

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn Badis
Mostaganem
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

Mlle. DAOUD Amina

Mlle. KREIRI Senia

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN BIOLOGIE

Spécialité: BIOTECHNOLOGIE DES MICROORGANISMES

THÈME

**Optimisation de la production de
l'AIA par des rhizobactéries.**

Soutenu publiquement le: 12/06/2016.

DEVANT LE JURY

Président	Mr. DJIIBAOUI R	M.C.A	U. Mostaganem
Encadreur	Mr. BOUZNAD A	M.C.B	U. Mostaganem
Co-encadreur	Mr. HAMMOUM H	Doctorant	U. Mostaganem
Examineur	Mr. MEKHALDI A	Pr.	U. Mostaganem

Dédicace

La récompense d'un résultat de travail nécessite un effort colossal, investissement de temps de patience et de sacrifice en matière d'analyse j'ai tout basé mes recherches pour atteindre l'objectif tracé grâce à dieu j'ai réussie à ma mission.

Par cette occasion je dédie le fruit de ce résultat à mes parents GHALI et HADJA qui m'ont soutenue ont apportant un apport psychologique ils ont tous sacrifié pour moi il mon donnée un magnifique modelé sur la patience et la persévérance, je suis redevable d'une éducation dont je suis fier.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mon oncle DJALLOUL qui m'a apporté son soutien moral est intellectuelle tout au long de ma démarche.

Son oublier Mon frère MOHAMED et ma sœur IMANE qui m'ont déchargée de plusieurs missions familiale ainsi à toutes mes tantes et mes amies.

Spécial dédicace à mon meilleur amie et ma chère collègue AMINA qui m'a bien aidée le long de mon parcours universitaire.

Kreíri Senía

Dédicace

C'est avec une immense joie que je dédie ce modeste travail à:

Mes deux vrais trésors « mes parents » qui m'ont donné le courage et la patience tout au long de mes études.

Je dédie ce travail à ma chère grande mère que je l'aime beaucoup, mes sœurs, mes frères et mes belles sœurs à ma très grande famille qui a fait de moi ce que je suis.

Une pensée toute particulière pour tous mes proches amies et tous les collègues par leur aide et leur amitié, à vous tous qui avez contribué de quelques façons que ce soit, de loin ou de près, à la réalisation de ce mémoire.

Je garde le meilleur pour la fin : à ma copine SENIA pour sa patience, et sa coopérativité que j'ai apprécié et j'apprécierai encore de travailler avec elle.

Daoud Amína

Remerciements

*Nous tenons à remercier dans un premier lieu le Dieu « **ELLAH** » merci de nous avoir donné la chance de vivre et de pouvoir étudier, le courage et la patience pour mener à bien ce travail durant toute cette année.*

*Nos remerciements tout particulièrement **Mr. Bouzned. A** pour l'encadrement de ce travail.*

*Nous remercions **Mr. Hammoum. H** pour ces précieux conseils, ça disponibilité, et ça patience tout à long de ce stage.*

*Nos remerciements à **Mr. Djibaoui. R** et **Mr. Mikhaldi. A** d'avoir accepté de juger ce travail*

*Notre responsable de promotion **Mr. Djibaoui. R** et à tous les enseignants(es) du département de biologie chacun par son nom pour leurs contributions dans notre formation tout au long de notre cursus universitaire.*

*Nous remercions aussi bien l'assistance technique de laboratoire de recherche en microbiologie pour la disponibilité de son laboratoire, sa collaboration et son dévouement pendant tout le long de ce travail dans des conditions favorable **Mlle. Hafida** et **Mm. Mokhtaria**.*

Aussi nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce Modeste travail.

Abréviations

ABA	Acide Abscissique
AIA	Acide Indole-3-Acétique
AIB	Acide Indole-3-Butyrique
ANA	Acide 1-Naphtalène-Acétique
CTKS	Cytokinines
DO	Densité Optique
ETH	Ethylène
GAS	Gibberellins
GN	Gélose Nutritive
IAN	Indole-3-AcétONitrile
ηm	Nano meter
PGP	Plant Growth Promotion
PGPR	Plant Growth Promoting Rhizobacteria
pH	potentiel Hydrogène
RFCP	Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes
RPCP	Rhizobactéries Promotrice la Croissance des Plantes
rpm	rotation par minute
U.V	Ultra-Violet
μg	Micro gramme

Liste des Tableaux

Tableau 1: Effet des différentes sources de carbone sur la production de l'AIA par les isolats S ₁ et S ₂	23
Tableau 2: Effet de différentes sources d'azote sur la production de l'AIA par les isolats S ₁ et S ₂	25
Tableaux 3: Effet de différentes valeurs du PH sur la production de l'AIA par les isolats S ₁ et S ₂	27
Tableau 4 : Effet de température sur la production de l'AIA chez les isolats S ₁ et S ₂	28
Tableau 5 : effet de la durée d'incubation sur la croissance bactérienne et la production de l'AIA (µg/ml) par les isolats S ₁ et S ₂	30
Tableau 6: Effet de différentes concentrations du tryptophane sur la production de l'AIA chez l'isolat S ₁ et S ₂	32

Liste des Figures

Figure 1 : Structure chimique d'auxine naturelle (AIA).....	14
Figure 2 : Biosynthèse de l'acide indole acétique	15
Figure 3: Mécanisme d'action des bactéries productrices l'AIA.....	16
Figure 4 : Estimation de la production d'AIA.	20
Figure 5 : Courbe étalonnage de l'AIA	21
Figure 6 : Effet de différentes sources de carbone sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	24
Figure 7: Effet des différentes sources de carbone sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	24
Figure 8 : Effet de différentes sources d'azote sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	25
Figure 9 : Effet de différentes sources d'azote sur la production de, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	26
Figure 10 : Effet de différentes valeurs de PH sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	27
Figure 11 : Effet de différentes valeurs du PH sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	27
Figure 12: Effet de différentes températures sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	28
Figure 13 : Effet de température 25 °C sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	29
Figure 14 : Effet de température 35 °C sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	29
Figure 15 : Effet de température 40 °C sur la production de l'AIA, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	29
Figure 16: Effet de la durée d'incubation sur la croissance et la production de l'AIA chez l'isolat S ₁	31
Figure 17 : Effet de la durée d'incubation sur la croissance et la production de l'AIA chez l'isolat S ₂	31

Figure 18 : Effet de différentes concentrations du tryptophane sur la production de, a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	33
Figure 19 : Effet de différentes concentrations du tryptophane sur la production de l'AIA , a : isolat S ₁ , b : isolat S ₂	33

Sommaire

Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction	01

Parties I : Revue Bibliographique

Chapitre 1 : les rhizobactéries

1. La rhizosphère	03
2. La communauté microbienne de la rhizosphère	03
2.1. Les rhizobactéries	04
2.2. Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes	04
2.1.2. Diversité taxonomique des PGPR	05
2.2.2. Les mécanismes d'action des PGPR.....	07
2.2.2.1. Les mécanismes indirects	07
2.2.2. 1.1. Production des sidérophores	07
2.2.2. 1.2. L'antibiose	08
2.2.2. 1.3. La production l'HCN	08
2.2.2.2. Les mécanismes directs	08
2.2.2. 2. 1. La solubilisation du phosphate	09
2.2.2. 2. 2. La synthèse des phytohormones	09
2.2.2. 2. 3. Production de la 1-Amino-cyclopropane-1-carboxylate désaminase ACC	10
2.2.2. 2. 4. La fixation de l'azote	10

Chapitre 2 : Les phytohormones

1. La Régulation de la croissance végétale	12
1.1. Les phytohormones.....	12
1.1.1. Les auxines	12
1.1.1.1. L'Acide Indole-3-acétique (AIA).....	13
1.1.1.1.1. La fonction de l'acide indole-3- acétique	13
1.1.1.1.2. Structure chimique d'AIA.....	13
1.1.1.1.3. La production d'acide indol-3-acétique ou AIA par les microorganismes.....	14
1.1.1.1.4. Mécanisme d'action des bactéries productrices l'AIA.....	15
1.1.1.1.5. Les facteurs qui modifient la biosynthèse de l'AIA.....	16
1.1.2. Les cytokinines	17
1.1.3. Gibberline	17

1.1.4. Éthylène	17
1.1.5. L'Acide Abscissique	18

Parties II : Etude expérimentale

Chapitre 1 : Matériel et méthodes

1. Les isolats bactériens	19
2. Milieux de cultures utilisées	19
3. Estimation de la production d'AIA	19
3.1. Préparation de l'inoculum	19
3.2. Ensemencement et incubation	19
3.3. Dosage de l'AIA.....	19
3.4. La courbe d'étalonnage de l'AIA	20
4. Optimisations des conditions de production d'AIA	21
4.1. Effet de la composition de milieu de culture	21
4.1.1. Effet des différentes sources de carbone	21
4.1.2. Effet des différentes sources de l'azote	21
4.2. Optimisation des conditions de culture	21
4.2. 1. L'effet de pH sur l'AIA	22
4.2.2. L'effet de la température sur l'AIA	22
4.2.3. L'effet du temps d'incubation	22
4.3. L'effet de concentration du L-tryptophane sur la production d'AIA....	22
5. Analyse statistique	22

Chapitre 2 : Résultats et discussion

1. Effet de la composition de milieu de culture	23
1.1. Effet des différentes sources de carbone.....	23
1.2. Effet des différentes sources d'azote	24
2. Effet des conditions de culture	26
2. 1. L'effet du pH	26
2. 2. Effet de la température sur l'AIA	28
2. 3. Effet du temps d'incubation	30
3. Effet de concentration du L-tryptophane sur la production d'AIA.....	32
Discussion	34
Conclusion	37
Références bibliographiques	38
Annexes	

Résumé

La production de l'acide indole acétique (AIA) est une propriété importante des bactéries de la rhizosphère qui stimulent et facilitent la croissance des plantes. L'objectif de la présente étude est l'amélioration de la capacité des isolats de *Stenotrophomonas maltophilia* S₁ et S₂ à produire de l'AIA par l'optimisation du milieu et des conditions de cultures. Les résultats ont révélés une production importante de l'AIA. L'optimisation de la composition du milieu de culture a déterminé que la source de carbone et d'azote la plus favorable pour la production de l'AIA chez les deux isolats était l'acide malique et le NH₄Cl respectivement. L'effet des facteurs physiques à sélectionner l'acidité de milieu à pH=6, la température à 30°C et le 6^{ème} jour d'incubation comme les meilleures conditions de culture pour la production d'AIA chez les bactéries utilisées. Un maximum de croissance bactérienne a été enregistré après le dixième jour d'incubation chez les isolats S₁ et S₂. En présence et en absence de L-tryptophane dans le milieu de culture les deux isolats ont enregistré des taux appréciables d'AIA variant entre 2,16 et 68,95 µg/ml.

Mots-clés: Acide indole acétique, L-tryptophane, Rhizosphère, *Stenotrophomonas maltophilia*.

Abstract

Production of indole acetic acid (IAA) is an important trait of rhizospheric bacteria which stimulate and facilitate the growth of plants. The objective of this study is to improve the ability of the isolates of *Stenotrophomonas maltophilia* S₁ and S₂ to produce IAA by optimization of culture medium and conditions. The results reported an important production of IAA. The optimization of culture medium composition determinate that the most appropriate source of carbon and nitrogen for IAA production of the two isolates is malic acid and NH₄Cl respectively. The effect of physical factors selected the acidity of pH = 6, the temperature at 30 ° C and the 6th days of incubation are the best culture conditions of IAA the production for the used bacteria. A maximum of bacterial growth was recorded after the 10th day of incubation for the bacterial isolate. In presence and absence of L-tryptophan in culture medium the isolates recorded an appreciable rate of IAA ranged from 2, 16 to 68, 95 µg / ml.

Keywords: Indole acetic acid, L-tryptophan, rhizosphere, *Stenotrophomonas maltophilia*.

الملخص

إنتاج حمض الإندول الخليك (AIA) هو خاصية هامة من قبل بكتيريا الريزوسفير التي تحفز وتسهل نمو النباتات. لقد كان الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحسين قدرة البكتيريا لنوع *Stenotrophomonas maltophilia* S₁ و S₂ على إنتاج حمض الإندول الخليك بتكثيف الوسط و شروط الزراعة. أظهرت النتائج تحرير كميات معتبرة من ال AIA. حيث من خلال دراسة تأثير الاختلاف في تكوين الوسط حدد ان المصدر الأنسب للكربون والنيتروجين للحصول على انتاجية اكبر من ال AIA في كل من العزلتين هو حمض المالك و NH₄Cl على التوالي ، ومن دراسة تأثير العوامل الفيزيائية المختلفة تم انتقاء درجة تحميص الوسط ب PH=6 ، درجة الحرارة إلى 30 درجة مئوية ، طول مدة التحضين ل6 أيام كأفضل الظروف الملائمة لزراعة جيدة لإنتاج حمض الإندول الخليك عند البكتيريا المستعملة و تم تسجيل اقصى نمو بكتيري بعد اليوم العاشر من مدة التحضين عند كل من العزلتين S₁ و S₂ . في غياب وفي وجود التريبتوفان سجلت قيم عالية ومتنوعة من ال AIA قدرت ما بين 2,16µg/m و 168,95.

الكلمات المفتاحية : حمض الإندول الخليك ، التريبتوفان ، الريزوسفير ، *Stenotrophomonas maltophilia*.

Introduction

Les bactéries qui colonisent la rhizosphère et les racines des plantes améliorent leur croissance par quelconque mécanisme sont appelés PGPR y compris Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes (RFCP) (**Lynch et Whipps, 1990**).

Ces rhizobactéries ont un immense potentiel dans l'agriculture pour l'utilisation comme bio-fertilisants, agent de bio-contrôle et dans la biorestauration due à leur capacité de favoriser la croissance (**Ahmad et al., 2008**).

Les PGPR affectent également la croissance des plantes par la synthèse des phytohormones tels que l'acide indole-3-acétique (AIA) (**Malhotra et Srivastava, 2008 ; Arshad et Frankenberger, 1993 ; Zimmer et Bothe, 1989**) et les autres régulateurs de croissance des plantes comme le cytokinine, gibbérelline, l'éthylène, et l'acide abscissique (**Arshad et Frankenberger, 1993**).

L'acide indole acétique (AIA) est l'un des auxines les plus physiologiquement actives, c'est un type de phytohormone connue (**Malhotra et Srivastava, 2008**). Il fonctionne comme un signal important dans la régulation du développement des plantes (**Ryu et Patten, 2008**), l'AIA est un métabolite dérivé de L- tryptophane par de nombreuses voies Trp-dépendantes et Trp indépendants dans les plantes et les bactéries (**Patten et Glick, 1996**).

L'acide indole acétique influencer un certain nombre de fonctions végétales telles que la promotion de l'élongation et la division cellulaire (**Zhao, 2010**), la dominance apicale, initiation des racines, la différenciation des tissus vasculaires, et la biosynthèse d'éthylène (**Datta et Basu, 2000**).

Dans ce travail, nous allons essayer de déterminer l'effet de quelques facteurs chimiques et physiques sur le pouvoir de la production d'AIA par différents bactéries du sol.

Ainsi, notre travail comporte deux parties :

La première partie, est consacrée à une étude bibliographique ou un bref rappel comporte deux chapitres, le premier donne un aperçu sur les microorganismes promotrices de la croissance des plantes par leurs mécanismes directes et indirectes, le deuxième chapitre

donne une caractérisation de la production de l'acide indole acétique et leurs fonctions avec un aperçu sur les autres régulateurs de la croissance.

La seconde partie décrit la méthodologie mise en œuvre dans cette étude et notamment la méthode employée pour réaliser différents tests en fonction de différents paramètres chimiques et physiques susceptibles d'optimiser la production d'AIA.

Le dernier chapitre démontre les différents résultats obtenus au cours de ce travail. En fin, une conclusion générale rassemble les principaux résultats de cette étude.

