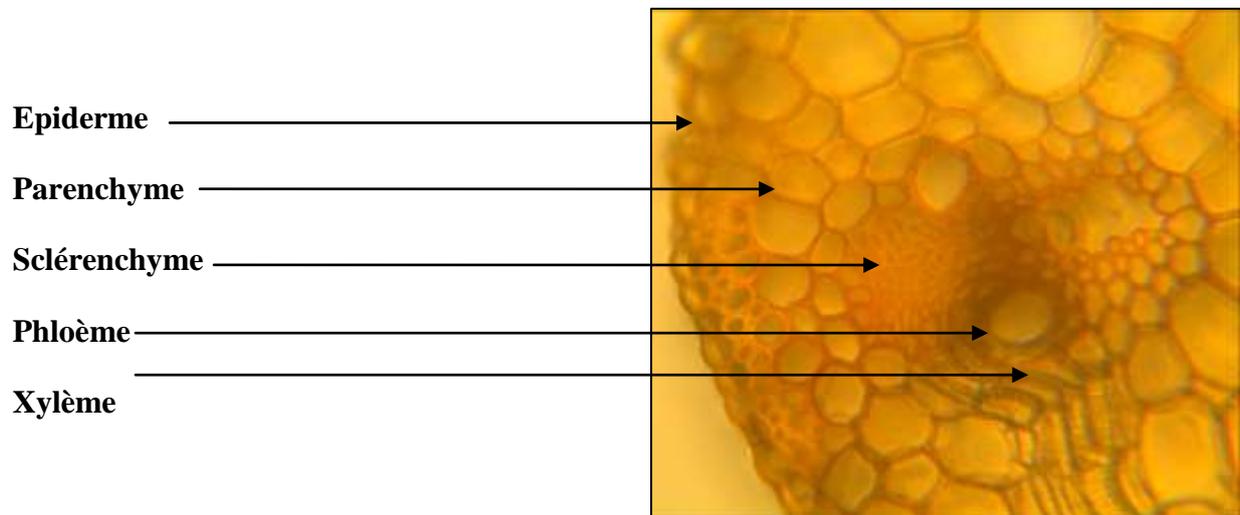


Figure 30 : Coupe histologique de la tige de plantule de *Zea mays* (grossissement 10x10)

4 Etude anatomique des racines de *Zea mays*

Sous le microscope optique, nous avons remarqué une symétrie axiale. On peut distinguer deux parties, l'écorce et le cylindre central.

4.1 L'écorce :

- **Les poils absorbants** : ou poils racinaires sont des cellules différenciées de l'assise pilifère d'une racine et qui consistent les principaux sites d'absorption d'eau et de sels minéraux.
- **Rhizoderme** : ou assise pilifère, est le tissu superficiel primaire des racines d'une plante, équivalent de l'épiderme des parties aériennes.
- **Le parenchyme cortical** : est constitué des cellules à parois minces habituellement cellulodiques, méatiques, disposées d'une manière anarchique, ce tissu est coloré en rose. (DESTOVER, 2003).

4.2 Le cylindre central :

On distingue les tissus conducteurs et le parenchyme médullaire :

- **Le Xylème** : Le xylème conduit la sève brute, liquide contenant l'eau et les sels minéraux puisés dans le sol par les racines au niveau de l'assise pilifère, vers les feuilles où s'effectue la photosynthèse.

- **Le phloème** : Le phloème, ou liber, conduit la sève élaborée, solution de substances organiques riches en glucides, des feuilles vers les autres organes.

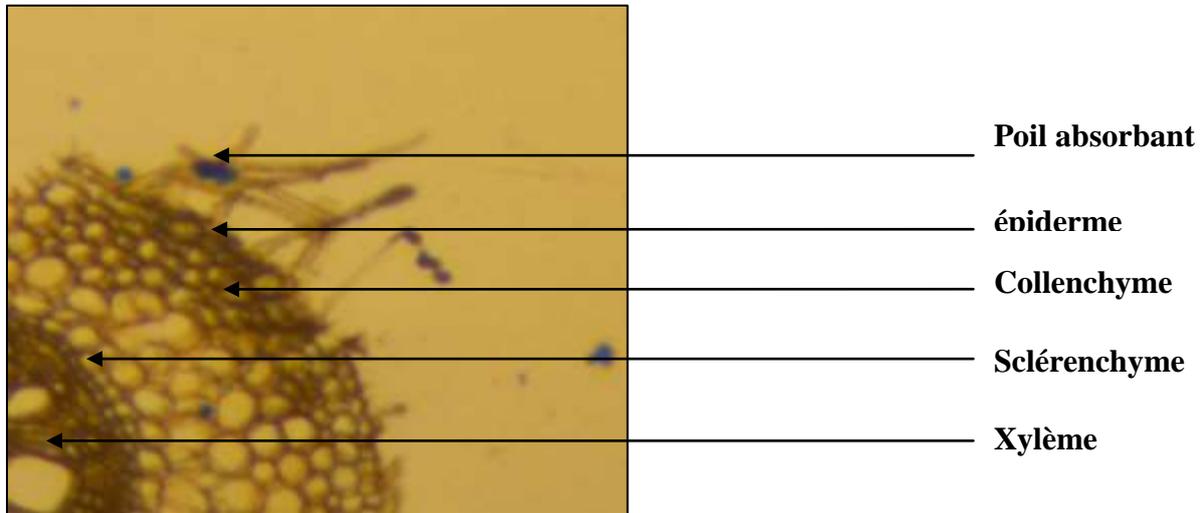


Figure 31 : Coupe histologique de la racine de plantule de *Zea mays* (grossissement 10x10)

5 Effet des traitements sur la formation des tissus du maïs

Cette partie de notre travail a pour but de vérifier l'effet des traitements appliqués sur la formation histologiques (surtout les tissus conducteurs) dans les racines et les tiges du maïs

5.1 Dans les racines

La figure 32 montre l'aspect des tissus conducteurs, après application des traitements par PGPR par inhibiteur d'auxine 1-NOA. Les cellules sont claires et bien structurées, dans le premier traitement. Cependant, dans le deuxième traitement, les tissus ne sont pas clairs, ils ont subi une déformation partielle