1. La rhizosphère :

Le terme rhizosphère a été décrit pour la première fois en 1904 par le chercheur allemand Lorenz Hiltner (**Prescott et al., 2007**), elle est définie comme le volume de sol directement soumis à l'action des racines. C'est la région du sol qui entoure les racines, cette région s'étend au fur et à mesure que la plante pousse, que les microorganismes interagissent avec les plantes, que les actions exercées par les racines et ces microorganismes associés se propagent dans le sol (**Michel et al., 2005**). Elle est le lieu des échanges entre sol, racines et microorganismes. Ces échanges intenses, se traduisent par des flux bi-directionnels d'eau et de nutriments (**Lynch et Whipps, 1990 ; Schwartz et al., 2005**).

C'est un système complexe, hétérogène, dynamique et interactif, qui dépasse la simple notion d'interface entre le monde végétal et le monde minérale. Elle est un condensé des processus physiques, chimiques et biologiques qui animent les sols (**Hinsinger, 1998 ; Michel et al., 2005**).

2. La communauté microbienne de la rhizosphère :

La rhizosphère est caractérisée par une forte activité microbienne due au renouvellement des composés organiques assimilables issus des exsudats racinaires, des mucilages et des cellules épidermiques mortes disponible pour la croissance et le développement des microorganismes dans la rhizosphère (**Venant et al., 2011**).

Les communautés distinctes des micro-organismes sont associées aux systèmes racinaires de toutes les plantes supérieures (**Khalid et al., 2006**). Ces êtres vivants sont requis dans le processus de la décomposition et le recyclage des nutriments dans la rhizosphère (**Germida et al., 1998**). Certaines de ces bactéries du sol, appelées PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), sont capables de coloniser la rhizosphère à un effet bénéfique sur la plante (**Venant et al., 2011**).

Cet effet bénéfique peut être direct ou indirect. La promotion directe de la croissance est le résultat du pouvoir d'acquisition des nutriments ou de la stimulation des hormones de la plante. D'autres mécanismes indirects, sont impliqués dans la réduction ou suppression des pathogènes des plantes, mais le plus souvent liés à la croissance des plantes (**Venant et al., 2011 ; Hinsinger, 1998**).

Outre leur capacité remarquable à concentrer les ions dissous dans le sol, les bactéries disposent d'autres mécanismes pour augmenter la disponibilité de certains éléments au

bénéfice de la communauté rhizosphérique : c'est le cas en particulier de l'azote, du phosphore et du fer (Gobat *et al.*, 2010).

2.1. Les rhizobactéries :

Les bactéries de la rhizosphère, dits rhizobactéries, sont capables de coloniser à l'intérieur ou à l'extérieur de la racine de nombreuses espèces des plantes et peuvent être divisé entre ceux qui forment une relation symbiotique avec la plante et ceux qui le font pas. Le ce dernier, disant libre-vie, sont étroitement associés à la surface de la racine et de résider dans les racines que les bactéries endophytes (Kloepper *et al.*, 1989).

Elles sont généralement très compétitives capables de coloniser le système racinaire riche en éléments nutritifs (Peter *et al.*, 2015), et sont des hétérotrophes typiques nécessitent des composés organiques comme source d'énergie, leurs besoins sont entièrement comblés à l'intérieur même de la rhizosphère (Campbell et Greaves, 1990). Quand elles émettent des substances favorisant la croissance des plantes tout au long du leurs cycle de développement (Kloepper, 1993).

Elles sont souvent mentionnées comme des rhizobactéries favorise de la croissance des plantes, connues sous le terme RFCP (Beauchamp, 1993), (PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria) (Kloepper *et al.*, 1989; Zahir *et al.*, 2004).

2.2 Les rhizobactéries promotrices de la croissance de la plante (RPCP) :

L'interaction plante-microorganismes dans la rhizosphère est un processus clé qui joue un rôle primordial dans le recyclage du nutriment dans la rhizosphère et notamment dans la croissance et la santé des plantes (Govaert *et al.*, 2010).

Ces interactions peuvent être influencées par les conditions extérieures (température, humidité, pH, etc...) qui peuvent déplacer les équilibres vers l'un ou l'autre des microorganismes. Cependant également agir sur les conditions extérieures en modifiant la structure du sol où croissance des plantes (Bertand *et al.*, 2000).

Certaines espèces de PGPR ont récemment été décrites pour leur effet direct positif sur la croissance des plantes et l'augmentation du rendement de la culture par divers mécanismes tels que la fixation d'azote (N_2 atmosphérique) (Danielle *et al.*, 1979) et la solubilisation d'oligoéléments tels que le phosphate (Cakmakci *et al.*, 2006 ; Orhan *et al.*, 2006).

Au cours des dernières années, le nombre de PGPR a connu une forte augmentation, principalement parce que le rôle de la rhizosphère a gagné une importance dans le fonctionnement de la biosphère et aussi les mécanismes d'action de PGPR sont profondément

étudiés actuellement, il y a beaucoup de genres bactériennes comprennent PGPR parmi eux, révélant une grande diversité dans ce groupe (Shamsul *et al.*, 2008).

2.2.1. Diversité taxonomique des PGPR :

Le nombre de PGPR identifiées a augmenté d'une façon significative. Ces microorganismes cultivables, présentant une diversité de genre et d'espèces, appartiennent majoritairement aux quatre phyla suivants : Proteobacteries, Firmicutes, Actinobacteries et Bacteroidetes (Hugenholz, 2002). De nombreux genres bactériens incluent les PGPR révélant des taxons très divers (Kloepper, 1992) :

2.2.1.1. Les *Alpha-proteobacteria* :

Les PGPR appartenant à cette classe sont classés par leur capacité à fixer l'azote et à noduler les plantes. Ces souches peuvent se comporter comme PGPR quand elles colonisent les racines des plantes non légumineuses dans une relation non spécifique. En effet, le genre *Rhizobium* contient également des souches PGPR (Sawada *et al.*, 2003). Elle comprend de nombreux genres de bactéries phototrophes pourpres non sulfureuses tels que *Rhodovulum*, *Rhodobium*, *Rhodopseudomonas*. Ces genres sont regroupés dans trois ordres (*Rhodospirillales*, *Rhodobacterales* et *Rhizobiales*) (Bertrand *et al.*, 2011).

2.2.1.2. Les *Beta-proteobacteria* :

Elle comprend quelques bactéries phototrophes pourpres non sulfureuses. Elles constituée de 6 ordres.

L'ordre des *Burkholderiales* regroupe 5 familles de bactéries ; *Ralstoniaceae* avec *Ralstonia metallidurans*, *Burkholderiaceae* avec *Burkholderia*, *Alcaligenaceae* avec *Alcaligenes*, la famille *Comamonadaceae* comprend de nombreuses bactéries (*Comamonas*, *Aquabacterium*, *Sphaerotilus...*etc.), *Oxalobacteraceae* avec *Oxalobacter*.

L'ordre des *Methylophilales* concerne des bactéries méthylophiles regroupées dans une famille (*Methylophilaceae*) avec les genres *Methylophilus*, *Methylobacillus*, etc...

L'ordre des *Neisseriales* avec une famille (*Neisseriaceae*) contient des bactéries très pathogènes (*Neisseria gonorrhoeae*, *Neisseria pneumoniae*, etc.) et aussi des bactéries isolées du sol (*Aquaspirillum*).

L'ordre de *Nitrosomonadales* avec la famille *Nitrosomonadaceae* oxydant l'ammonium (*Nitrosospira*, *Nitrosomonas*), la famille *Gallionellaceae* ferro-oxydantes (*Gallionella*) et la famille *Spirillaceae* (*Spirillum*) (Bertrand *et al.*, 2011).

2.2.1.3. Les *Gamma-proteobacteria* :

Elle comprend le plus grand nombre de *Proteobacteria* regroupées dans 13 ordres, parmi ces ordres :

Les *Pseudomonadales* comprennent deux familles, les *Pseudomonadaceae* avec les genres *Pseudomonas*, bactéries communes des sols et des eaux, et les *Moraxellaceae* avec les genres *Moraxella*, *Acinetobacter*, rencontrés dans les sols (**Bertrand et al., 2011**).

Dans la famille des *Pseudomonadaceae*, le genre *Azotobacter* est composé de bactéries qui favorisent la croissance des plantes principalement à cause de sa capacité de fixer l'azote (**Sturz et Christie, 2003**).

2.2.1.4. Les *Firmicutes* :

Parmi les bactéries telluriques à Gram positif, les *Bacillus* sont les types les plus communs et les plus prédominants, ils représentent 95% de la flore isolée. Ce sont des bactéries aérobies ou aéro-anaérobies facultatives formant des endospores (**Bergey's, 2010a**).

Depuis la découverte de la bactérie (1913) le genre *Bacillus* a subi des changements taxonomiques considérables la réorganisation de ce genre a été initiée en 1992 par la création des 37 nouveaux genres avec *Bacillus* sont inclus dans l'ordre des *Bacillales* et la famille des *Bacillaceae* (**Govindasamy et al., 2010**).

2.2.1.5. Les *Actinobactéries* :

La majorité des espèces sont saprophytes ou commensales et principalement telluriques; quelques-unes (ex *Mycobacterium*) peuvent être pathogènes chez des individus à résistance affaiblie. Quelques-unes vivent en symbiose à l'intérieur de plantes pour lesquelles elles fixent l'azote de l'air (**Bergey's 2010a**).

2.2.1.6. Les *Bacteroidetes* :

Dans les classifications précédentes, les phylum "Bacteroidetes" a été proposé comporter trois grandes classes de bactéries, "Bacteroidia", "Flavobacteriia" et Sphingobacteriia "(**Garrity et al., 2005**), qui sont largement répandues dans l'environnement, notamment dans le sol, dans les sédiments, l'eau de mer ,etc ...(**Bergey's2010b**).

2.2.2. Mécanisme d'action des PGPR :

Les effets bénéfiques des rhizobactéries sur la croissance végétale résultent de différents mécanismes exercés par les PGPR dont les modes d'action sont directs ou indirects et peuvent varier pour un micro-organisme donné (**Gupta et al., 2000**).

Les mécanismes indirects impliquent un antagonisme contre phytopatogènes, la production des sidérophores, la production d'antibiotiques, l'influence globale et l'interaction de plusieurs traits de PGP ont des effets positifs possibles sur la promotion de la croissance des plantes (**Shamsul et al., 2008**).

Les mécanismes directs comprennent la capacité de produire des régulateurs de croissance végétale comme l'acide indole acétique (AIA), gibberellins (GAS), cytokinines (CTKS) et de l'éthylène (ETH) ...etc, et la solubilisation des nutriments minéraux tels que les phosphates (**Garcia de Salamone et Dobereiner, 1996**).

2.2.2.1. Les mécanismes indirects :

La stimulation de façon indirecte de la croissance des végétaux tout en agissant par effet antagoniste sur la microflore délétère, en se débarrassant des métabolites toxiques. Ces mécanismes sont en général, ceux qui se produisent en dehors de la plante (**Hallmann et al., 1997 ; Saharan et Nehra, 2011**) grâce à la concurrence pour les éléments nutritifs (ex ; la production des sidérophores) ou par l'induction d'une résistance systématique aux agents pathogènes (**Shahab et al., 2009**).

2.2.2.1.1. Production des sidérophores :

Les micro-organismes ont la capacité de synthétiser des composés s'appropriant les ions ferriques présents dans la rhizosphère. Bien que le fer soit l'un des minéraux les plus abondants sur terre (**Neilands et al., 1987**).

Le fer inorganique se trouve sous sa forme oxydée Fe^{3+} qui donne des composés quasi insolubles (ex: oxydes, phosphates). Pour s'en procurer, les organismes doivent produire des petites molécules capables de chélater le Fe^{3+} et qui ont une haute affinité pour cet élément à faible poids appelés sidérophores (**Gobat et al., 2010**).

Les sidérophores libérés par les PGPR chélatent le fer minéral par la formation d'un complexe soluble de fer (Fe^{3+}) à l'aide d'un récepteur spécifique situé sur la membrane cellulaire externe de la bactérie (**O'Sullivan et O'Gara, 1991 ; Briat, 1992**).

2.2.2.1.2. L'antibiose :

L'antibiose est probablement le mécanisme le plus connu et peut-être le plus important utilisé par les PGPR pour limiter l'invasion de pathogènes dans les tissus de la plante hôte. Il consiste en une inhibition directe de la croissance du pathogène via la production de métabolites aux propriétés antifongiques et/ou antibiotiques (**Peypoux et al., 1999 ; Bonmatin et al., 2003 ; Lin et al., 2005; Rahman et al., 2007**).

Ces PGPR montrent non seulement un large spectre de diversité dans le type mais également dans le nombre d'antibiotiques produits (**Raaijmakers et al., 2002; McGowan et al., 2005**). Par exemple, certaines souches de PGPR ont la capacité d'excréter des métabolites qui jouent un rôle important dans l'inactivation des facteurs de germination du pathogène ou la dégradation de leurs facteurs de pathogénicité comme les toxines (**Whipps, 2001**).

2.2.2.1.3. La production l'HCN :

L'acide cyanhydrique (HCN) est un composé volatil qui s'évapore rapidement dans l'air à des températures supérieures à 28°C et qui se dissout rapidement dans l'eau. Il peut être toxique pour les humains et les animaux et le degré de toxicité dépend de la quantité consommée (**Meena et al., 2001**). Les cyanides sont des métabolites secondaires produits dans la rhizosphère de plusieurs micro-organismes, directement à partir de la glycine ou à partir des glycosides cyanogènes (**Bakker et Schippers, 1987**).

Il est l'un des mécanismes qui aident à améliorer la production végétale par les RFCP liée à la lutte biologique, soit par induction des mécanismes de défense des plantes ou par antagonisme (**Haas et al., 1991 ; Voisard et al., 1989**).

2.2.2.2. Les mécanismes directs :

Il est maintenant clair que les diazotrophes associatifs exercent leurs effets positifs sur la croissance des plantes grâce à des mécanismes différents. Outre la fixation d'azote, les diazotrophes peuvent affecter la croissance des plantes directement qui se produisent à l'intérieur de la plante et affectent directement leurs métabolismes (**Gupta et al., 2000**), par la synthèse des phytohormones (**Somers et Vanderlyden, 2004**), et les vitamines (**Subba, 1999**), la résistance au stress améliorée (**Bashan et Bhan, 2005**) la solubilisation du phosphate (**Shamsul et al., 2008**).

Les bactéries connues par leur capacité à transformer l'azote en ammoniac qui peut être utilisé par la plante, appartiennent aussi chez les PGPR. Parce que leurs avantages

concurrentiels dans un environnement riche en carbone, pauvre en azote, les diazotrophes peuvent devenir sélectivement enrichi dans la rhizosphère (Shamsul *et al.*, 2008).

2.2.2.2.1. La solubilisation du phosphate :

Le phosphore est le cinquième élément composant de la matière vivante. C'est un élément qu'on trouve dans le sol, les plantes et les micro-organismes (Plassard *et al.*, 2015). Dans le sol il est présent sous deux formes ; sous forme organique (esters phosphoriques) et inorganique (composés minéraux insolubles) (Alexander, 1977).

La solubilisation des phosphates est la capacité des microorganismes de convertir le phosphate insoluble à une forme accessible. Ce processus permet de réduire l'utilisation d'engrais phosphatés (Chaiharn et Lumyong, 2009).

Ces microorganismes augmentent la disponibilité du phosphore pour les plantes soit par minéralisation des phosphates organiques à l'action des phosphatases (Abd-Allah, 1994 ; Halder et Chakrabartty, 1993), ou bien par la dissolution des phosphates inorganiques par l'action des acides organiques (Abd-Allah, 1994 ; Halder et Chakrabartty, 1993; Richardson, 1994).

Les bactéries rhizosphériques solubilisant le phosphate pourraient donc constituer une source prometteuse comme agent biofertilisant dans l'agriculture (Sharma *et al.*, 2007), et plusieurs études ont montré que la solubilisation du phosphore est une caractéristique importante des RFCP (Höflich *et al.*, 1995).