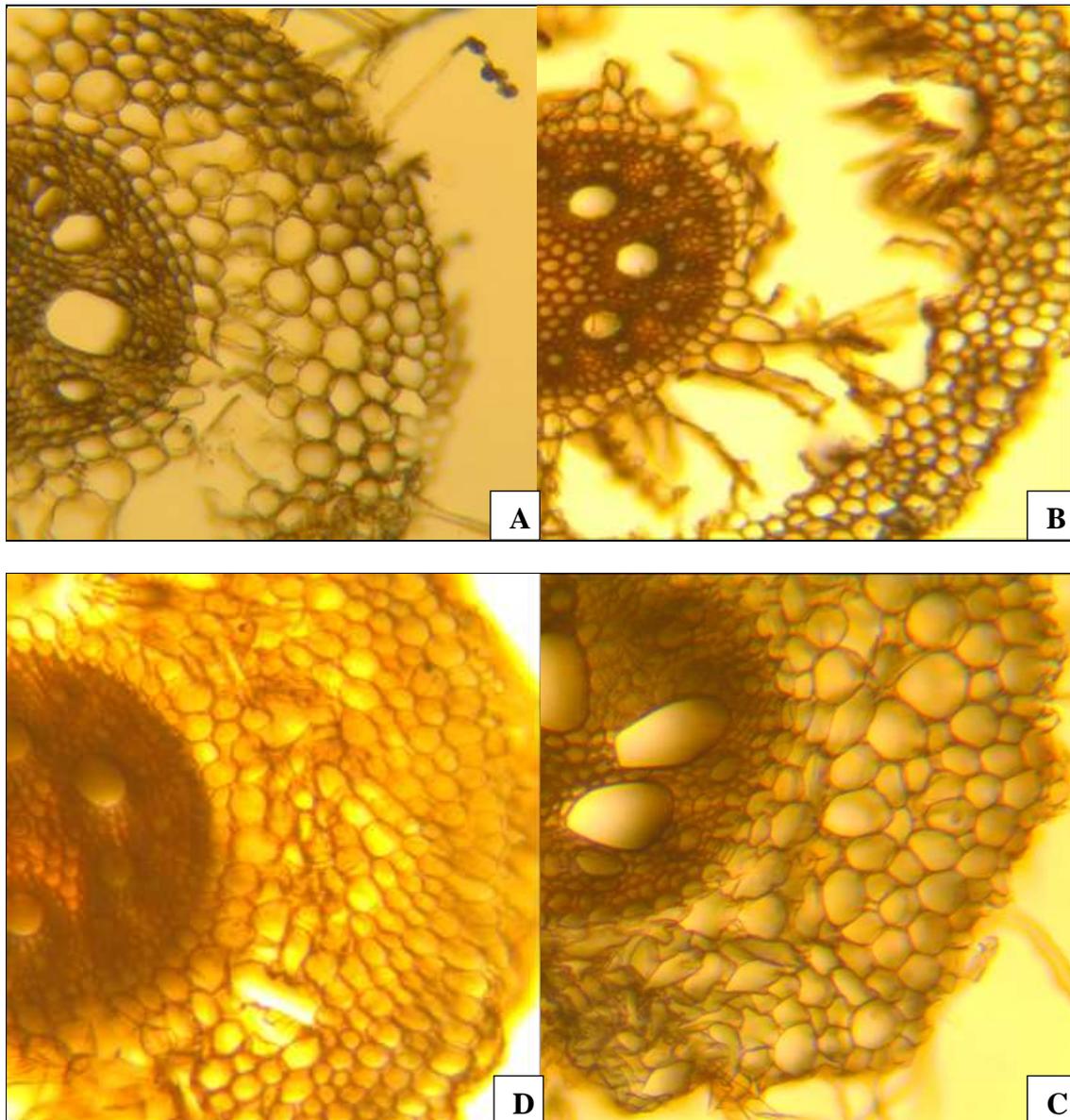


Figure 32 : Coupe histologique des vaisseaux conducteurs des racines de *Zea mays* (G 10x10) ; traitées par (A) : PGPR ; (B) : inhibiteur 1-NOA;(C) : PGPR+1-NOA ; (D) : non traitées

5.2 Dans les tiges

Les résultats obtenus ont montré que les traitements ont significativement affecté la structure et la formation des tissus dans la tige de la plante. Le traitement PGPR a permis d'améliorer la structure des vaisseaux conducteurs. Cependant, l'application de l'inhibiteur d'auxine 1-NOA a donné des tissus non clairs et déformés et de petite taille, par rapport au témoin ou bien aux autres traitements (**Fig. 33**).

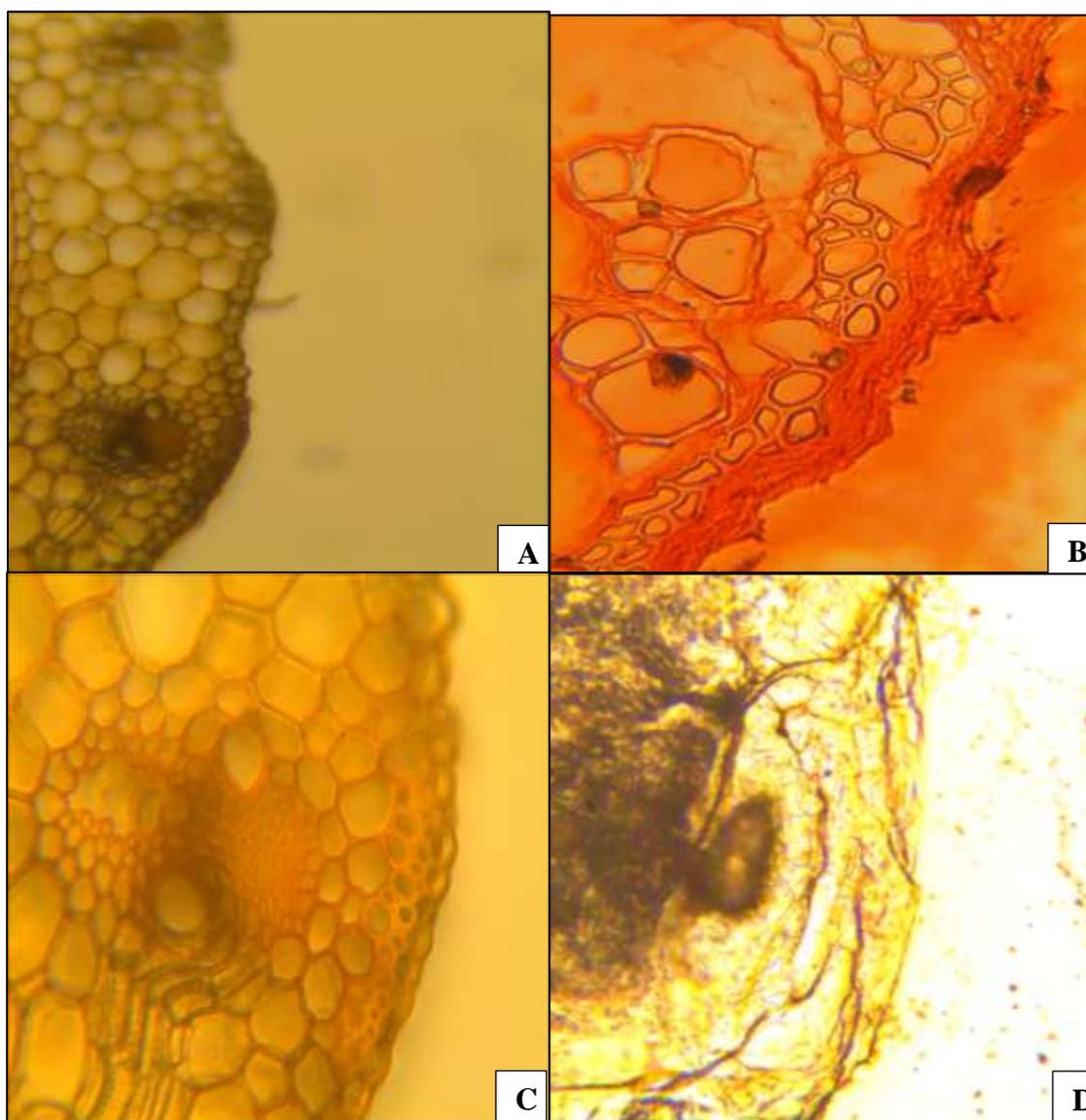


Figure 33 : Coupe histologique des vaisseaux conducteurs de la tige de *Zea mays* (G 10x40) ; (A) : Témoin ; (B) traitement par PGPR ; (C) traitement par inhibiteur 1-NOA (D) traitement par 1-NOA+PGPR