2.2.2.2.2. La synthèse des phytohormones :

Les régulateurs de croissance connus : l'AIA, les cytokinines, la gibberelline et l'éthylène ont une action directe sur la croissance des plantes (Noel *et al.*, 1995 ; Badenoch *et al.*, 1982). La plupart des régulateurs de croissance connus chez les végétaux supérieurs peuvent être synthétisés par des bactéries ou des champignons. L'acide indole acétique formé à partir du tryptophane est produit, ainsi que d'autres composés voisins, par un grand nombre de microorganismes rhizosphériques (Davet, 1996). La synthèse des hormones de croissance des plantes identifiées comme des phytohormones (Thuler *et al.*, 2003). Ces phytohormones sont des substances organiques connues pour influencer les processus physiologiques des plantes à très faibles concentrations. Elles sont chimiquement identiques ou analogues aux hormones synthétisées par les plantes (auxines, cytokinines et gibbérellines). Parmi ces substances, nous nous intéresserons plus particulièrement aux auxines qui semblent jouer un rôle majeur dans la phytostimulation. Parmi les auxines, l'acide

indole-3-acétique (AIA) est la plus répandue (on estime que 80 % des bactéries isolées de la rhizosphère sont capables de la synthétiser (**Patten et Glick, 2002**) et la mieux caractérisée des auxines connues. Elle est connue pour induire une stimulation de l'élongation racinaire, de la division et de la différenciation cellulaire (**Aloni et al., 2006 ; Fukaki et al., 2008**).

La biosynthèse d'autres phytohormones telles que les cytokinines, les gibbérellines, l'acide abscissique (ABA) et l'éthylène a aussi été rapportée (**Perrig et al., 2007**). Il a aussi récemment été mis en évidence qu'une production d'oxyde nitrique était responsable de la formation de racines latérales lors de l'association avec la plante (**Creus et al., 2005**).

2.2.2.2.3. Production de la 1-Amino-cyclopropane-1-carboxylate désaminase ACC :

L'éthylène est la seule phytohormone gazeuse. Il est connu pour être l'hormone des blessures, parce que sa production dans la plante peut être induite par n'importe quelle perturbation physique ou chimique des tissus (**Salisbury, 1994**). Parmi ses nombreux effets sur la croissance et le développement de la plante, la production d'éthylène peut causer l'inhibition de la croissance des racines. (**Glick et al., 1999**) ont émis, une théorie selon laquelle le mode d'action de certains PGPR serait par l'intermédiaire d'une ACC-désaminase. Cette enzyme clive l'AAC précurseur immédiat de l'éthylène. L'ACC-désaminase diminuerait la production d'éthylène au niveau des racines de la plante hôte et résulterait en leurs allongements (**Shah et al., 1998**).

2.2.2.2.4. La fixation de l'azote :

Les procaryotes sont seuls à effectuer dans la nature, plusieurs des réactions redox majeures impliquant l'azote. L'azote gazeux (N₂) est la forme la plus stable de l'azote et constituer le réservoir principal de l'azote sur terre. Cependant, seulement très peu d'organismes sont capables d'utiliser le N₂ comme source d'azote dans le processus de fixation d'azote, les formes d'azote fixé les plus facilement disponibles que sont l'ammoniac et les nitrates, dans de nombreux environnements (**Madigan et Martinko, 2007**).

La fixation biologique de l'azote par les bactéries du sol est considérée comme l'un des principaux mécanismes par lequel les plantes bénéficient de l'association microbienne (**Figueiredo et al., 2008**). Cette fixation d'azote est un processus propre aux procaryote, aérobies ou anaérobie et n'existe pas chez les eucaryote, une grande gamme de genre microbiens vivante (*Azotobacter, Azospirillum*) participent à ce processus de fixation libre les

plus importants dans des conditions aérobies et dans les conditions anaérobies sont des membres du genre *clostridium*.

1. La régulation de la croissance végétale :

Les régulateurs de la croissance des plantes sont des substances qui influent les processus physiologiques des plantes à des concentrations très faibles et modifient ou contrôlent une ou plusieurs événements métaboliques d'une plante. Ces composés produits par la plante ou par les PGPR sont appelés hormones végétales (Davies, 1995).

1.1. Les phytohormones:

La plupart des rhizobactéries produisent des hormones auxquelles les végétaux sont sensibles. Ce sont des molécules qui régulent la croissance végétale ou qui interviennent dans la communication entre individus végétaux différents et d'autres micro-organismes, ces phytohormones peuvent avoir des effets bénéfiques sur la croissance végétale et le développement des plantes (Moore, 2012), ils sont actifs en quantités infimes (Dobbelaere *et al.*, 2003).

Les hormones bactériennes stimulent le développement du système racinaire et la croissance globale de la plante grâce à la grande sensibilité des racines aux hormones (Bashan et Holguin, 1997 ; Vessey, 2003).

L'augmentation de la production des métabolites végétaux est utilisée par les bactéries pour leur propre croissance et leur implication dans les différentes symbioses, ce qui permet une relation réciproque bénéfique entre les plantes et les rhizobactéries. (Patten et Glick, 2002). Il existe cinq principaux groupes d'hormones végétales : auxines (Prinsen, 1993) représenté par l'acide indole-3-acétique (AIA) qui est le plus important du groupe des auxines (Ashrafuzzaman *et al.*, 2009), cytokinines (Tien *et al.*, 1979), gibbérellines (Bottini *et al.*, 1989), l'éthylène (Strzelczyk et Pokojaska, 1984) et l'acide abscissique (ABA) (Hopkins, 2003).

1.1.1. Les auxines :

Auxine est le nom générique qui représente un groupe de composant chimique caractérisé par sa capacité à induire l'élongation des cellules dans la région subapicale de la tige et capables de stimuler la croissance de coléoptiles ou de segments de tiges chez les plantes supérieures. Ils sont les premières hormones végétales à avoir été découvertes. (Hopkins, 2003 ; Dinesh, 2011).

En 1926, le physiologiste des plantes Frits W. Went appela cette substance chimique auxine, du grec auxein qui signifie « grandir » (Raven *et al.*, 2007), l'auxine principale est l'acide indole-3-acétique mais il existe d'autres molécules naturelles actives (Garbaye, 1994), plusieurs autres dérivés indoliques naturels parmi lesquels l'acide indole-3-butyrique

(AIB), et les auxines synthétique parmi lesquels l'acide 1-naphtalène-acétique (ANA) (**Hopkins, 2003**).

L'auxine joue un rôle crucial dans de nombreux mécanismes physiologiques et développementaux (l'embryon et du fruit), organogenèse, différenciation du système vasculaire, mise en place de l'architecture racinaire, élongation cellulaire, tropisme et dominance apicale (**Kepinski et Leyser, 2005**). De nombreuses molécules possèdent un pouvoir auxinique mais la plus abondante chez les plantes est l'acide 3-indole acétique (AIA)

1.1.1.1. L'Acide Indole-3-acétique (AIA) :

L'acide indole acétique AIA est une auxine primaire active dans la majorité des plantes, elle fonctionne comme une molécule-signal importante dans la régulation du développement des plantes (**Spaenpen et al., 2007**). Cette phytohormone est impliquée dans l'initiation de la division des cellules au niveau des racines et de leurs élargissements, il ressemble beaucoup à un acide aminé (**Salisbury, 1994**).

L'AIA est synthétisé à partir de l'indole et certains indices montrent que les plantes peuvent le produire directement à partir du tryptophane (**Raven et al., 2007**) et les exsudats des racines sont les ressources principales de tryptophane dans le sol (**Spaenpen et al., 2007**).

1.1.1.1.1. La fonction de l'acide indole-3- acétique :

C'est la principale auxine naturelle facilement dégradées par les enzymes et les microorganismes donc elle est plus intéressantes pour les applications industrielles. (**Raven et al., 2007**). Une partie de l'AIA est repris par la plante qui s'ajoute à l'AIA endogène de la plante pour stimuler la prolifération cellulaire des plantes et l'allongement racinaire (**Ahmad et al., 2005**).

L'analyse du rôle de l'AIA montre que les bactéries utilisent cette phytohormone pour établir des interactions avec les plantes dans le cadre de leur stratégie de colonisation notamment la phytostimulation et l'intervention dans les mécanismes de base de défense des plantes (**Ryan et al., 2008**).

1.1.1.1.2. Structure chimique d'AIA :

L'acide indole-3-acétique est un acide faible avec un pKa d'environ 4,85 en solution à pH neutre, l'AIA se présente sous sa forme dissociée, anionique. Il est formé d'un noyau indole et d'une courte chaîne latérale carbonée portant le groupement carboxyle.

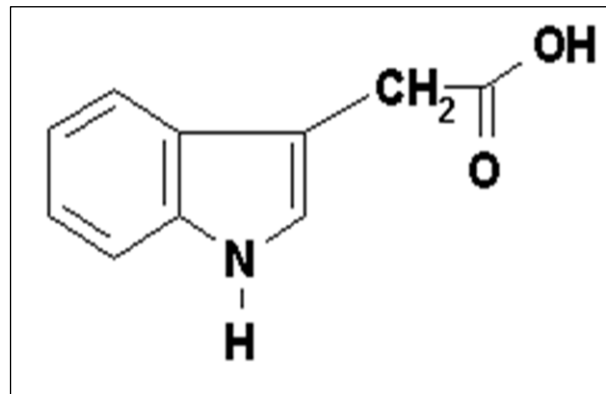


Figure 1: Structure chimique d'auxine naturelle (AIA) (Hopkins, 2003).

1.1.1.1.3. La production de l'acide indol-3-acétique par les microorganismes:

Acide indole acétique est généralement produit sous forme de métabolite secondaire par les PGPR en utilisant les substrats riches exsudés par les racines des plantes. Il est généralement produit par les PGPR en utilisant les fournitures riches en substrats exsudé à partir des racines et libère l'auxine dans la rhizosphère sous forme de métabolites secondaires.

Les PGPR sont connus exclusivement pour leur capacité de fixation d'azote mais ils sont également signalés aussi pour produire l'AIA chez les genres de *Bradyrhizobium*, *Stenotrophomonas*, *Rhizobium* et *Mesorhizobium*, ils sont produites des quantités importantes d'AIA dans des conditions *in vitro* (Antoun *et al.*, 1998 ; Wani *et al.*, 2007, 2008 ; Ahmad *et al.*, 2008). Parmi d'autres souches PGPR, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium* et deux souches de *Comamonas acidovorans* sécrètent l'AIA à des niveaux inférieurs par rapport aux bactéries délétères (Barazani et Friedman, 1999 ; Rajkumar *et al.*, 2008).

Jusqu'à présent, six voies de biosynthèse ont été identifiées dont cinq dépendent du tryptophane et l'autre est indépendante qui a besoin de la présence d'indole-3-glycérol phosphate. (Spaepen *et al.*, 2007). La biosynthèse d'AIA semble principalement à suivre deux voies principales :

La voie Indole-3-acétonitrile (IAN) a été largement étudiée dans les bactéries des plantes à l'aide des enzymes nommées AIA-nitrilases qui catalysent la conversion de IAN à AIA, ce qui indique la conversion de IAN à AIA via IAM (Kobayashi *et al.*, 1993).

La voie de tryptophane indépendante a été proposée dans les plantes parce que pas d'enzymes spécifiques ont encore été identifiés, leur existence reste insaisissable. Ils sont synthétisés à partir du tryptophane, et il a été démontré que le libre d'AIA est facilement converti en estérifié avec du sucre ou liaison amide, et que ces formes conjuguées sont les formes dans lesquelles l'AIA est stocké dans les plantes.

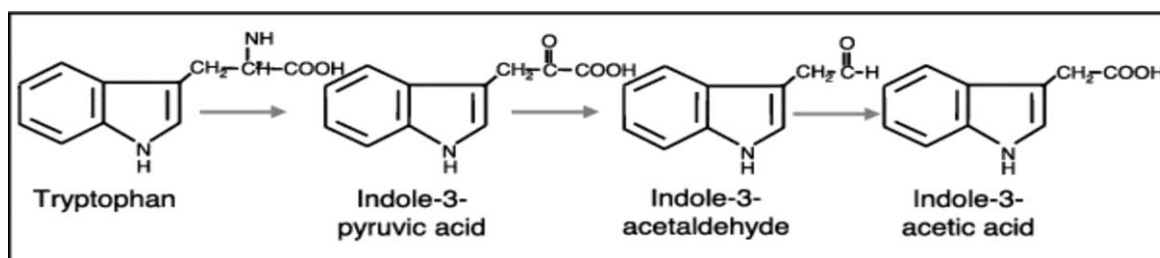


Figure 2: Biosynthèse de l'acide indole acétique (Pelmont, 1995 ; Hooykaas *et al.*, 1999).

1.1.1.1.4. Mécanisme d'action des bactéries productrices l'AIA :

Le mécanisme le plus souvent invoqué pour expliquer les effets directs des bactéries PGPR sur les plantes est la production des phytohormones, y compris AIA (Barea et Brown, 1974 ; Patten et Glick, 1996, 2002). Ces bactéries améliorent l'absorption des minéraux et des nutriments du sol par les plantes. La croissance mieux à son tour pour libérer des quantités plus élevées du carbone dans les exsudats racinaires, la libération de plus de carbone invite l'activité microbienne, et ce processus se poursuit dans un cycle d'azote (Adesemoye *et al.*, 2009 ; Dinesh, 2011).

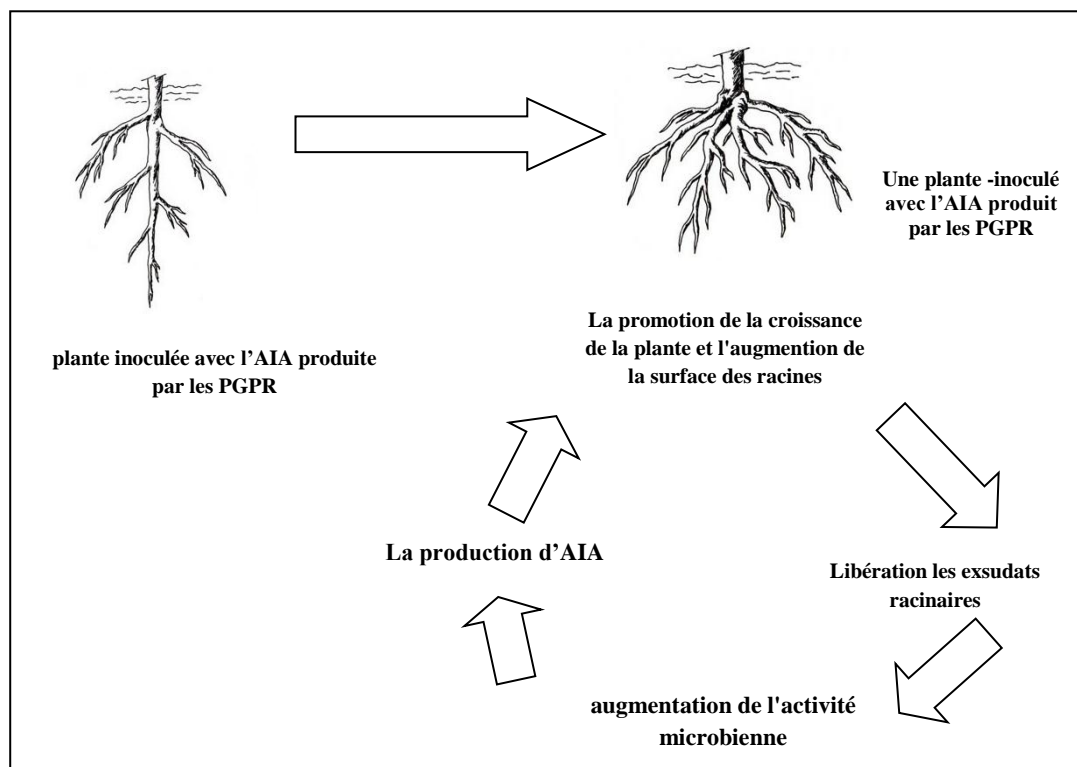


Figure 3: Mécanisme d'action des bactéries productrices l'AIA (Dinesh, 2011).

1.1.1.1.5. Les facteurs qui modifient la biosynthèse de l'AIA :

La biosynthèse d'AIA est affectée par plusieurs facteurs environnementaux. En particulier, il y a une augmentation de sa production dans des conditions de pH élevé et en présence de plus grandes quantités de tryptophane (Spaepen *et al.*, 2007).

Les facteurs qui modifient la biosynthèse d'AIA sont diversifiés et étendus. Par conséquent, ne citerons que ceux liés au stress environnemental et la signalisation des plantes (Spaepen *et al.*, 2007). Le premier groupe des facteurs comprend l'acidification, le stress osmotique de la matrice, et limitation de la source de carbone, le deuxième groupe des facteurs est intégré à des signaux chimiques produites par les plantes dans des conditions normales ou stressées. Fait intéressant, la limitation du carbone et de réduction du taux de croissance sont liés à l'état physiologique des bactéries qui arrivent à la phase de croissance stationnaire. L'AIA est produit à toutes les étapes de la croissance de la culture, mais augmente de manière significative après la phase stationnaire (Malhotra et Srivastava, 2008) avec une production d'AIA baisse dans des conditions acides (Vande Broek *et al.*, 1999).

1.1.2. Les cytokinines :

Ce sont des hormones dérivé de l'urée appeler le thidiazuron (N-phényle-N'1,2,3-thidiazol-5-y lurée), Cette molécule a été développée pour faciliter la récolte mécanique des plantes (**Tay et al., 1985**). Les cytokinines naturelles sont habituellement des adénines connectées à une chaîne latérale en 6 molécule de N avec soit un isopentenyl de cinq carbones, soit un noyau aromatique.

L'action des cytokinines se traduit par l'activation de la germination des graines, la promotion de la ramification, la croissance des racines, l'accumulation de la chlorophylle, l'expansion des feuilles et le retard de la sénescence (**Salisbury, 1994**), Elle est souvent masquée par l'interaction avec d'autres régulateurs. Il peut mimer l'effet conjoint d'une cytokinine avec l'auxine sur la croissance et la différenciation d'explants. il amène une augmentation de la croissance des plants jusqu'à 30 fois plus importante lorsqu'il est ajouté à une culture *in vitro* (**Capelle et al., 1983 ; Grondin, 2004**).

1.1.3. Gibberline :

Ce sont des acides diterpénoïques constitués de résidus isopréniques synthétisées par les plantes supérieures, les champignons (**Frey-Klett et al., 2007**) et les bactéries (**MacMillan, 2002**). Les gibbérellines sont également impliquées dans la promotion de la croissance des racines car elles régulent l'abondance des poils racinaires (**Bottini et al., 2004**), la capacité des bactéries à synthétiser ces substances a été initialement décrite chez les *Rhizobium* (**Williams et Sicardi, 1982 ; Tien et al., 1979**).

La promotion de la croissance des plantes par les PGPR productrices de gibbérellines est rapportée par plusieurs travaux et cet effet positif sur la biomasse végétale est souvent associé à une teneur accrue en gibbérellines dans les tissus végétaux (**Atzhorn et al., 1988 ; Gutierrez-Manero et al., 2001 ; Joo et al., 2009**).

1.1.4. Éthylène :

L'éthylène est une hormone importante dans la croissance et le développement des plantes (**Burg, 1962**). C'est un gaz volatil qui se propage par diffusion et synthétisé à partir de la méthionine. Il est le seul hydrocarbure ayant un effet prononcé sur les plantes. L'auxine et les cytokinines sont des protagonistes importants pour la production de l'éthylène et ils agiraient avec une certaine synergie (**Gaspar et al., 1996**). En raison de son état gazeux dans des conditions physiologiques, pendant une longue période, il n'a pas été acceptée comme une phytohormone, mais diverses études ont montré que la synthèse et de l'action était critique pour certains processus physiologiques (**Dinesh, 2011**). La molécule d'éthylène est très simple

et symétrique, composée de deux atomes de carbone (reliés par une double liaison) et de quatre atomes d'hydrogène (Archad et Frankenberger, 1993).

1.1.5. L'acide abscissique ABA :

Au cours des années 1960, Frederick T. Addicott signalé la découverte dans les feuilles et les fruit d'une substance capable d'accélérer l'abscission, qu'il appela abscissine. On désigne aujourd'hui cette substance sous le nom d'acide abscissique (ABA).

L'ABA a été démontré comme étroitement liés à la résistance, il contrôlerait ainsi la pénétration des feuilles par les bactéries via à une voie de signalisation dans les cellule de garde des stomates pour activer l'ouverture et la fermeture (Raven *et al.*, 2000).

Plusieurs bactéries sécrètent l'acide abscissique à faibles concentrations dans les cultures par ex : *Azospirillum* (Kolb et Martin, 1985 ; Iosipenko et Ignatov, 1995). Ce composé, produit lorsque les bactéries ont été cultivées dans le milieu qui contient le nitrate (Zimmer et Bothe, 1988 ; Zimmer *et al.*, 1988).

1. Effet de la composition du milieu de culture :

1.1. Effet des différentes sources de carbone sur la production de l'AIA :

L'effet des différentes sources de carbone sur la capacité des isolats bactériens à produire l'AIA a été étudié en utilisant plusieurs sources de carbones dans le milieu de culture.

Le tableau1, montre que les concentrations produites d'AIA en fonction de différentes sources de carbone varient de $5,66 \pm 0,20^f$ $\mu\text{g/ml}$ à $46,97 \pm 3,10^a$ $\mu\text{g/ml}$ où les valeurs maximales ont été obtenu en utilisant l'acide malique comme source de carbone avec des taux de $45,56 \pm 1,66^a$ $\mu\text{g/ml}$ et $46,97 \pm 3,10^a$ pour les isolats S_1 et S_2 respectivement.

Ainsi des concentrations importantes d'AIA ont été produites par les deux isolats S_1 et S_2 avec le glucose, par ailleurs des faibles concentrations ont été obtenu en utilisant le lactose, le fructose, le saccharose, le maltose et le mannitol.

Tableau 1: Effet des différentes sources de carbone sur la production de l'AIA par les isolats S_1 et S_2 .

Source de carbone	Acide malique	Lactose	Fructose	Glucose	Saccharose	Mannitol	Maltose
[AIA] $\mu\text{g/ml } S_1$	$45,56 \pm 1,66^a$	$13,38 \pm 0,70^d$	$9,14 \pm 0,28^e$	$22,15 \pm 0,24^b$	$16,18 \pm 1,89^c$	$5,66 \pm 0,20^f$	$5,77 \pm 0,91^f$
[AIA] $\mu\text{g/ml } S_2$	$46,97 \pm 3,10^a$	$8,03 \pm 1,37^d$	$6,52 \pm 1,07^d$	$24,44 \pm 1,19^b$	$20,49 \pm 1,62^c$	$8,52 \pm 0,97^d$	$6,29 \pm 0,68^d$

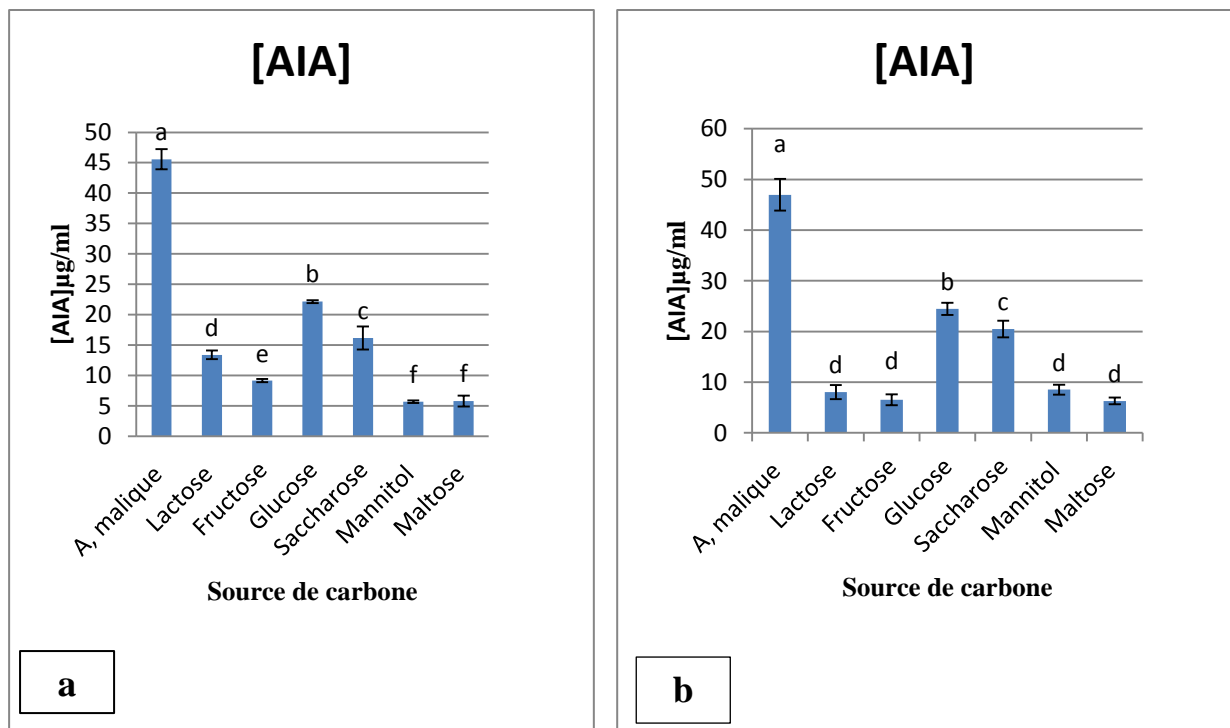


Figure 6 : Effet de différentes sources de carbone sur la production de l’AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

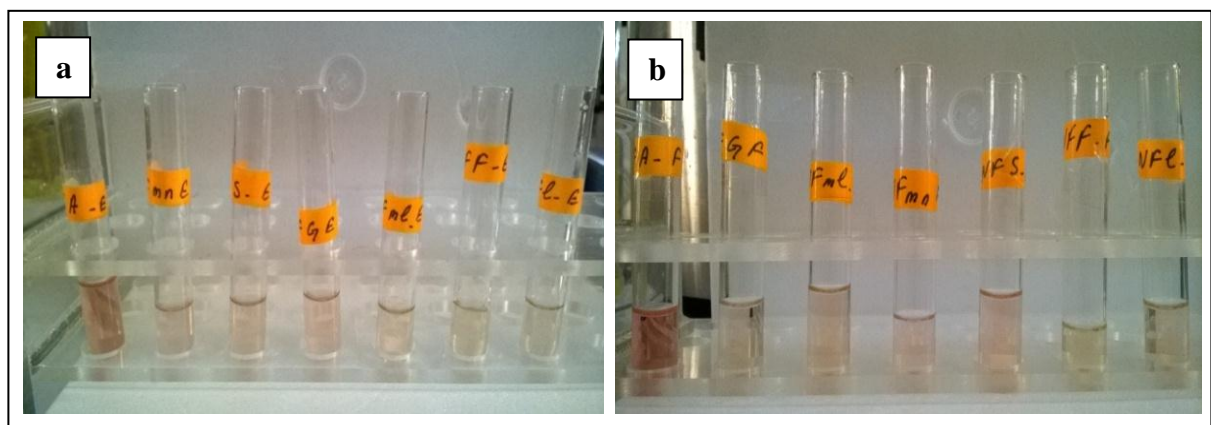


Figure 7: Effet des différentes sources de carbone sur la production de l’AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

1.2. Effet des différentes sources d’azote sur la production de l’AIA :

Plusieurs sources d’azote ont été testées pour optimiser la production de l’AIA par les isolats dans le milieu de culture.

Le tableau 2, indique la production d’AIA en fonction de différentes sources d’azote. Les meilleurs concentrations produites ont été obtenues en utilisant le NH₄Cl avec 51,76± 0,74^a µg/ml et 44, 25±3,20^a µg/ml pour les isolats S₁ et S₂ respectivement.

Des concentrations assez faibles ont été obtenues avec l'urée suivie de caséine et de NaNO_3 chez l'isolat S_1 , mais chez l'isolat S_2 les quantités de l'AIA obtenues ont été classées selon la source d'azote utilisée comme suit : caséine, urée et NaNO_3 .

Donc, les résultats précédant ont montré que la source d'azote le plus approprié pour la production d'AIA est le NH_4Cl chez les deux isolats.

Tableau 2: Effet de différentes sources d'azote sur la production de l'AIA par les isolats S_1 et S_2 .

Source d'azote	NH_4Cl	NaNO_3	Urée	Caséine
[IAA] $\mu\text{g/ml}$ S_1	51,76 \pm 0,74 ^a	7,55 \pm 0,32 ^c	16,88 \pm 0,45 ^b	8,48 \pm 0,38 ^c
[IAA] $\mu\text{g/ml}$ S_2	44,25 \pm 3,20 ^a	3,55 \pm 0,33 ^c	11,46 \pm 0,93 ^b	12,79 \pm 0,76 ^b

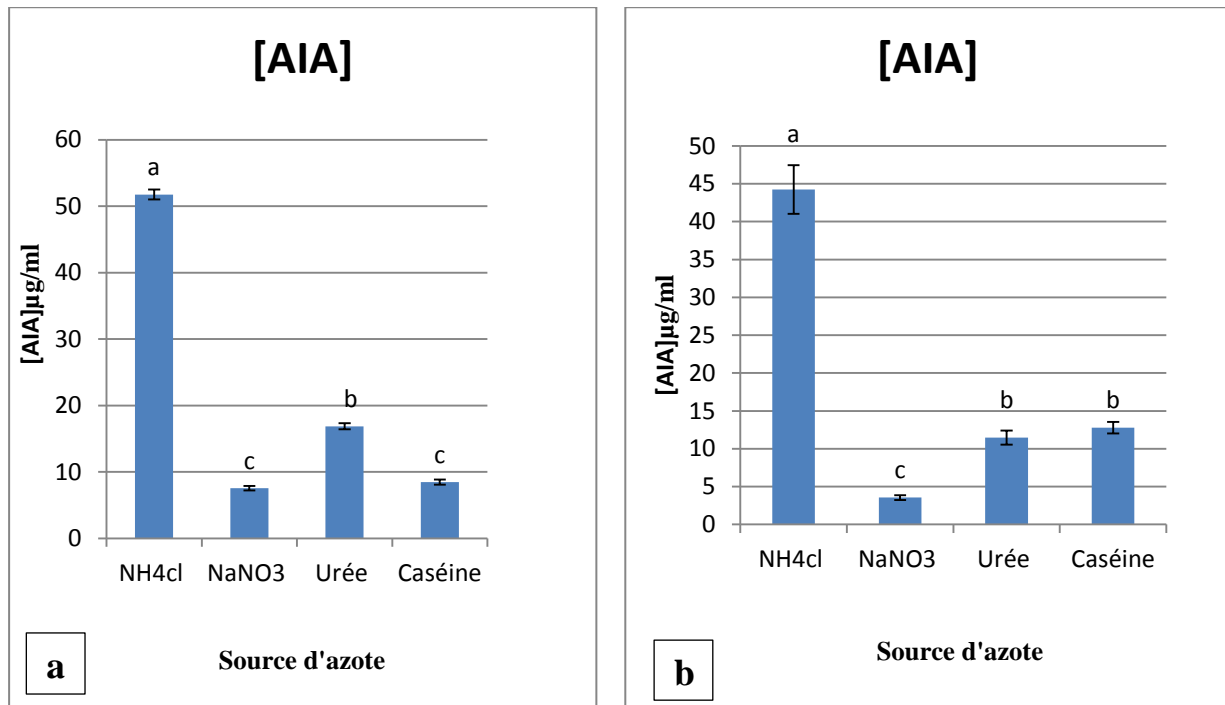


Figure 8 : Effet de différentes sources d'azote sur la production de l'AIA, a : isolat S_1 , b : isolat S_2 .