6 Effet des traitements sur l'histométrie de *Zea mays*

Pour l'ensemble des traitements étudiés, des mesuré de l'épaisseur, à l'aide d'un micromètre, de quelques tissus observés (on a basé sur les tissus conducteurs), au niveau de la tige et la racine de *Zea mays*, à différents grossissements. 3 répétitions ont été faite pour chaque tissu à chaque traitement. Les résultats obtenus sont mentionnées dans les tableaux suivants :

Tableau 01 : Les mesures des tissus des racines du maïs pour les quatre traitements (coupes transversales) en μm :

	Epiderme	parenchyme	Cylindre central	Ecorce	Tissus conducteurs
Témoin	16.1562	242 ,633	403,0955	326 ,245	35 ,471
1-NOA	16,88	203,839	340,1625	237,35	16,88
PGPR	20,304	268,511	433.034	333,911	91,353
1-NOA + PGPR	20,9385	314,587	431,836	351,231	92,0918

7 Interprétation des résultats

7.1 Histogrammes

Une comparaison histométrique entre les tissus d'étude a été réalisée à l'aide d'un histogramme pour chaque traitement :

7.1.1 Au niveau des racines :

Les mesures réalisées ont montré que les traitements ont une influence significative sur la taille et le diamètre de quelques tissus, dans les racines de la plante. La comparaison de diamètre du parenchyme entre le traitement PGPR et le traitement (1-NOA + PGPR), montre que cette dernière a permis d'obtenir des cellules plus grandes et bien formées par rapport au traitement PGPR. De même, les vaisseaux conducteurs (Xylème et phloème).

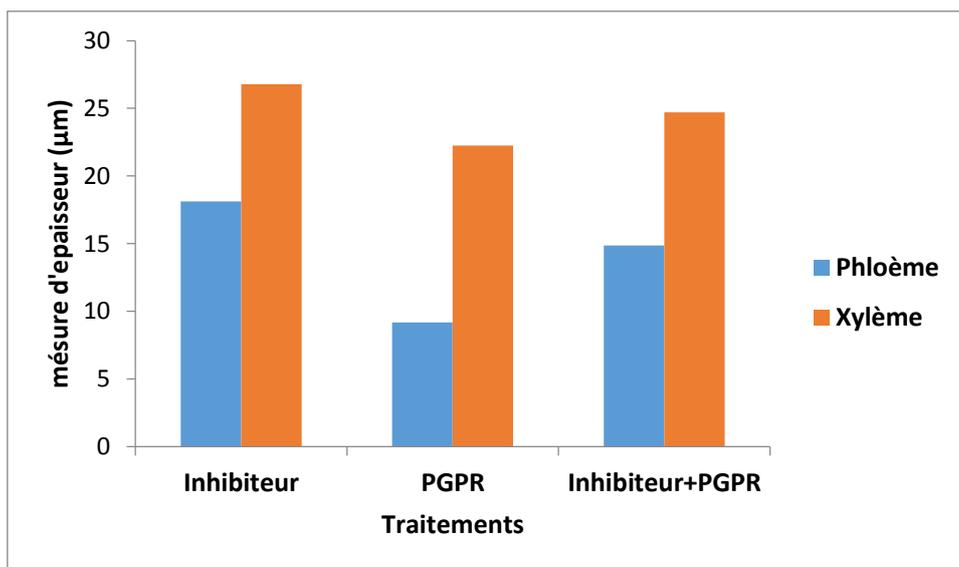


Figure 34 : Comparaison histométrique entre xylème et phloème des racines des différents traitements de *Zea mays*

7.1.2 Au niveau des tiges :

De même que dans les racines, dans les tiges les mesures réalisées ont montré que les traitements ont une influence significative sur la taille et le diamètre de quelques tissus. La comparaison de diamètre du parenchyme entre le traitement PGPR et le traitement (1-NOA + PGPR), montre que cette dernière a permis d’obtenir des cellules plus grandes et bien formées par rapport au traitement PGPR. De même, les vaisseaux conducteurs (Xylème et Phloème).

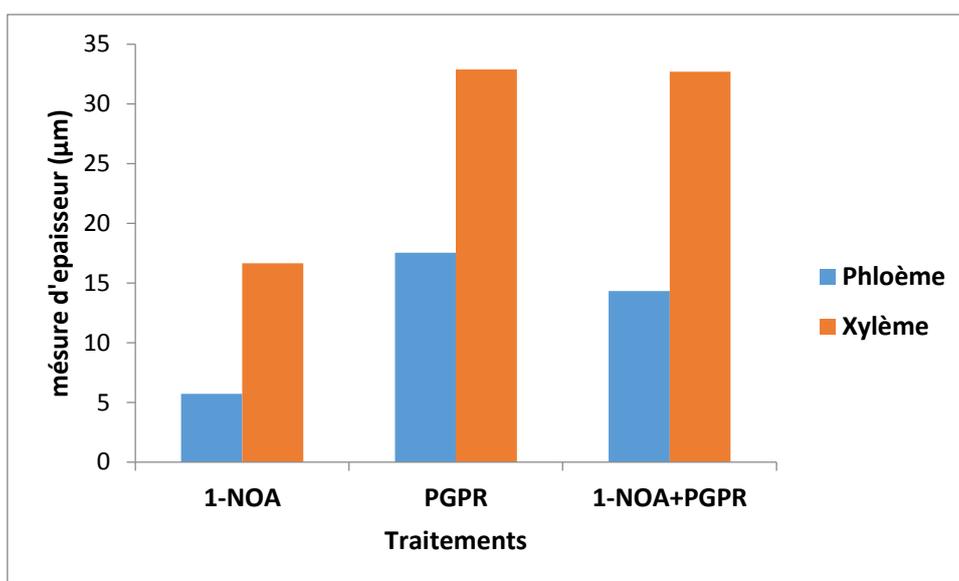


Figure 35 : Comparaison histométrique entre xylème et phloème des tiges des différents traitements de *Zea mays*

Discussion

Discussion

L'auxine est considérée comme la principale hormone retrouvée dans tous les clades végétaux (Cooke *et al.*, 2002). Le rôle de cette hormone est très difficile à étudier à cause de son action pleiotropique. En effet, si l'on agit sur un gène, ou sur l'activité d'une protéine intervenant dans la voie de biosynthèse ou la voie de signalisation, c'est le phénotype de toute la plante qui est affecté. L'auxine est présente dans tous les tissus de la plante, et induit des réponses spécifiques qui apparaissent différentes (grandissement, division, différenciation cellulaire), mais qui à terme, promouvait toujours la croissance et le développement des organes de la plante.

Au cours du développement de la plante, le principal lieu de synthèse de l'AIA est situé au niveau de l'apex caulinaire, où elle détermine la division de ces cellules. Son accumulation localisée détermine l'emplacement du primordium d'organe, définissant ainsi la formation et l'emplacement des organes latéraux. L'auxine fait ensuite l'objet d'un transport polarisé de l'apex vers les racines induisant, lors de son cheminement, l'élongation des tiges et des racines jeunes.