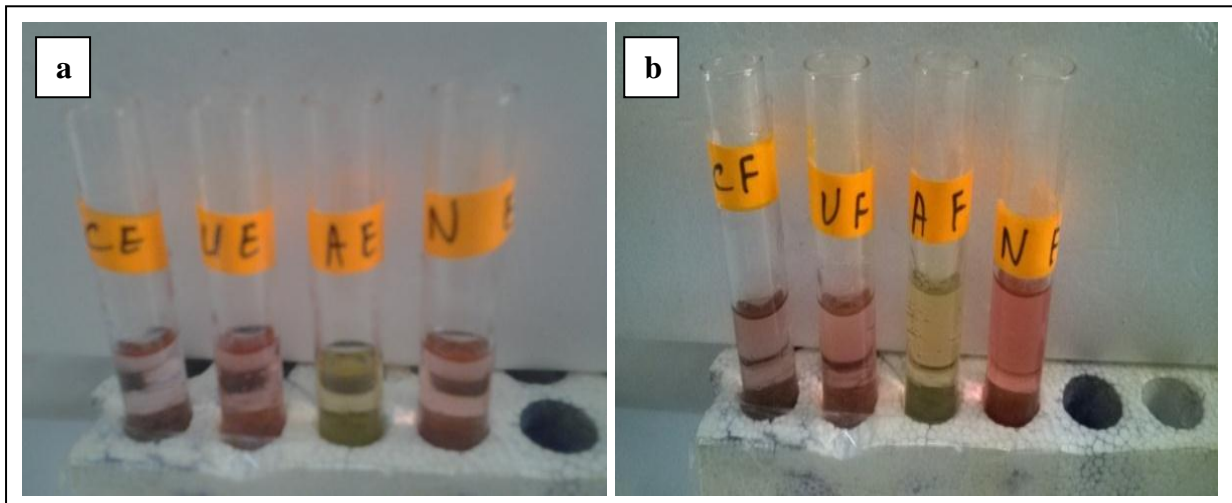


Figure 9 : Effet de différentes sources d'azote sur la production de l'AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

2. Effet des conditions de culture sur la production de l'AIA :

Différentes conditions de culture ont été variées pour optimiser la production de l'AIA par les isolats bactériens.

2. 1. Effet du pH sur la production de l'AIA :

L'effet de différentes valeurs du pH dans un intervalle variant entre 5 à 8 sur la capacité des isolats à produire l'AIA a été testé.

Le tableau 3, montre que les quantités de l'AIA produites par les deux isolats varient entre 15,77 à 47,24 µg/ml et les quantités les plus élevées ont été observées à pH 6 avec $45,882 \pm 3,968^a$ µg/ml et $47,24 \pm 6,072^a$ µg/ml pour les isolats S₁ et S₂ respectivement.

Des concentrations plus faibles d'AIA ont été obtenues à pH 7 et 8 avec un minimum de production à pH 5,0 chez l'isolat S₁, par contre la production de cette auxine par l'isolat S₂ a été plus élevée à pH 5 par rapport à S₁ suivi par pH de 7 et 8.

Tableaux 3: Effet de différentes valeurs du pH sur la production de l’AIA par les isolats S₁ et S₂.

pH	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8
[IAA] µg/ml S ₁	15,77±1,22 ^c	45,88±3,96 ^a	36,78±1,59 ^b	32,76±0,79 ^b
[IAA] µg/ml S ₂	33,28±3,29 ^b	47,24±6,07 ^a	36,58±4,22 ^b	29,35±0,77 ^b

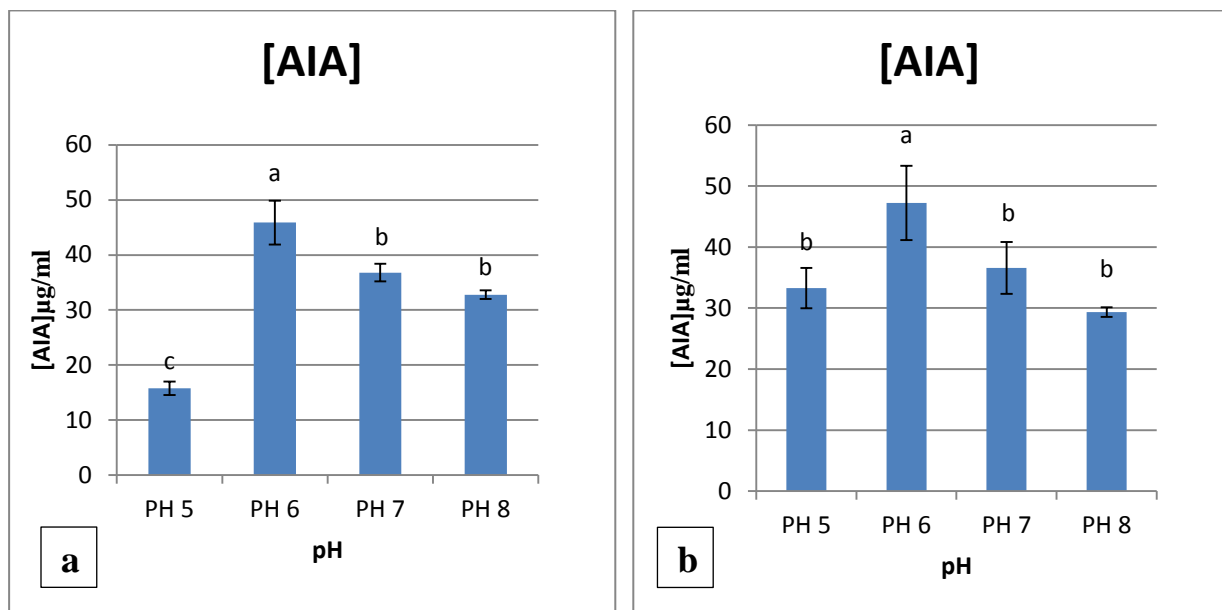


Figure 10 : Effet de différentes valeurs de pH sur la production de l’AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

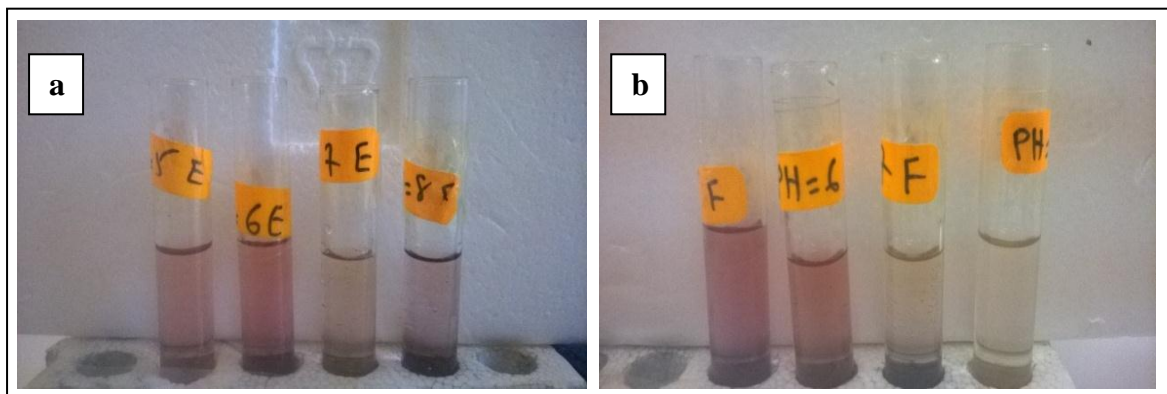


Figure 11 : Effet de différentes valeurs du pH sur la production de l’AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

2.2. Effet de la température sur la production de l'AIA :

L'effet de différentes températures (25, 30, 35 et 40° C) sur la production d'AIA a été représenté dans le tableau 4 et les figures suivantes.

La température d'incubation apparaît comme un facteur agissant sur la capacité des isolats à produire l'hormone de la croissance végétale AIA.

Pour les deux isolats étudiés la température 30°C était optimale pour la production de l'AIA avec des taux de $46,43 \pm 3,01^a$ µg/ml et $47,24 \pm 6,07^a$ µg/ml par l'isolat S₁ et S₂ respectivement. Des valeurs faibles de quantités d'AIA produites par les deux isolats ont été constatées à températures de 35°C suivi par 40 et 25°C.

Tableau 4 : Effet de température sur la production de l'AIA chez les isolats S₁ et S₂.

Température	25°C	30°C	35°C	40°C
[IAA] µg/ml S ₁	13,20±0,80 ^c	46,43±3,01 ^a	16,44±2,26 ^c	29,18±3,07 ^b
[IAA] µg/ml S ₂	12,02 ± 1,6 ^c	47,24 ± 6,07 ^a	29,35 ± 0,86 ^b	23,28 ± 2,45 ^b

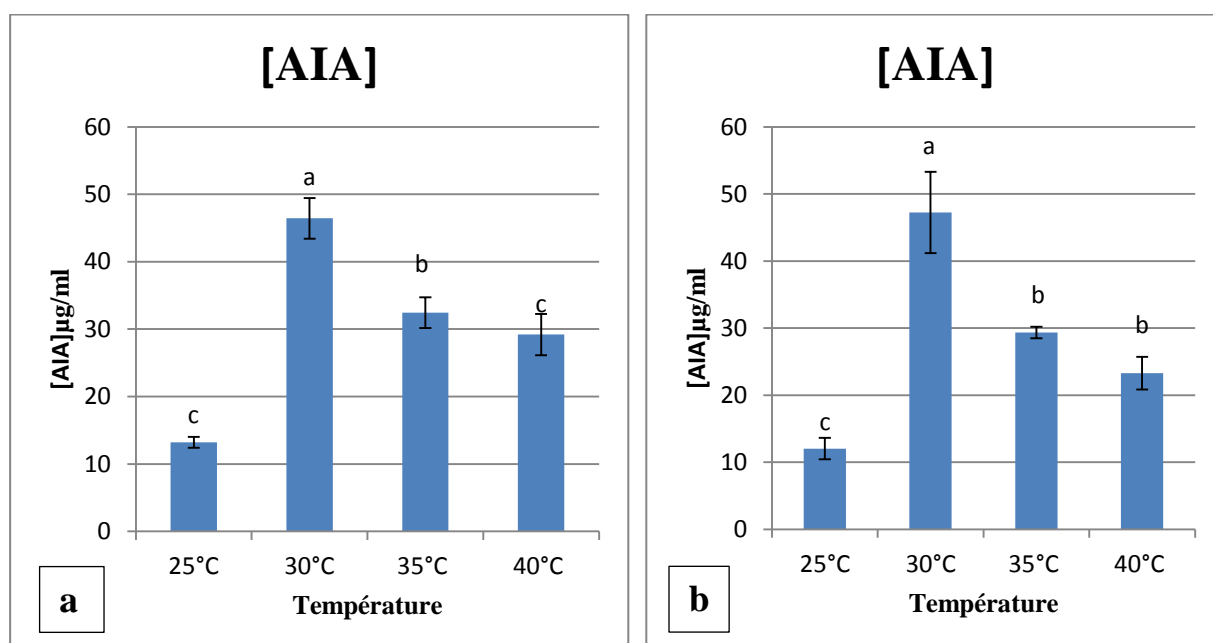


Figure 12: Effet de différentes températures sur la production de l'AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

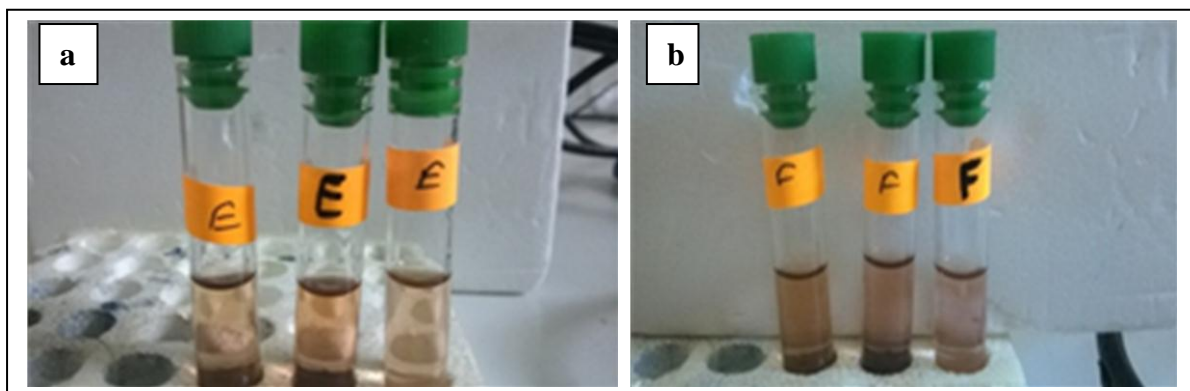


Figure 13 : Effet de température 25 °C sur la production de l'AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

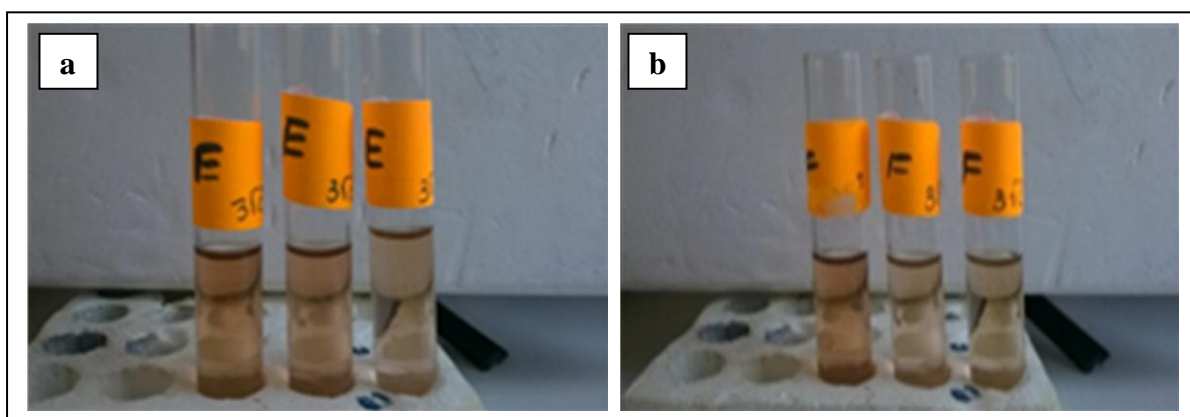


Figure 14 : Effet de température 35 °C sur la production de l'AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

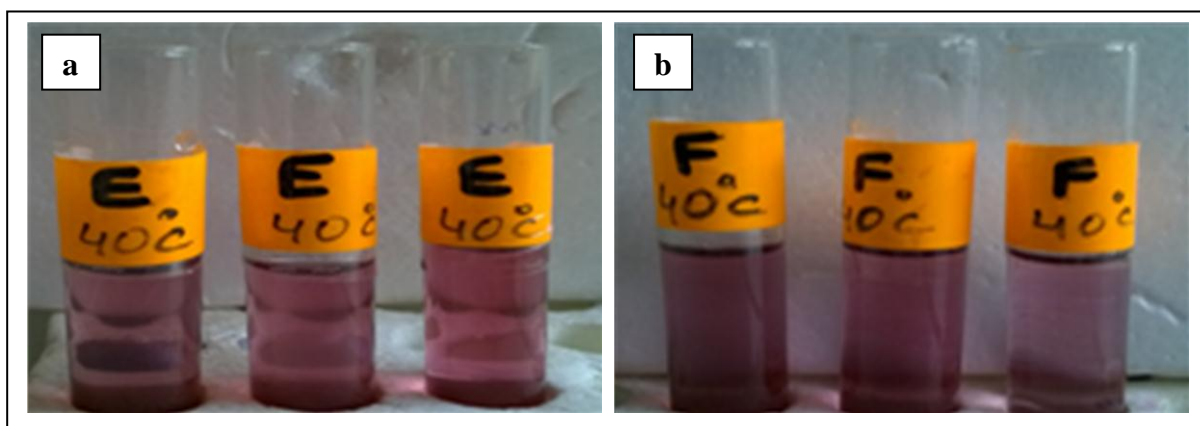


Figure 15 : Effet de température 40 °C sur la production de l'AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

2.3. Effet du temps d'incubation sur la production de l'AIA :

La production de l'AIA et la croissance bactérienne des isolats utilisés ont été évaluées en fonction du temps d'incubation.