En outre, Le maïs (*Zea mays*), comme étant la 2^{ème} plante utilisée dans les recherches scientifiques après *Arabidopsis thaliana*, elle est très recommandée pour l'étude des interactions plantes-microbiome, y'a compris les PGPR (Adjanohoun *et al.* 2011).

Notre expérimentation a montré qu'après l'inoculation des jeunes plantules par la souche Bt04 et même pour la combinaison entre cette souche et l'inhibiteur d'auxine 1-NOA, des améliorations significatives de la longueur moyenne des racines, du nombre moyen des racines, de la longueur moyenne de la partie aérienne et de la masse fraîche des plantes ont été enregistrées. La promotion de la croissance des plantes pourrait être le résultat des fonctions bénéfiques de la souche appliquée, majoritairement la production d'hormone de croissance végétale telle l'auxine qui est un moyen majeur d'atteindre la promotion de la croissance (Deepa *et al.* 2010).

Nos résultats rejoignent ceux de Noumavo *et al.* (2013) qui a confirmé l'effet promoteur des rhizobactéries (*P. fluorescens*, *P. putida*) sur la germination et la croissance des plantes de maïs dans un essai *in vitro*. En revanche, El Zemrany *et al.* (2007) montrent que l'augmentation en biomasse des racines de maïs inoculées par *Azospirillum lipoferum* CRT1 est due à la longueur supérieure des racines et au nombre plus élevé de radicules, ce qui entraîne une ramification beaucoup plus importante. Par conséquent, les racines avaient

Discussion

une surface plus large pour interagir avec les particules du sol, l'eau et les microorganismes et réciproquement produisent plus d'exsudats que le témoin (Groleau-Renaud *et al.*, 1998). Cette hypothèse a été confirmée par Boruah *et al.* (2003) qui ont montré que les racines de *Phaseolus vulgaris* inoculées par des souches de *Pseudomonas* avaient plus de racines latérales, une longueur racinaire plus importante et une biomasse racinaire plus grande.

Par ailleurs, l'application de l'1-NOA a montré un déséquilibre dans la croissance des plantules de maïs. Pour la majorité des paramètres étudiés, ce traitement, a présenté des résultats inférieurs par rapport aux autres traitements. Le résultat obtenu va dans le même sens avec plusieurs travaux car cette substance a été largement utilisée comme anti-auxine (Jodinskienė et Anisimovienė, 2007; Laňková *et al.*, 2010; Parry *et al.*, 2001; Zhao et Hasenstein, 2010). Imhoff *et al.* (2000) ont examiné la capacité de l'1-NOA d'inhiber les transporteurs d'efflux d'auxine à des concentrations micromolaires sur des cellules de tabac cultivées en suspension, les résultats obtenus ont montré l'effet de cette molécule sur le transport d'auxine. D'après Yang *et al.* (2006), cette substance réduit les effets de l'AIA sur la croissance des racines tout en bloquant la formation des tissus internes et conducteurs surtout, par conséquent les éléments nutritifs transportés par la sève brute et la sève élaborée ne peuvent atteindre leurs destinations, ce qui provoque des perturbations et parfois des arrêts de croissance et de développement de l'organisme. Ce qui nous mène à notre troisième révélation, concernant l'application du troisième traitement

Comme déjà mentionné précédemment, le taux de croissance des racines de plantes inoculées par la souche Bt04 seule est supérieur à celle du témoin. Cependant, l'application de l'inhibiteur 1-NOA en présence de Bt04 (PGPR+1-NOA) a permis d'obtenir des racines plus longues, nombreuses et une longueur de tige plus élevée par rapport au témoin et aux autres étaiements.

Selon Zerrouk *et al.* (2017) le 1-NOA est un inhibiteur des phytohormones, qui peut agir sur l'AIA produit par la souche Bt04, pour donner un effet stimulateur de la croissance des racines. Le même phénomène a été constaté par Yang *et al.* 2006. Ainsi, Street (1954) et Burstrom (1955) qui ont démontré que l'effet de l'1-NOA pourrait s'opposer à certains inhibiteurs tels le 1-NAA et le 2-NOA sur les racines, en présence d'autres phytohormones. Yang *et al.* (2006) ont également constaté que, à certaines concentrations, l'1-NOA devient en antagonisme avec le 2-NOA. D'autre part, plusieurs chercheurs considèrent le 1-NOA comme étant une auxine faible plutôt qu'une anti-auxine stricte (Zerrouk *et al.* (2017). Selon Mattsson, et Berleth, (1999), l'effet de l'1-NOA varie en fonction de conditions de

Discussion

l'environnement et selon l'équilibre et la sécrétion hormonal de la plante. En outre, plusieurs hypothèses suggèrent qu'il possède une double activité, l'une améliore la croissance des tissus dépourvus d'auxine naturelle, donc il occupe certains sites d'auxine, et l'autre réduit la stimulation et provoque des effets d'inhibition de croissance, cette hypothèse a été confirmée par Aberg (1952) et par Audus et Das (1955).

Cependant, la teneur en sucres a augmenté avec les traitements par inhibiteur (1-NOA) et par la combinaison (PGPR+1-NOA) et a diminué avec la souche Bt04. Il est évident que les différentes espèces de PGPR diffèrent quant au type de bienfaits qu'elles confèrent à la croissance et au développement des plantes (Ekanayake *et al.* 1994). *B. subtilis* et *P. fluorescens* ont considérablement augmenté les masses sèches et fraîches de racines et de feuilles, les pigments photosynthétiques, les acides aminés libres totaux et les teneurs en sucres des plants de radis cultivés sous stress de salinité par rapport aux plants non inoculés (Mohamed et Gomaa. 2012). La croissance des plantes et leurs activités métaboliques sont basées sur la photosynthèse, un processus dans lequel les feuilles modifient une partie du carbone atmosphérique absorbé en utilisant l'azote du sol. Par conséquent, les plantes produisent des glucides, métabolites essentiels à la nutrition du PGPR (Griffith 1975; Schübler *et al.* 2006). Plusieurs facteurs sont impliqués dans le contrôle de la photosynthèse, et la synthèse des sucres notamment les stimuli environnementaux et les signaux endogènes (Rolland *et al.* 2006).