Les valeurs de la densité optique enregistrées chez les deux isolats bactériens augmentent progressivement en fonction du temps d'incubation variant entre $0,22 \pm 0,07$ et $1,30 \pm 0,02$. Ces valeurs atteignent le maximum après le dixième jour d'incubation ce qui correspond à un maximum de croissance avec $1,26 \pm 0,01$ et $1,30 \pm 0,02$ chez les isolats S_1 et S_2 respectivement.

Par contre les quantités de l'AIA produites par les deux isolats bactériens atteignent un maximum après le sixième jour d'incubation avec des taux de $36,32 \pm 1,57$ $\mu\text{g/ml}$ et $33,66 \pm 1,64$ $\mu\text{g/ml}$ chez S_1 et S_2 respectivement. Une diminution remarquable des taux de l'AIA produites par les isolats a été enregistrée du huitième au dixième jour d'incubation avec les valeurs les plus faibles. D'après les résultats obtenus il est remarquable qu'il n'existe pas de corrélation entre la croissance bactérienne et la production de l'AIA par les deux isolats.

Tableau 5 : effet de la durée d'incubation sur la croissance bactérien et la production de l'AIA ($\mu\text{g/ml}$) par les isolats S_1 et S_2 .

		2 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour	6 ^{ème} jour	8 ^{ème} jour	10 ^{ème} jour
Isolat S_1	[IAA] $\mu\text{g/ml}$	$14,08 \pm 1,56^d$	$29,98 \pm 1,76^b$	$36,32 \pm 1,57^a$	$27,74 \pm 1,28^c$	$16,55 \pm 1,09^d$
	DO 620nm	$0,22 \pm 0,07^c$	$0,47 \pm 0,04^d$	$0,71 \pm 0,01^c$	$0,88 \pm 0,02^b$	$1,26 \pm 0,01^a$
Isolat S_2	[IAA] $\mu\text{g/ml}$	$14,68 \pm 1,56^d$	$26,10 \pm 0,86^b$	$33,66 \pm 1,64^a$	$22,50 \pm 2,30^c$	$12,16 \pm 0,56^c$
	DO 620nm	$0,44 \pm 0,05^e$	$0,77 \pm 0,03^d$	$0,92 \pm 0,02^c$	$1,13 \pm 0,06^b$	$1,30 \pm 0,02^a$

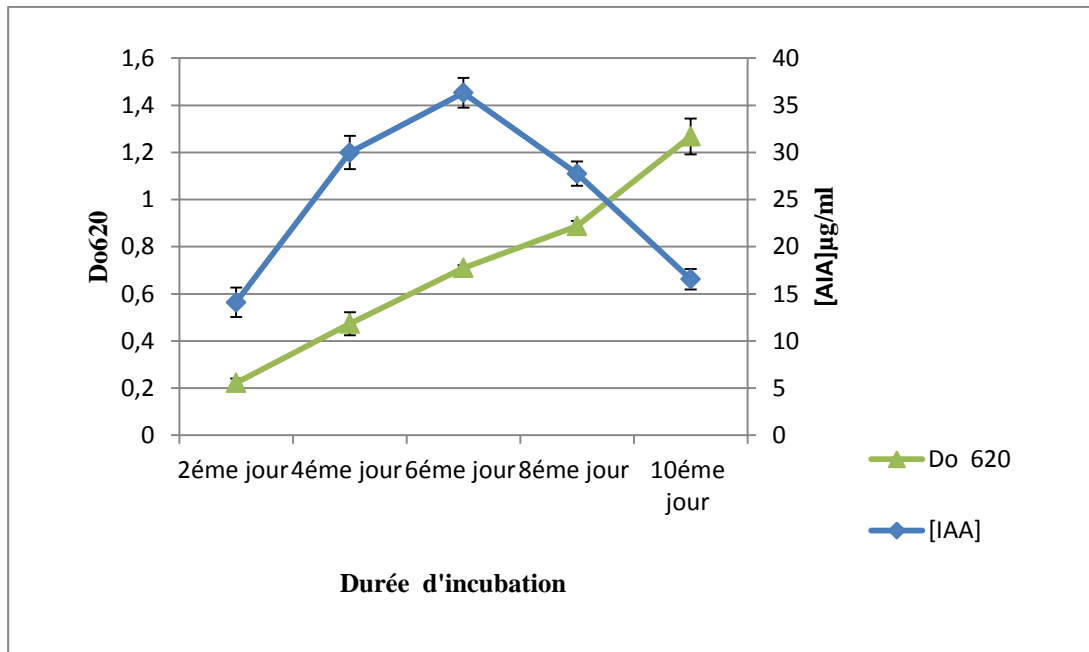


Figure 16: Effet de la durée d'incubation sur la croissance et la production de l'AIA chez l'isolat S₁.

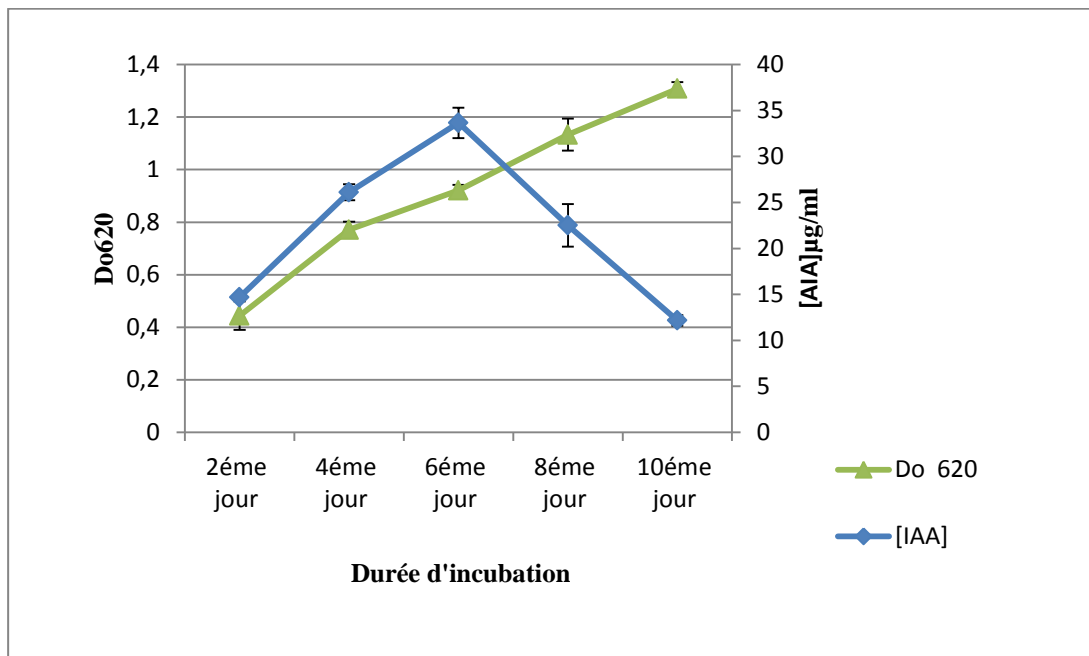


Figure 17 : Effet de la durée d'incubation sur la croissance et la production de l'AIA chez l'isolat S₂.

3. Effet de la concentration du tryptophane sur la production de l'AIA:

La capacité des isolats bactériens à produire l'AIA a été testée en utilisant des concentrations croissantes de tryptophane (0, 100, 200, 400, 600, 800 et 1000 mg/l).

Les taux de l'AIA produits par les deux isolats bactériens varient entre $2,16 \pm 0,14$ $\mu\text{g/ml}$ et $68,95 \pm 3,42$ $\mu\text{g/ml}$ en fonction de la concentration de tryptophane. Les quantités de l'AIA les plus élevées ont été obtenues avec une concentration de 1000mg/l de tryptophane avec $68,95 \pm 3,42$ $\mu\text{g/ml}$ et $62,64 \pm 0,84$ $\mu\text{g/ml}$ chez S_1 et S_2 respectivement. Il est remarquable que les taux de production de l'AIA par les deux isolats augmente avec l'augmentation de la concentration du tryptophane par contre en absence de celui-ci des taux très bas ont été enregistrés par les deux isolats par rapport à sa présence.

Dans le même sens, nos résultats nous ont permis de constater une corrélation positive entre la quantité du L-tryptophane et la production d'AIA par les deux isolats bactériens.

Tableau 6 : Effet de différentes concentrations du tryptophane sur la production de l'AIA chez l'isolat S_1 et S_2 .

Tryptophane (mg/l)	0	200	400	600	800	1000
[IAA] $\mu\text{g/ml}$ S_1	$2,87 \pm 0,19^e$	$39,84 \pm 0,50^d$	$54,79 \pm 2,81^c$	$59,51 \pm 2,79^b$	$62,78 \pm 1,21^b$	$68,95 \pm 3,42^a$
[IAA] $\mu\text{g/ml}$ S_2	$2,16 \pm 0,14^f$	$45,15 \pm 0,75^e$	$54,31 \pm 0,42^d$	$55,84 \pm 0,37^c$	$58,92 \pm 0,24^b$	$62,64 \pm 0,84^a$

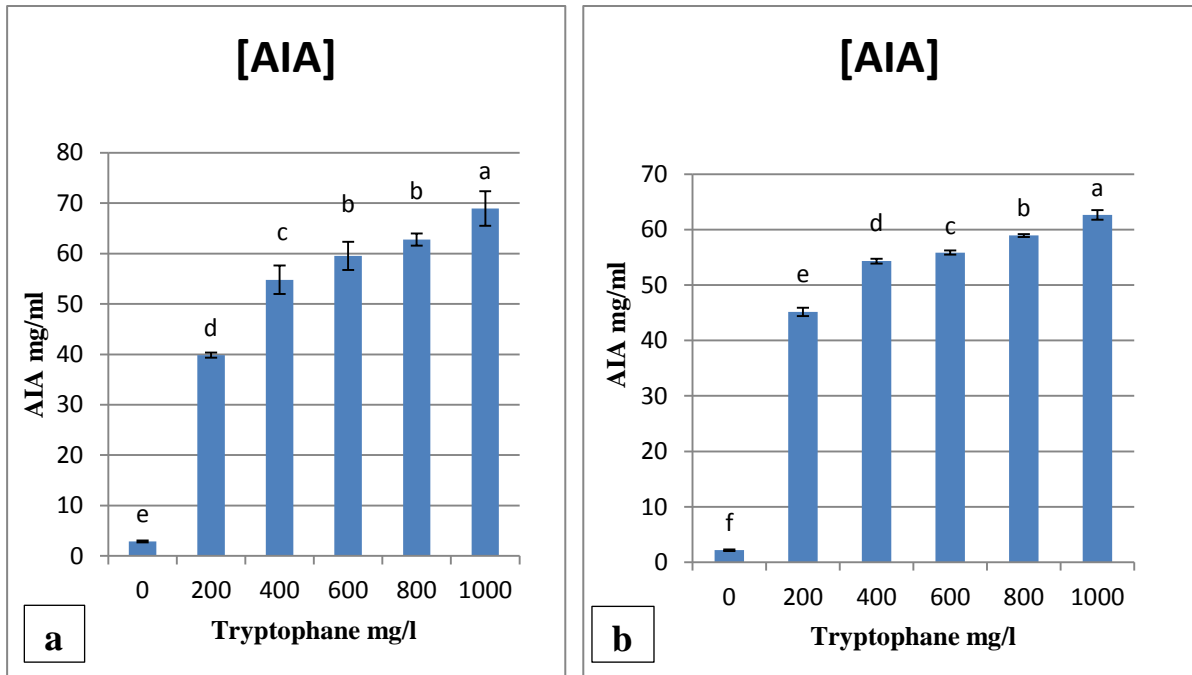


Figure 18 : Effet de différentes concentrations du tryptophane sur la production de, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

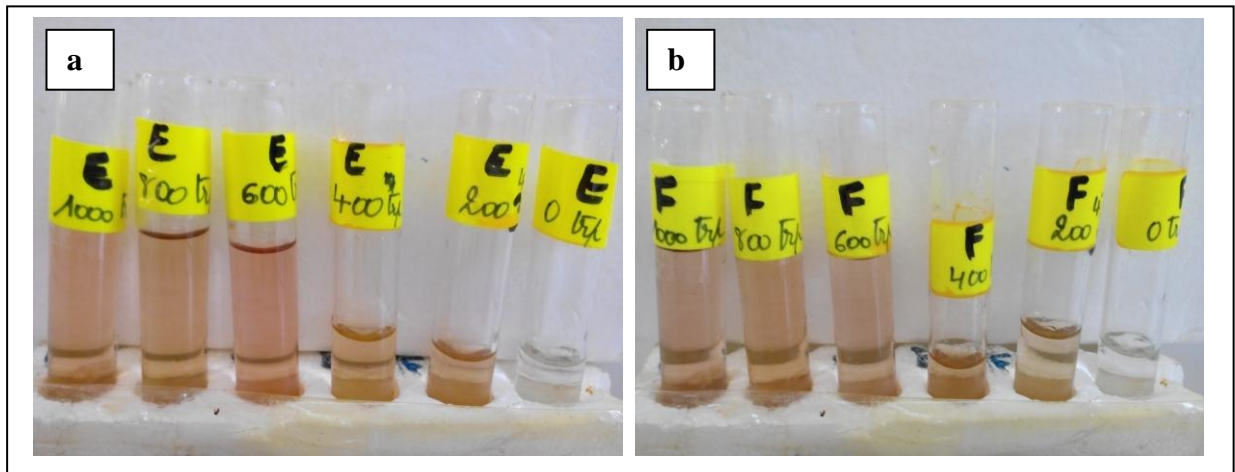


Figure 19: Effet de différentes concentrations du tryptophane sur la production de l'AIA, a : isolat S₁, b : isolat S₂.

Discussion

L'acide indole acétique, un membre du groupe de phytohormones, est généralement considéré comme étant la plus importante auxine native (Lindow *et al.*, 1998 ; Datta et Basu, 2000).

L'optimisation des conditions de culture de deux isolats de *Stenotrophomonas maltophilia* « S₁ » et « S₂ », pour l'amélioration de leurs capacités de produire d'AIA a été étudiée.

Les travaux de Bastian *et al.*, (1998) montrent que la synthèse d'AIA nécessite la présence d'une source de carbone et une source d'azote dans le milieu de croissance.

L'effet des sources de carbone a révélé des résultats variables dont les quantités de l'AIA produites par les deux isolats bactériens sont dépendantes de la source de carbone. Les deux isolats ont montré une production maximale d'AIA dans le milieu contenant l'acide malique comme source de carbone avec 45,56µg/ml et 46,97 µg/ml pour les isolats S₁ et S₂ respectivement représenté dans la figure (7), ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Omay *et al.*, (1993). pH

Notre travail montre que le NH₄Cl était la meilleure source d'azote contenant dans le milieu optimisé pour la production d'AIA avec 51,76± 0,74^a µg/ml et 44, 25±3,20^a µg/ml pour les isolats S₁ et S₂ respectivement représentée sur la figure (9), des résultats similaires ont été obtenus par Sridevi et Mallaiah (2007). Nita *et al.*, (2011) a révélé que parmi les sources d'azote testées le NH₄Cl a été le plus approprié pour une meilleure production d'AIA.