Sur le plan histologique chaque milieu appliqué affecte la plante d'une manière distincte, la souche Bt04 affecte la largeur des tissus particulièrement les tissus conducteurs xylème et phloème dans la partie souterraine, ce qui a permis une meilleure absorption des nutriments du sol ainsi qu'une meilleure conduction de la sève brute et élaborée ce qui accentue et accélère la photosynthèse et augmente les dimensions des tissus de la partie aérienne. Par contre, l'inhibiteur bloque la formation du parenchyme médullaire ainsi que du xylème et phloème où les cellules ont un diamètre très réduit par rapport aux autres traitements, surtout si on le compare avec le traitement (PGPR+1-NOA) qui révèle une structure morphologique impressionnante, les tissus conducteurs d'un large diamètre avec un aspect légèrement déformé et cet effet est plus prononcé dans la partie racinaire. Selon, Kant *et al.* (2009), le manque d'expression d'auxine chez le Riz a entraîné une croissance plus faible des pousses et des racines, une morphologie altérée et des tissus vasculaires plus petits. Un niveau optimal d'auxine est requis pour plusieurs aspects des processus de croissance et de développement des plantes, notamment la division, la différenciation et l'élongation

Discussion

cellulaires, le développement vasculaire, l'architecture des racines et des pousses et la structuration des organes (Teale *et al.*, 2006). Les effets morphologiques typiques de la TIBA « un inhibiteur d'auxine » sur des plants de soja âgés de 31 jours ont été signalés, tels que le raccourcissement des entre-nœuds, la perte de dominance apicale, l'épinastie des jeunes feuilles et l'abscission prématurée des feuilles apicales et des bourgeons (Galston, 1947). En outre, Shimamura *et al.* (2016), ont trouvé que l'application du 1-NOA, n'a pas limité de manière significative le développement de l'aérenchyme chez le Riz. Ceci suggère que ces anti-auxines sont des régulateurs non négatifs du processus de formation d'un aérenchyme secondaire.

Par ailleurs, Les effets de PGPR sur la croissance des plantes résultent principalement des modifications morphologiques et physiologiques des racines de plantes inoculées et de leurs fonctions, ainsi que de l'amélioration de l'absorption d'eau et de minéraux (Sarig *et al.*, 1988). La surface et la longueur des racines ont été augmentées en raison de l'inoculation d'*Azospirillum* (Okon et Kapulnik, 1986). L'inoculation avec la PGPR a favorisé la division cellulaire de la racine du blé (Levanony et Bashan, 1989), a augmenté le diamètre et la longueur des racines latérales du maïs et a favorisé le développement des poils absorbants et des vaisseaux conducteurs (Kapulnik et Okon, 1983).). Chez le bananier, l'amélioration du système racinaire est un critère important pour un meilleur ancrage, une croissance plus rapide et un meilleur rendement fruitier (Blomme, 2000).

Enfin, les inhibiteurs spécifiques du transport d'auxine sont des outils très importants pour les études physiologiques et développementales des cellules et des tissus et les PGPR sont aussi des organismes qui s'impliquent dans l'interaction plante-microbiome. Cependant, chez les plantes, leur mécanisme d'action moléculaire au niveau cellulaire est peu connu. Ce manque de connaissance limite considérablement l'interprétation des données, soulignant le besoin urgent de comprendre le fonctionnement des inhibiteurs et les modes d'interaction plante-microbiome y'a compris les PGPR.

Conclusion

Conclusion

L'auxine est une phytohormone clé dans le développement et la croissance des plantes et sa fonction nécessite des actions combinées de diffusion et de transporteurs spécifiques d'influx et d'efflux. Ce transport peut être inhibé ou bloqué par des phénomènes naturels ou par des substances spécifiques telle l'acide 1-naphtoxyacétique (1-NOA).

Cette étude renferme trois volets : l'étude de l'effet de l'inhibiteur d'auxine 1-NOA et/ou celui de PGPR en utilisant la souche Bt04 qui est caractérisée par sa capacité de produire l'auxine, sur la croissance des plantes de *Zea mays*, les teneurs en sucre dans les feuilles et les racines des plantes, et enfin, leurs effet sur la formation et le diamètre des tissus (surtout les tissus conducteurs). Après l'application des différents traitements, les résultats obtenus ont montré que le traitement par la souche Bt04 a favorisé une croissance et un développement optimal des parties aériennes et racinaires de la plante et par la suite sur la formation et le diamètre des différents tissus dont les vaisseaux conducteurs, sont de diamètre de 91,353 μm dans les racines. Cependant l'application de l'inhibiteur d'auxine 1-NOA a bloqué le développement des racines et par conséquent provoqué le ralentissement de la croissance des cellules et des tissus, qui ont subi quelques déformations partielles et eu des diamètres de 16,88 μm dans les racines, il est inférieur par rapport aux autres traitements.

On outre, les plantes traitées par la Bt04 puis par l'inhibiteur d'auxine ont eu une croissance normale et optimale, pour les différents paramètres étudiée, ce qui montre la capacité de la souche Bt04 à produire de l'auxine et par la suite la stimulation de la croissance. Les diamètres obtenus pour les tissus conducteurs sont de 92,0918 μm dans les racines. Par ailleurs, on a observé que l'effet de l'inhibiteur et celui de la Bt04 touchent généralement les tissus conducteurs précisément dans la partie racinaire ce qui affecte considérablement le phénomène de transport de la sève brute et élaborée dont la distribution de l'eau, des minéraux ainsi que les substances nutritives telles le sucre est déséquilibrée.

Ainsi, dans la perspective d'approfondir ce travail et afin de bien comprendre le mode d'action des phytohormones, leurs inhibiteurs et leurs relations avec le microbiome, il serait judicieux de :

- Explorer les différentes voies de biosynthèse et de transport des auxines et suivre leur destination avec des marqueurs moléculaires radioactifs.
- Suivre la méthode de passage des auxines bactérienne vers les plantes et étudier leurs mouvements dans la plante hôte

Conclusion

- Tester l'effet de des inhibiteurs d'auxine comme le 1-NOA en présence de différentes souches de PGPR
- Tester l'effet des autres inhibiteurs d'auxine, en présence et/ou en absence des souche PGPR et étudier leurs effets sur la formation histologique de la plante.

Références

References Bibliographiques

ABELES, F. B., MORGAN, P. W., et SALTVEIT JR, M. E. Ethylene. Plant Biology, 2nd ed., Academic Press, New York, 1992.

ÅBERG, Börje. On the effects of weak auxins and antiauxins upon root growth. *Physiologia Plantarum*, 1952, vol. 5, no 2, p. 305-319.

ADJANOHOUN A, BABA-MOUSSA L, GLÈLÈ KAKAÏ R, et al. Caractérisation des rhizobactéries potentiellement promotrices de la croissance végétative du maïs dans différents agrosystèmes du Sud-Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 2011, vol. 5, no 2, p. 433-444.

ARORA, Naveen Kumar, TEWARI, Sakshi, et SINGH, Rachna. Multifaceted plant-associated microbes and their mechanisms diminish the concept of direct and indirect PGPRs. In : *Plant microbe symbiosis: Fundamentals and advances*. Springer, New Delhi, 2013. p. 411-449.

AUDUS, L. J. et DAS, N. The interactions of auxins and anti-auxins in the stimulation of root growth. *Journal of Experimental Botany*, 1955, vol. 6, no 3, p. 328-347.

AUGÉ, Ramir, BEAUCHESNE, Gildas, BOCCON-GIBOD, Jacques, et al. La culture in vitro et ses applications horticoles. 1982, p18.

BENKOVÁ, Eva, MICHNIEWICZ, Marta, SAUER, Michael, et al. Local, efflux-dependent auxin gradients as a common module for plant organ formation. *Cell*, 2003, vol. 115, no 5, p. 591-602.

BENNETT, Malcolm J., MARCHANT, Alan, GREEN, Haydn G., et al. Arabidopsis AUX1 gene: a permease-like regulator of root gravitropism. *Science*, 1996, vol. 273, no 5277, p. 948-950.

BLAKESLEE, Joshua J., BANDYOPADHYAY, Anindita, LEE, Ok Ran, et al. Interactions among PIN-FORMED and P-glycoprotein auxin transporters in Arabidopsis. *The Plant Cell*, 2007, vol. 19, no 1, p. 131-147.

BLOMME, Guy. The interdependence of root and shoot development in banana (*Musa spp.*) under field conditions and the influence of different biophysical factors on this relationship. The interdependence of root and shoot development in banana (*Musa spp.*) under field conditions and the influence of different biophysical factors on this relationship., 2000, no 421.

Références Bibliographiques

BORUAH, HP Deka, RABHA, B. K., SAIKIA, N., et al. Fluorescent *Pseudomonas* influences palisade mesophyll development and spatial root development in *Phaseolus vulgaris*. *Plant and soil*, 2003, vol. 256, no 2, p. 291-301.

BOWEN, G. D. et ROVIRA, A. D. Microbial colonization of plant roots. *Annual review of phytopathology*, 1976, vol. 14, no 1, p. 121-144.

BURSTRÖM, Hans. Evaluation of the Growth Activity of Naphtalene Derivatives. *Physiologia Plantarum*, 1955, vol. 8, no 1, p. 174-188.

CHARLES, H. P. et STREET, H. E. Studies on the growth of excised roots: vi. The effect of certain amino acids and auxins on the growth of excised groundsel roots. *New Phytologist*, 1959, vol. 58, no 1, p. 75-80.

CHUNG, Kuang R. et TZENG, Dean D. Biosynthesis of indole-3-acetic acid by the gall-inducing fungus *Ustilago esculenta*. *J Biol Sci*, 2004, vol. 4, no 6, p. 744-750.

DEEPA, C. K., DASTAGER, Syed G., et PANDEY, Ashok. Isolation and characterization of plant growth promoting bacteria from non-rhizospheric soil and their effect on cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) seedling growth. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2010, vol. 26, no 7, p. 1233-1240.

DENHIÈRE, Guy. Il était une fois---. Presses universitaires de Lille, 1984.

DESTOVER J., Atlas d'histologie et d'anatomie des plantes vasculaires, 2003.

DEY, R. K. K. P., PAL, K. K., BHATT, D. M., et al. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiological research*, 2004, vol. 159, no 4, p. 371-394.

DORÉ, Claire et VAROQUAUX, Fabrice. Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées. Editions Quae, 2006.

DOUZET R., Petit lexique de botanique AL'USAGE du DEBUTANT, 2007.

EL ZEMRANY, Hamdy, CZARNES, Sonia, HALLETT, Paul D., et al. Early changes in root characteristics of maize (*Zea mays*) following seed inoculation with the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1. *Plant and soil*, 2007, vol. 291, no 1-2, p. 109-118.

EVANS, Michael L., ISHIKAWA, Hideo, et ESTELLE, Mark A. Responses of *Arabidopsis* roots to auxin studied with high temporal resolution: comparison of wild type and auxin-response mutants. *Planta*, 1994, vol. 194, no 2, p. 215-222.

Références Bibliographiques

FRIML, Jiří. Subcellular trafficking of PIN auxin efflux carriers in auxin transport. *European journal of cell biology*, 2010, vol. 89, no 2-3, p. 231-235.

GALSTON, Arthur W. THE EFFECT OF 2, 3, 5-TRIIODOBENZOIC ACID ON THE GROWTH AND FLOWERING OF SOYBEANS. *American journal of Botany*, 1947, vol. 34, no 7, p. 356-360.

GLICK, Bernard R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian journal of microbiology*, 1995, vol. 41, no 2, p. 109-117.

GRIFFITH, W. T. Characterization of the terminal chlorophyllide synthesis in etioplast membrane preparation. *Biochem J*, 1975, vol. 152, p. 623-635.

GROLEAU-RENAUD, Virginie, PLANTUREUX, Sylvain, et GUCKERT, Armand. Influence of plant morphology on root exudation of maize subjected to mechanical impedance in hydroponic conditions. *Plant and soil*, 1998, vol. 201, no 2, p. 231-239.

HARTMANN, Anton, ROTHBALLER, Michael, et SCHMID, Michael. Lorenz Hiltner, a pioneer in rhizosphere microbial ecology and soil bacteriology research. *Plant and Soil*, 2008, vol. 312, no 1-2, p. 7-14.

HOPKINS, William G. *Physiologie végétale*. De Boeck Supérieur, 2003.P310.

IMHOFF, Viviane, MULLER Philippe, GUERN Jean, et al. Inhibitors of the carrier-mediated influx of auxin in suspension-cultured tobacco cells. *Planta*, 2000, vol. 210, no 4, p. 580-588.

JODINSKIENĚ, M. et ANISIMOVIEŇĚ, N. Peculiarities of two different IAA binding sites functioning in kidney bean hypocotyl cell plasmalemma. *Biologija*, 2007, no 2.

KANT, Surya, BI, Yong-Mei, ZHU, Tong, et al. SAUR39, a small auxin-up RNA gene, acts as a negative regulator of auxin synthesis and transport in rice. *Plant physiology*, 2009, vol. 151, no 2, p. 691-701.

KERR, Ian D. et BENNETT, Malcolm J. New insight into the biochemical mechanisms regulating auxin transport in plants. *Biochemical Journal*, 2007, vol. 401, no 3, p. 613-622.

KHAN, Belas Ahmed, WARNER, Philip, et WANG, Hao. Antibacterial properties of hemp and other natural fibre plants: a review. *BioResources*, 2014, vol. 9, no 2, p. 3642-3659.

KLÍMA, Petr, LAŇKOVÁ, Martina, et ZAŽÍMALOVÁ, Eva. Inhibitors of plant hormone transport. *Protoplasma*, 2016, vol. 253, no 6, p. 1391-1404.

Références Bibliographiques

LAŇKOVÁ, Martina, SMITH, Richard S., PEŠEK, Bedřich, et al. Auxin influx inhibitors 1-NOA, 2-1-NOA, and CHPAA interfere with membrane dynamics in tobacco cells. *Journal of experimental botany*, 2010, vol. 61, no 13, p. 3589-3598.

LEVANONY, Hanna et BASHAN, Y. Enhancement of cell division in wheat root tips and growth of root elongation zone induced by *Azospirillum brasilense* Cd. *Canadian Journal of Botany*, 1989, vol. 67, no 7, p. 2213-2216.

LJUNG, Karin, BHALERAO, Rishikesh P., et SANDBERG, Göran. Sites and homeostatic control of auxin biosynthesis in *Arabidopsis* during vegetative growth. *The plant journal*, 2001, vol. 28, no 4, p. 465-474.

MANULIS, Shulamit, SHAFRIR, Hadas, EPSTEIN, Ephraim, et al. Biosynthesis of indole-3-acetic acid via the indole-3-acetamide pathway in *Streptomyces* spp. *Microbiology*, 1994, vol. 140, no 5, p. 1045-1050.

MARCHANT, Alan, BHALERAO, Rishikesh, CASIMIRO, Ilda, et al. AUX1 promotes lateral root formation by facilitating indole-3-acetic acid distribution between sink and source tissues in the *Arabidopsis* seedling. *The Plant Cell*, 2002, vol. 14, no 3, p. 589-597.