La production d'AIA a atteint son maximum à pH=6 avec des concentrations d'AIA de 45,88µg/ml pour l'isolat S₁ et 47, 24 µg/ml pour l'isolat S₂ représentée sur les figures (10), ce sont des résultats similaires à ceux obtenus par Malhotra et Srivastava (2008) et Acuna *et al.*, (2011).

Sasirekha *et al.*, (2012) ont réalisé une comparaison directe entre les modifications du potentiel de pH, et la production d'AIA, les valeurs de l'AIA ont augmenté progressivement de pH=5 jusqu'à l'optimum à pH=6 dans le milieu, la biosynthèse la plus élevée d'AIA a été déterminée aux pH=6 à des concentrations suffisamment importantes.

Après la lecture des résultats à différents degrés de température d'incubation dans l'intervalle de 25 °C à 40 °C. Nous avons constaté que la température optimale pour la biosynthèse d'AIA était à 30 °C avec $46,43 \pm 3,01 \mu\text{g}/\text{m}$ pour l'isolat S₁ et avec un taux de $47,24 \pm 6,07 \mu\text{g}/\text{ml}$ pour l'isolat S₂ représentée sur la figure (12), ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Khamna *et al.*, (2010).

Nita *et al.*, (2011) ont rapporté l'effet de la température sur la production de l'AIA ou ils ont trouvé que la température optimale pour cette production était à 30 °C.

Il est clair que la production d'AIA par les deux isolats a augmentée progressivement avec l'augmentation de la période d'incubation et atteint un maximum après 6 jours. En outre, la croissance bactérienne a augmenté progressivement avec le temps pour atteindre un maximum au bout de 10 jours d'incubation représentée sur les figures (16,17), des mêmes résultats ont été obtenus par Abd-Allah (2013).

Dasri *et al.*, (2014) ont obtenus les mêmes résultats, pour la production d'AIA a commencé après 2 jours d'incubation et atteint le maximum de production à 6^{ème} jours suivi par une diminution jusqu'à 10^{ème} jours d'incubation.

La production d'AIA différencier par l'augmentation des valeurs de production jusqu'à 6^{ème} jours suivi par une diminution en parallèle des taux de croissance de la culture bactérienne qui augmente jusqu'à 10 jours d'incubation. Selon les constatations de Datta et Basu (2000), la phase de la croissance bactérienne où il commence la produire d'AIA est le début de la croissance avec un maximum au démarrage de la phase stationnaire.

Aussi Yadav (2013) a rapporté que les bactéries ont commencé à produire l'AIA au début de sa croissance et atteint au maximum au démarrage de la phase stationnaire dans l'obscurité après 6 jours d'incubation, puis décroissante lentement d'AIA. Cette diminution peut être due à une libération des enzymes dégradant l'AIA tels que AIA oxydase et la peroxydase.

Mirza *et al.*, (2001) a été rapporté que la production d'AIA par les rhizobactéries promotrice la croissance des plantes peut varier entre les différentes espèces et elle est également influencée par l'état de la culture et le stade de croissance.

Nous avons remarqué que la capacité d'isolats à produire l'AIA en absence et en présence de L-tryptophane. Leur production améliorer avec l'augmentation de la concentration du tryptophane ces résultats sont démontré par El- Khawas et Adachi (1999), Tien *et al.*, (1979) et Karnwal (2009).

Dans cette étude, nous avons constaté que la concentration de tryptophane optimale pour la biosynthèse d'AIA était à 1000 mg/l par $68,95 \pm 3,42^a$ $\mu\text{g/ml}$ et $62,64 \pm 0,84^a$ $\mu\text{g/ml}$ pour les isolats S₁ et S₂ respectivement représentée sur la figure (18), qui montre une bonne corrélation entre les différentes concentrations de L-tryptophane et la production d'AIA, ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Mutluru et Konada (2007), Lee *et al.*, (2004).

La production d'auxine par les bactéries augmente lorsque le milieu de culture est additionné avec le précurseur le plus approprié, comme le tryptophane pour la production d'AIA, cette production s'améliore avec l'augmentation de la concentration du précurseur (**Barazani et Friedman, 2000**).

L'espèce de *Stenotrophomonas maltophilia* est un modèle de production d'acide indole acétique par multitude facteurs et à des fortes rentabilités dit par Liba *et al.*, (2006), leur production à une valeur maximale de 68,95 $\mu\text{g/ml}$ pour l'isolat S₁ qui apparaît le plus efficace pour la production d'acide indole acétique.

Les quantités d'AIA produites varient entre 2,16 $\mu\text{g/ml}$ et 68,95 $\mu\text{g/ml}$ et ils ont augmenté de manière significative en fonction des isolats testés avec différent conditions de culture.

1. Les isolats bactériens :

Dans cette étude, deux isolats S_1 et S_2 ont été utilisés, elles ont été identifiées comme : *Stenotrophomonas maltophilia*, les deux isolats ont été fournis par le laboratoire de microbiologie et biologie végétale de l'université de Mostaganem.

2. Milieux de cultures utilisés :

Le milieu de culture qui a été utilisé pour permettre la croissance des isolats dans les différents tests décrit dans cette étude est le milieu NF (**Krieg et Döbereiner, 1984**). C'est un milieu spécifique pour les deux bactéries rhizosphériques qui a été utilisé pour leur isolement à partir du sol salin.

3. Estimation de la production d'AIA :

La production de l'AIA a été déterminée en utilisant la méthode décrite par **Loper et Scroth (1986)** représenté dans la figure (4).

3.1. Préparation de l'inoculum :

Pour la préparation de l'inoculum, des tubes à essai contenant 10 ml d'eau physiologique ont été inoculés par quelques colonies bactériennes préalablement réactivé (culture jeune de 18-24h) pour préparer une suspension bactérienne où sa densité optique a été ajustée à 1, 5 à 620 nm en utilisant un spectrophotomètre UV- visible (**Kumar et al., 2001**).

3.2. Ensemencement et incubation :

Des flacons de 250 ml contenant 50 ml de milieu de culture ont été inoculés avec 1ml de l'inoculum ($DO_{620}=1,5$). Les cultures bactériennes ont été incubées à 30° C pendant 4 jours dans un agitateur rotatif à 160 rpm.

3.3. Dosage de l'AIA :

Après l'incubation, les cultures bactériennes ont été centrifugées à 6000 rpm pendant 20 min ensuite 1ml du surnageant a été ajouté à 2 ml de réactif de Salkowski (**Annexe**) et 2 gouttes d'acide ortho phosphoriques. Le mélange a été incubé à 30°C pendant 30 min à l'obscurité. L'absorbance des différentes solutions a été mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible à une longueur d'onde de 530 nm.

La quantité d'AIA produite a été calculée à partir de l'équation de régression d'après la courbe d'étalonnage.

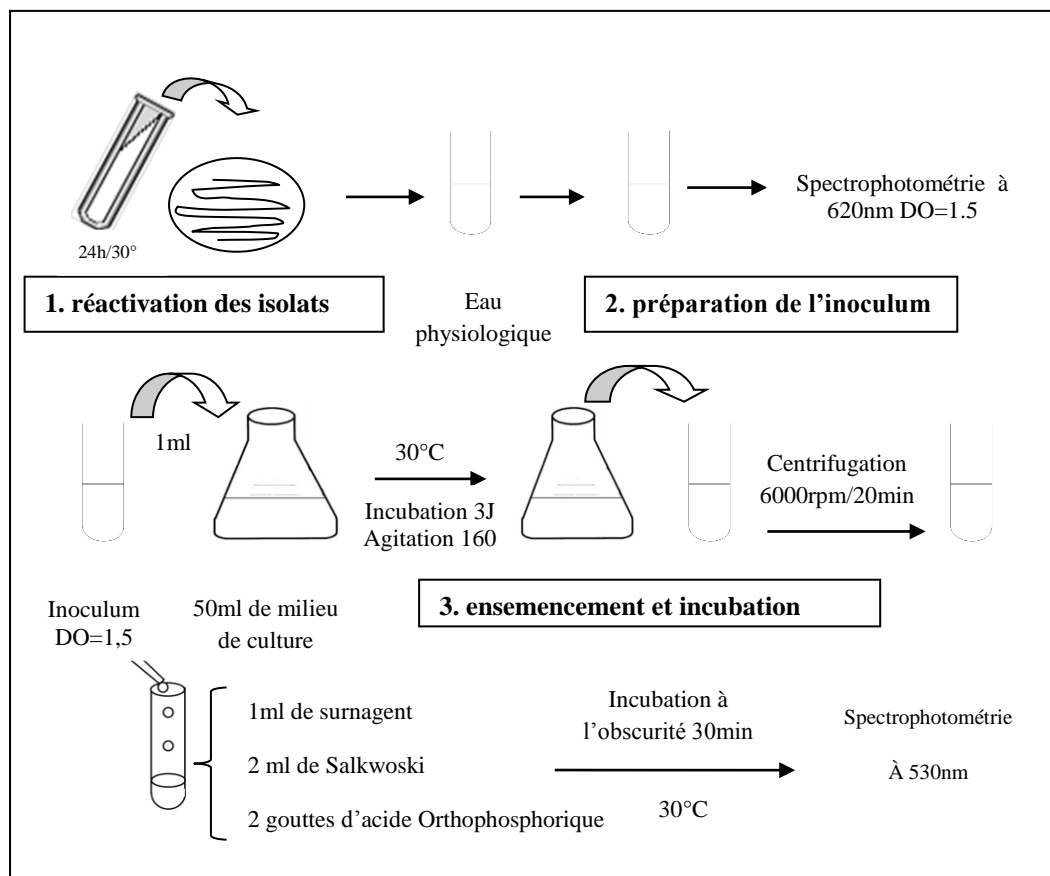


Figure 4 : Estimation de la production d'AIA.

3.4. La courbe d'étalonnage de l'AIA :

L'estimation quantitative de l'AIA est effectuée en utilisant une courbe d'étalonnage préparée par des concentrations croissantes du AIA (Sigma-Aldrich), dans un intervalle de 0 à 100 mg/l (Figure 5).

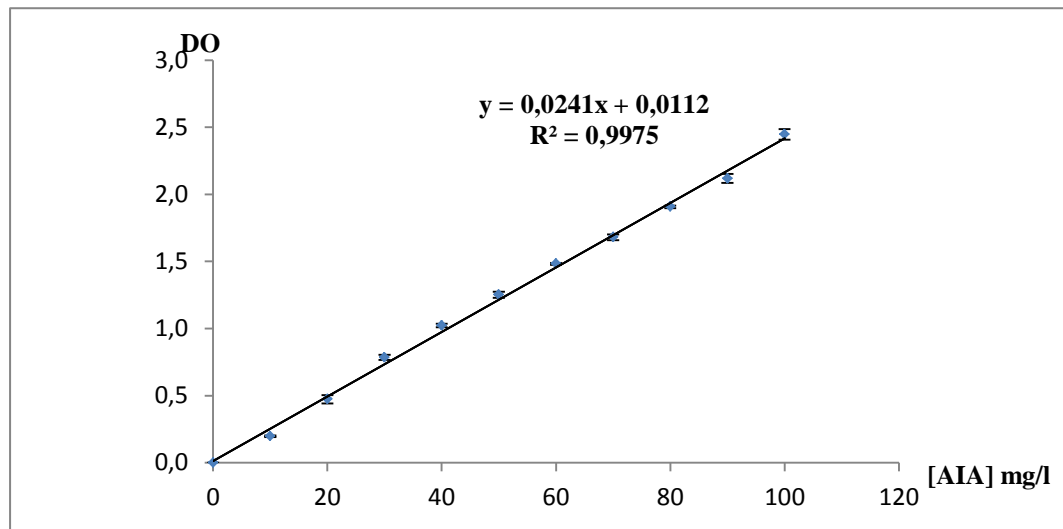


Figure 5: Courbe étalonnage de l'AIA.

4. Optimisations de la production de l'AIA :

L'optimisation de la production d'AIA a été répartie en optimisation de la composition de milieu de culture, en optimisation de conditions de culture favorisant la production d'AIA et enfin la concentration du tryptophane.

4.1. Effet de la composition de milieu de culture sur la production de l'AIA :

4.1.1. Effet des différentes sources de carbone sur la production de l'AIA :

L'effet des différentes sources de carbone : acide malique, saccharose, glucose, fructose, lactose, mannitol et maltose sur la capacité des isolats bactériens à produire l'AIA a été étudié dans le milieu de culture additionné de 200 mg/l de tryptophane.

4.1.2. Effet des différentes sources de l'azote sur la production de l'AIA:

L'effet de diverses sources de l'azote tel que NH_4Cl , NaNO_3 , l'urée et caséine sur la capacité des isolats bactériens à produire l'AIA a été étudié dans le milieu de culture additionné de 200 mg/l de tryptophane.

4.2. Optimisation des conditions de culture sur la production de l'AIA :

Les conditions de culture telle que le pH du milieu, la température et la durée d'incubation ont été variées pour avoir un taux de production d'AIA optimale.

4.2.1. L'effet du pH sur la production de l'AIA :

La capacité des isolats à produire l'AIA a été testée en faisant varier le pH initial du milieu de culture de 5, 6, 7 et 8. L'effet du pH a été testé dans un bouillon tamponné préparé dans un tampon phosphate-citrate (**Annexe**) qui est nécessaire pour limiter les variations du pH.

4.2.2. L'effet de la température sur la production de l'AIA :

La capacité des isolats bactériens a été testée en variant leur température d'incubation. Les cultures bactériennes ont été incubées à des températures de 25°C, 30°C, 35°C et 40°C.

4.2.3. L'effet du temps d'incubation sur la production de l'AIA:

L'effet du temps d'incubation sur la production d'AIA par les isolats bactériens a été réalisé par le suivi de la quantité d'AIA produite par ces isolats pendant 10 jours avec un intervalle de 2 jours.

La croissance bactérienne a été suivie par la mesure de l'absorbance des cultures bactériennes à 620 nm durant le même intervalle de temps.

4.3. L'effet de concentration du L-tryptophane sur la production d'AIA:

L'effet de la concentration de tryptophane dans le milieu de culture sur la capacité des isolats à produire l'AIA a été testé en utilisant des concentrations croissantes de L-tryptophane : 0, 100, 200, 400, 600, 800 et 1000 mg/l.

5. Analyse statistique :

Les expérimentations ont été faites en trois répétitions, les résultats obtenus sont soumises à une analyse de variance (ANOVA) suivi par une comparaison des moyens deux à deux selon le test de Newman et Keuls.

Bibliographies

A

- **Abd-Allah MH. (1994).** Use of organic phosphorus by *Rhizobium leguminosarum biovarviceae* phosphatases. *Biot Fertil Soils*, 8(2) :16-21.
- **Abd-Allah MH, El-Sayed AE et Abdel-Hamied MR. (2013).** Indole-3-acetic acid (IAA) production by *Streptomyces atrovirens* isolated from rhizospheric soil in Egypt. *Journal of Biology and Earth Sciences*, 3(2): 182-193.
- **Acuna JJ, Jorquera MA, Martínez, OA, Menezes-Blackburn D, Fernández MT, Marschner P, Greiner R, Mora ML. (2011).** Indole acetic acid and phytase activity produced by rhizosphere bacilli as affected by pH and metals. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11: 1-12.
- **Adesemoye A, Torbert H et Kloepper J. (2009).** Plant growth-promoting Rhizobacteria at low reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology*, 58(4): 921-929.
- **Ahmad F, Ahmad I et Khan MS. (2005).** Indole acetic acid production by the indigenous isolates of *Azotobacter* and fluorescent *Pseudomonas* in the presence and absence of tryptophan. *Turk. Journal. Biologyl*, 29: 29-34.
- **Ahmad F, Ahmad I et Khan MS. (2008).** Screening of free living rhizosphere bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiol*, 163: 173- 181.
- **Alexander M. (1977).** Introduction to soil microbiology. Ed, *Wiley Eastern Limited* New York, p : 467.
- **Aloni R, Aloni E, Langhans M et Ullrich CI. (2006).** Role of cytokinin and auxin in shaping root architecture: regulating vascular differentiation, lateral root initiation, root apical dominance and root gravitropism. *Ann Bot*, 97:883-893.
- **Antoun H, Beauchamp CJ, Goussard N, Chabot R et Lalande R. (1998).** Potential of *Rhizobium* and *Bradyrhizobium* species as plant growth promoting rhizobacteria on non-legumes: Effect on radishes (*Raphanuss ativus* L). *Plant and soil*, 204(1): 57-67.
- **Arshad M et Frankenberger WT. (1993).** Microbial production of plant growth regulators. *Plant and Soil*, 133(1): 1-3.