MOROT-GAUDRY, Jean-François, PRAT, Roger, BOHN-COURSEAU, Isabelle, et al. *Biologie végétale: Croissance et développement-3e éd.* Dunod, 2017, p6.

MRAVEC, Jozef, KUBEŠ, Martin, BIELACH, Agnieszka, et al. Interaction of PIN and PGP transport mechanisms in auxin distribution-dependent development. *Development*, 2008, vol. 135, no 20, p. 3345-3354.

NOUMAVO, Pacôme A., KOCHONI, Eméric, DIDAGBÉ, Yédéou O., et al. Effect of different plant growth promoting rhizobacteria on maize seed germination and seedling development. *American Journal of Plant Sciences*, 2013, vol. 4, no 05, p. 1013.

OKON, Y. et KAPULNIK, Y. Development and function of *Azospirillum*-inoculated roots. *Plant and soil*, 1986, vol. 90, no 1-3, p. 3-16.

PARRY, Geraint, DELBARRE, Alain, MARCHANT, Alan, et al. Novel auxin transport inhibitors phenocopy the auxin influx carrier mutation *aux1*. *The Plant Journal*, 2001, vol. 25, no 4, p. 399-406.

PATTEN, Cheryl L. et GLICK, Bernard R. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Canadian journal of microbiology*, 1996, vol. 42, no 3, p. 207-220.

Références Bibliographiques

PATTEN, Cheryl L. et GLICK, Bernard R. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2002, vol. 68, no 8, p. 3795-3801.

PÉRET, Benjamin, SWARUP, Kamal, FERGUSON, Alison, et al. AUX/LAX genes encode a family of auxin influx transporters that perform distinct functions during *Arabidopsis* development. *The Plant Cell*, 2012, vol. 24, no 7, p. 2874-2885

PERROT-RECHENMANN, Catherine. Cellular responses to auxin: division versus expansion. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, 2010, vol. 2, no 5, p. a001446.

PETRÁŠEK, Jan et FRIML, Jiří. Auxin transport routes in plant development. *Development*, 2009, vol. 136, no 16, p. 2675-2688.

QUITTENDEN, Laura J., DAVIES, Noel W., SMITH, Jason A., et al. Auxin biosynthesis in pea: characterization of the tryptamine pathway. *Plant Physiology*, 2009, vol. 151, no 3, p. 1130-1138.

RAHMOUNE, Bilal, MORSLI, Abdelkader, KHELIFI-SLAOUI, Madjda, et al. Isolation and characterization of three new PGPR and their effects on the growth of *Arabidopsis* and *Datura* plants. *Journal of plant interactions*, 2017, vol. 12, no 1, p. 1-6.

RAHMOUNE, Bilal, ZERROUK, Izzeddine Zakarya, BOUZAA, Saad, et al. Amino acids profiling in *Datura stramonium* and study of their variations after inoculation with plant growth promoting Rhizobacteria. *Biologia*, 2019, p. 1-11.

ROUANET, G. Le maïs: Technicien d'agriculture tropicale. Agence de Coopération Culturelle et Technique. Ed. Maisonneuve et Larose, 1984.

ROVIRA, A. D. and C. B. DAVEY. 1974. Biology of the rhizosphere. In *The plant root and its environment*. Edited by E. W. Carson. University press of Virginia, Charlottesville, VA. pp. 153-204.

RUBERY, Philip H. et SHELDRAKE, A. Rupert. Carrier-mediated auxin transport. *Planta*, 1974, vol. 118, no 2, p. 101-121.

SARIG, S., BLUM, A., et OKON, Y. Improvement of the water status and yield of field-grown grain sorghum (*Sorghum bicolor*) by inoculation with *Azospirillum brasilense*. *The Journal of Agricultural Science*, 1988, vol. 110, no 2, p. 271-277.

Références Bibliographiques

SCHWACHTJE, Jens, KAROJET, Silke, THORMÄHLEN, Ina, et al. A naturally associated rhizobacterium of *Arabidopsis thaliana* induces a starvation-like transcriptional response while promoting growth. *PLoS One*, 2011, vol. 6, no 12, p. e29382.

SHIMAMURA, Satoshi, NISHIMURA, Takeshi, KOSHIBA, Tomokazu, et al. Effects of anti-auxins on secondary aerenchyma formation in flooded soybean hypocotyls. *Plant Production Science*, 2016, vol. 19, no 1, p. 154-160.

SHIMAMURA, Satoshi, NISHIMURA, Takeshi, KOSHIBA, Tomokazu, et al. Effects of anti-auxins on secondary aerenchyma formation in flooded soybean hypocotyls. *Plant Production Science*, 2016, vol. 19, no 1, p. 154-160.

SHIMAMURA, Satoshi, YOSHIOKA, Toshihito, YAMAMOTO, Ryo, et al. Role of abscisic acid in flood-induced secondary aerenchyma formation in soybean (*Glycine max*) hypocotyls. *Plant Production Science*, 2014, vol. 17, no 2, p. 131-137.

SIMON, Sibū et PETRÁŠEK, Jan. Why plants need more than one type of auxin. *Plant Science*, 2011, vol. 180, no 3, p. 454-460.

SIMON, Sibū, KUBEŠ, Martin, BASTER, Paweł, et al. Defining the selectivity of processes along the auxin response chain: a study using auxin analogues. *New Phytologist*, 2013, vol. 200, no 4, p. 1034-1048.

SUTY, Lydie. Les végétaux: évolution, développement et reproduction. Quae, 2014.

SWARUP, Kamal, BENKOVÁ, Eva, SWARUP, Ranjan, et al. The auxin influx carrier LAX3 promotes lateral root emergence. *Nature cell biology*, 2008, vol. 10, no 8, p. 946.

SWARUP, Ranjan, FRIML, Jiri, MARCHANT, Alan, et al. Localization of the auxin permease AUX1 suggests two functionally distinct hormone transport pathways operate in the *Arabidopsis* root apex. *Genes & development*, 2001, vol. 15, no 20, p. 2648-2653.

TEALE, William D., PAPONOV, Ivan A., et PALME, Klaus. Auxin in action: signalling, transport and the control of plant growth and development. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2006, vol. 7, no 11, p. 847.

THIMANN, Kenneth V. Hormones and the analysis of growth. *Plant Physiology*, 1938, vol. 13, no 3, p. 437.

VANNESTE, Steffen et FRIML, Jiří. Auxin: a trigger for change in plant development. *Cell*, 2009, vol. 136, no 6, p. 1005-1016.

Références Bibliographiques

VANS, Michael L., ISHIKAWA, Hideo, et ESTELLE, Mark A. Responses of Arabidopsis roots to auxin studied with high temporal resolution: comparison of wild type and auxin-response mutants. *Planta*, 1994, vol. 194, no 2, p. 215-222.

VERMA, J. P., YADAV, J., TIWARI, Kavindra Nath, et al. Application of Rhizobium sp. BHURC01 and plant growth promoting rhizobacteria on nodulation, plant biomass and yields of Chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International Journal of Agricultural Research*, 2010, vol. 5, no 3, p. 148-156.

WIŚNIEWSKA, Justyna, XU, Jian, SEIFERTOŰÁ, Daniela, et al. Polar PIN localization directs auxin flow in plants. *Science*, 2006, vol. 312, no 5775, p. 883-883.

YANG, Yaodong, HAMMES, Ulrich Z., TAYLOR, Christopher G., et al. High-affinity auxin transport by the AUX1 influx carrier protein. *Current Biology*, 2006, vol. 16, no 11, p. 1123-1127.

ZAŰÍMALOVÁ, Eva, MURPHY, Angus S., YANG, Haibing, et al. Auxin transporters—why so many? *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, 2010, vol. 2, no 3, p. a001552.

ZERROUK, Izzeddine Zakarya. Application des PGPR dans la phytostimulation et l'atténuation des stress abiotiques (Salin/Allumique) chez une culture de maïs. 2017. Thèse de doctorat. ENSA.

ZHAO, Yingchun et HASENSTEIN, Karl H. Physiological interactions of anti-auxins with auxin in roots. *Journal of plant physiology*, 2010, vol. 167, no 11, p. 879-884.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>.

Annexes

Annexe I

Milieux de culture

Milieu solide

- King B solide (43 g de King B solide → 1000 ml d'eau distillée).

Protocole

- Peser 12.9 g de King B solide.
- Ajouter la quantité pesée à 300 ml d'eau distillée.
- Agiter le tout sur une plaque chauffante/ agitateur jusqu'à sa solubilité.
- Verser la solution dans des flacons et mettre dans l'autoclave pendant 15 min pour la stérilisation.

Milieu liquide

- Eau péptonée (16 g d'eau péptonée → 1000 ml d'eau distillée).

Protocole

- Peser 9.66 g d'eau péptonée.
- Ajouter la quantité pesée à 600 ml d'eau distillée.
- Agiter le tout jusqu'à homogénéisation.
- Stériliser la solution dans un autoclave.

Annexe II

1. Tableau de l'ANOVA pour la longueur des racines par Traitement

<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>significativité</i>
Traitements	21,6192	3	7,20639	3,76	0,0296	S
Résiduelle	34,5286	18	1,91825	-	-	-
Total (Corr.)	56,1477	21	-	-	-	-

2. Test LSD de de Fisher

<i>Traitement</i>	<i>Effectif</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Groupe homogène</i>
Témoin	5	10,7	B
1-NOA	5	11,5	B
PGPR	5	12,3	A
PGPR+1-NOA	7	13,2857	A

Annexe III

1. Tableau de l'ANOVA pour la longueur des tiges par Traitement

<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Significativité</i>
Traitements	41,3333	3	13,7778	4,72	0,0134	S
Résiduelle	52,5417	18	2,91898	-	-	-
Total (Corr.)	93,875	21	-	-	-	-

2. Test LSD de de Fisher

<i>Traitement</i>	<i>Effectif</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Groupe homogène</i>
PGPR	5	9,5	B
1-NOA	6	11,8333	A
Témoin	6	12,0833	A
PGPR+1-NOA	5	13,5	A

Annexe IV

**1. Tableau de l'ANOVA pour Nombre moyen de racines secondaires par
Traitement**

<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Ddl</i>	<i>Carré moyen</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>significativité</i>
Traitements	43,0879	3	14,3626	32,86	0,0000	THS
Résiduelle	7,86667	18	0,437037	-	-	-
Total (Corr.)	50,9545	21	-	-	-	-

2. Test LSD de de Fisher

<i>Traitement</i>	<i>Effectif</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Groupe homogène</i>
PGPR	5	4,6	C
1-NOA	6	4,66667	C
Témoin	6	6,66667	B
PGPR+1-NOA	5	8,0	A

Annexe V

1. Tableau des mesures des tissus conducteurs avec différents grossissements

	<i>Echantillon</i>	<i>Diamètre (pixel)</i>	<i>Diamètre (μm)</i>
<i>Inhibiteur</i>	<i>Racine x4</i>	35,78	43,651
	<i>Racine x10</i>	89,92333333	42,263
	<i>Racine x40</i>	374,145	48,638
<i>Témoïn</i>	<i>Racine x4</i>	56,665	69,131
	<i>Racine x10</i>	170,118	79,955
	<i>Racine x40</i>	597	77,61
<i>PGPR</i>	<i>Racine x4</i>	58,64	71,54
	<i>Racine x10</i>	178,115	83,714
	<i>Racine x40</i>	506,725	65,874
<i>PGPR+I</i>	<i>Racine x4</i>	60,135	73,364
	<i>Racine x10</i>	186,766	87,78
	<i>Racine x40</i>	825,255	107,283

Résumé

L'auxine est un régulateur clé du développement des plantes et sa fonction nécessite des actions combinées de diffusion et de transporteurs spécifiques d'influx et d'efflux d'auxines. Cependant, plusieurs molécules qui inhibent le transport d'auxine ont été décrites récemment. Dans ce présent travail, nous avons testé les effets physiologiques de l'un de ces inhibiteurs, l'acide 1-naphtoxyacétique (1-NOA) sur la croissance de la plante, sa teneur en sucre et sur la formation des tissus histologiques des tiges et des racines chez le maïs (*Zea mays*. L) en présence et en absence d'une PGPR (souche Bt04).

Les résultats obtenus ont montré des effets significatifs de l'application de la souche PGPR (Bt04) sur tous les paramètres étudiés, surtout la formation des tissus (les vaisseaux conducteurs). Cependant, par l'application de l'inhibiteur 1-NOA, des valeurs inférieures et des déséquilibres partiels ont été enregistrés pour les différents paramètres y compris le diamètre et la formation des tissus (histométrie). En outre, selon nos résultats, la souche Bt04 peut remplacer le rôle de l'auxine de la plante par la sécrétion de son propre auxine.

Les mots clés : Auxine ; inhibiteur d'auxine 1-NOA ; PGPR ; *Zea mays* ; Histométrie, Vaisseaux conducteurs

ملخص

الأوكسين هو مفتاح رئيسي في تنظيم تطور النباتات و دوره يتطلب عمليات انتشار مجتمعة و ناقلات محددة لدفق و تدفق الأوكسين لكن العديد من الجزيئات التي تثبط نقل الأوكسين قد تم التعرف عليها مؤخرًا. في هذه التجربة اختبرنا الآثار الفيزيولوجية لواحد من هذه المثبطات 1-NOA على تشكيل الأنسجة و المحتوى السكري في ساق و جذر الذرة

(*Zea mays*. L) في حضور و غياب ال PGPR (Bt04)

أظهرت النتائج المتحصل عليها تأثيرات كبيرة عند المعالجة بسلالة PGPR (Bt04) على جميع الخاصيات المدروسة ، وخاصة نمو النباتات و تشكيل الأنسجة (الأوعية الناقلة). بالمقابل تلك ، فمن خلال تطبيق المثبط 1-NOA ، تم تسجيل القيم المنخفضة والاختلالات الجزيئية لمختلف المعلمات بما في ذلك تكوين القطر والأنسجة (قياس الأنسجة). بالإضافة إلى ذلك، وفقًا لنتائجنا، يمكن لسلالة Bt04 أن تحل محل دور أوكسين النبات بإفراز أوكسين خاص به.

الكلمات المفتاحية : أوكسين المثبط الأوكسين 1-NOA .PGPR *Zea mays* علم الأنسجة ، الأوعية الموصلة