Bibliographies

- **Ashrafuzzaman M, Hossen FA, Razi I, Anamul H, Zahurul IS, Shahidullah M et Sariah M. (2009).** Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *African Journal of Biotechnology*, 8(7) : 1247-1252.
- **Atzhorn R, Crozier A, Wheeler CT et Sandberg G. (1988).** Production of gibberellins and indole- 3-acetic acid by *Rhizobium phaseoli* in relation to nodulation of *Phaseolus vulgaris* roots. *Planta*, 175:532-538.

B

- **Badenoch J, Summons RE, Entsch B, Rolfe BG, Parker CW et Letham DS. (1982).** Mass spectrometric identification of indole compounds produced by *Rhizobium* strains. *Biomedical Mass spectrometry*, 9:429-437.
- **Bakker AW et Schippers B. (1987).** Microbial cyanide production in the rhizosphere in relation to potato yield reduction and *Pseudomonas sp* mediated plant growth-stimulation. *Soil Biol. Biochem*, 19: 451-457.
- **Barazani O et Friedman J. (1999).** Is IAA the major root growth factor secreted from plant-growth-mediating bacteria?. *J. Chem. Ecol*, 25:2397-2406.
- **Barea JM, Pozo MJ, Azcón R et Azcón-Aguilar C. (2005).** Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal. Exp. Bot*, 56: 1761-1778.
- **Barea JM et Brown ME. (1974).** Effect on plant growth produced by *Azotobacter paspali* related to synthesis of plant growth regulating substance. *Journal. Appl. Bacteriol*, 37: 583-593.
- **Bastian F, Cohen A, Piccoli P, Luna V, Bottini R, Baraldi R et Bottini R. (1998).** Production of IAA and gibberellins A1 and A3 by *Acetobacter diazotrophicus* and *Herbaspirillum seropedicae* in chemical lydefined culture media. *Plant growth regulation*, 24(1): 711.
- **Bashan Y et Holguin G. (1997).** *Azospirillum*-plant relation ships: environmental and physiological advances. *Can. Journal. Microbiol*, 43 : 103-121.
- **Bashan Y et Bahan LE. (2005).** Bacteria in *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. D. Hillel, Elsevier Academic Press, UK, P: 2119.

Bibliographies

- **Beauchamp CJ. (1993).** Mode d'action des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes et potentiel de leur utilisation comme agent de lutte biologique. *Phytoprotection*, 74(1) :19-27.
- **Bertrand JC, Caumette P, Lebaron P, Matheron R et Normand P. (2011).** Écologie microbienne : microbiologie des milieux naturels et anthropisés, Ed. *Presses universitaires de Pau et des Pays de l'Adour* : 190-194.
- **Bertrand JA, Auger G, Fanchon E, Martin L, Chantalat L, Auger G, Blanot D, van Heijenoort J et Dideberg O. (2000).** Open structures of Mur D: Domain movements and structural similarities with Folylpolyl-glutamate synthetase. *Journal. Mol. Biol*, 301:1257-1266.
- **Bergey's M. (2010a).** *Bacillus* and *Paenibacillus* sp In: Plant Growth and Health Promoting Bacteria, *Springer Science & Business Media*: 330-336.
- **Bergey's M. (2010b).** L'évaluation, la taxonomie et la diversité microbienne In: Microbiologie, Ed. *De Boek supérieur*: 498-501.
- **Briat JF. (1992).** Iron assimilation and storage in prokaryotes. *Journal. Gen. Microbiol*, 138: 2475-2483.
- **Bonmatin JM, Laprevot O et Peypoux F. (2003).** Diversity among microbial cyclic lipo peptides: iturins and surfactins. Activity–structure relationships to design new bioactive agents. *Comb. Chem. High Throughput Screen*, 6(6):541-556.
- **Bottini R, Fulchieri M, Pearce D et Pharis RP. (1989).** Identification of gibberellins A1, A3 and iso-A3 in culture of *Azospirillum lipo ferum*. *Plant Physiology*, 90 (1):45-47.
- **Bottini R, Cassan F et Picolli P. (2004).** Gibberellin production by bacteria and its involvement in plant growth promotion. *Appl Microbiol. Biotechnol*, 65 : 497-503.
- **Burg SP. (1962).** The physiology of ethylene formation. *Annu Plant Physiol*, 13: 265-302.

C

- **Cakmakci R, Donmez F, Aydin A et Sahin F. (2006).** Growth promotion of plants by plant growth-promoting rhizobacteria under greenhouse and two different field soil conditions. *Soil Biol Biochem*, 38(6): 1482-1487.

Bibliographies

- **Campbell R et Greaves MP. (1990).** Anatomy and community structure of the rhizosphere In: The Rhizosphere Ed. *Lynch JM. Wiley J & Sons, Ltd, Essex.* 11-34.
- **Capelle SC, Mok DWS, Kirchener SC et Mok MC. (1983).** Effects of Thidiazuron on cytokinin autonomy and the metabolism of N [nitrogen]¹⁵-(delta 2-isopentenyl) (8-14C [carbon isotope]) adenosine in *callus* tissues of *Phaseolus lunatus L.* *Plant Physiology.* 73 : 796-802.
- **Chaiharn M et Lumyong S. (2009).** Phosphate solubilization potential and stress tolerance of rhizobacteria from rice soil in Northern Thailand. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 25: 305-314.
- **Creus CM, Graziano M, Casanovas EM, Pereyra MA, Simontacchi M, Puntarulo S, Barassi CA et Lamattina L. (2005).** Nitric oxide is involved in the *Azospirillum Brasilense*-induced lateral root formation in tomato. *Planta*, 221: 297-303.

D

- **Danielle LM et Paul M. (1979).** Physiologie végétale. *Hermann collection méthodes Paris*, p: 234-247.
- **Dasri K, Kaewharn J, Kansoand S et Sangchanjirad S. (2014).** Optimization of indole-3-acetic acid (IAA) production by rhizobacteria isolated from epiphytic orchids. *KKU Res. Journal*, 19: 268-275.
- **Datta C et Basu P. (2000).** Indole acetic acid production by a *Rhizobium* species from root nodules of a leguminous shrub *Cajanus cojan*. *Microbiol.* 155: 123-127.
- **Davet P. (1996).** Vie microbienne du sol et production végétale. Ed , *Institut National de la Recherche Agronomique INRA Paris*, p : 383.
- **Davies PJ. (1995).** Plant hormones physiology, biochemistry and molecular biology, Ed, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p : 112.
- **Dinesh KM. (2011).** Bacteria in Agrobiolgy: Plant Nutrient Management, Ed, *De Boek université*, p: 345.
- **Dobbelaere S, Vanderleyden J et Okon Y. (2003).** Plant Growth-Promoting Effects of Diazotrophs in the Rhizosphere. *CRC Crit. Plant Sci*, 22(2):107-149.

Bibliographies

E

- **El-Khawas H et Adachi K. (1999).** Identification and quantification of auxins in culture media of *Azospirillum* and *Klebsiella* and their effect on *rice* roots. *Biol. Fert. Soils*, 28: 377- 381.

F

- **Figueiredo VB, Burity HA, Martinez CR et Chanway CP. (2008).** Alleviation of drought stress in the common bean (*Phaseolus vulgaris L*) by co-inoculation with *Paeni Bacillus polymyxa* and *Rhizobium tropici*. *Appl. Soil Ecol*, 40: 182-188.
- **Frey-Klett P, Garbaye J et Tarkka M. (2007).** The *mycorrhiza* helper bacteria revisited. *New Phytologist*, 176: 22-36.
- **Fukaki H, Okushima Y et Tasaka M. (2008).** International Review of Cytology:A *Survey of Cell Biology*, Ed. Kwang W. Jeon Elsevier, San Diego, CA,p: 300.

G

- **Garbaye J. (1994).** Helper bacteria: a new dimension to the mycorrhizal symbiosis (*Tansley review*, 76). *New Phytologist*, 128: 197-210.
- **Garcia de Salamone IE et Dobereiner J. (1996).** Biology and Fertility of Soils, *Journal of International Society of Soil Science*,21 : 193-196.
- **Garrity GM. (2005).** Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York*, 2: 1-1085.
- **Garrity GM, Bell JA et Lilburn T. (2005).** Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, 2nd ed, The Proteobacteria, Part A, *Introductory Essays (edited by Brenner, Krieg, Staley and Garrity)*, Springer, New York, 2 :159–206.
- **Gaspar T, Kevers C, Penel C, Greppin H, Reid DM et Thorpe TA. (1996).** Plant hormones and plant growth regulators in plant tissue culture. *In Vitro Cell Dev Bio Plant*, 32: 272-289.

Bibliographies

- **Germida JJ, Siciliano SD, Freitas R et Seib AM. (1998).** Diversity of root-associated bacteria associated with field-grown canola (*Brassica napus L*) and wheat (*Triticumaestivum L*). *FEMS Microbiol. Ecol*, 26: 43-50.
- **Glick BR, Patten CL, Holguin G et Penrose DM. (1999).** Biochemical and genetic mechanisms used by plant growth promoting bacteria, Ed, London Imperial College press, UK, p : 267.
- **Gobat JM, Aragno M et Matthey W. (2010).** Le sol vivant Bases de pédologie-Biologie des sols. 3^{ème} Ed , *Presses polytechniques et universitaires romandes* , p:705.
- **Govaert G, NadifetLatent M. (2010).** Block Model for Contingency Table, *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 39: 416-425.
- **Govindasamy V, Senthilkumar M, Magheshwaran V, Kumar U, Bose P, Sharma V et Annapurna K. (2010).** Plant Growth and Health Promoting Bacteria, Ed, *Microbiol. Monographs*, p : 346.
- **Gupta A, Gopal M et Tilak KV. (2000).** Mechanism of plant growth promotion by rhizobacteria. *Indian J Exp Biol*, 38:856-862.
- **Gutierrez-Manero FJ, Ramos B, Probanza A, Mehouchi J et Talon M. (2001).** The plant growth promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high amounts of physiologically active gibberellins. *Physiolgy Plant* , 111: 206-211.

H

- **Haas D, Keel C, Laville J, Maurhofer M, Oberhinsü T, Schnider U, Voisard C, Wüthrich B et Defago GD (1991).** Advances in moldar genetics of plant-microbe interactions In: *Plant Science and Biotechnology in Agriculture*. Ed, Michael J. Daniels J. Allan Downie Anne E. Osbourn ,1: 450-456.
- **Halder AK et Chakrabartty PK. (1993).** Solubilisation of inorganic phosphate by *Rhizobium*. *Folia Microbiol* , 38:325-330.
- **Hallmann J, Quadt-Hallmann A, Mahaffee WF et Kloepper JW. (1997).** Bacterial endophytes in agricultural crops. *Can J of Microbio*, 43: 895-914.

Bibliographies

- **Hinsinger P. (1998).** How do plant roots acquire mineral nutrients?. Chemical processes involved in the rhizosphere. *Adv. Agron*, 64: 225-265.
- **Höflich G, Wiehe W et Hetch-Buchholz C. (1995).** Rhizosphere colonization of different crops with growth promoting *Pseudomonas* and *Rhizobium* bacteria. *Microbiol.*, 150: 139-147.
- **Hooykaas PJJ, Hall MA et Libbenga KR. (1999).** Biochemistry and Molecular Biology of Plant Hormones. Ed Elsevier, p :538 .
- **Hopkins WG. (2003).** Physiologie végétale. Ed ,De Boeck Université Bruxelles, p:330.
- **Hugenholtz P. (2002).** Exploring prokaryotic diversity in the genomic era. *Genome Biol*, 3(2):1465-6914.

I

- **Isipenko A et Ignatov V. (1995).** Physiological aspects of phytohormone production by *Azospirillum brasilense* Sp7. In: *Azospirillum VI and related microorganisms: genetics, physiology and ecology*. Ed, NATO ASI Series, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 37:307-312.

J

- **Joo GJ, Kang SM, Hamayun M, Kim NCI, Shin DH, et Lee IJ. (2009).** *Burkholderia* sp. KCTC 11096BP as a newly isolated gibberellin producing bacterium. *Journal Microbiol*, 47:167-171.

K

- **Karnwal A. (2009).** Production of Indol acetic acid by fluorescent *Pseudomonas* in the presence of L-Tryptophan and Rice root exudates. *Journal of Plant Pathology*. 91:61-63.
- **Kepinski Set Leyser O. (2005).** Plant development: auxin in loops. *Curr Biol*, 15: 208-210.
- **Khalid A, Arshad M et Zahir ZA. (2006).** Phytohormones: microbial production and applications. In: *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. Ed, N. Up hoff ,

Bibliographies

A.S. Ball, E. Fernandes, H. Herren, O. Husson, M. Laing, C. Palm, J. Pretty, P. Sanchez, N. Sanginga and J. Thies. Taylor & Francis/CRC, Boca Raton, Florida ; p: 207-220.

- **Khamna S, Yokota A, Peberdy John F et Lumyong S. (2010).** Indole-3-acetic acid production by *Streptomyces sp.* isolated from some *Thai* medicinal plant rhizosphere soils. *Eur Asian Journal of Bio Scienc*, 4: 23-32.
- **Kloepper JW, Litshitz R et Zablutowicz RM. (1989).** Free living bacterial inoculation for enhancing crop productivity. *Trends Biotechnol*, 7:39-43.
- **Kloepper JW. (1992).** Plant growth-promoting rhizobacteria as biological control agents. In: *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management*. Marcel Dekker Inc. New York, p : 255-274.
- **Kloepper JW. (1993).** Plant-growth-promoting rhizobacteria as biological control agents, In: *Soil Microbial Ecology. Ed., F.B. Jrounal, Marcel Dekker inc., N.Y.* p. 255-273.
- **Kobayashi M, Komeda H, Nagasawa T, Nishiyama M, Horinouchi S, Beppu T, Yamada Het Shimizu S. (1993).** Occurrence of enzymes involved in biosynthesis of indole-3-acetic acid from indole-3-acetonitrile in plant-associated bacteria, *Agrobacterium* and *Rhizobium* *Eur. Journal. Biochem*, 217: 327-336.
- **Kolb W et Martin P. (1985).** Response of plant roots to inoculation with *Azospirillum Brasilense* and to application of indole acetic acid. In: *Azospirillum III: genetics, physiology*. Ed, *Klingmüller W ecology Berlin* p: 215-222.
- **Krieg NR et Döbereiner J. (1984).** Genus *Azospirillum*. In: *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. N.R. Krieg*. 1: 94-104.
- **Kumar B S D, Berggren I et Martensson AM. (2001).** Potential for improving production by co-inoculation with fluorescent *Pseudomonas* and *Rhizobium*. *Plant Soil*, 229: 25-34.

Bibliographies

L

- **Lee S, Flores EM, Contreras ZM, Garcia FL, Escamilla JE et Kennedy C. (2004).** Indole-3-acetic acid biosynthesis is deficient in *Gluconacetobacter diazotrophicus* strains with mutations in cytochrome biogenesis genes. *Journal. Bacteriol*, 186(16): 5384-5391.
- **Liba CM, Ferrara FIS, Manfio GP, Fantinatti-Garboggini F, Albuquerque RC, Pavan C, Ramos PL, Moreira-Filho CA et Barbosa HR. (2006).** Nitrogen-fixing chemo-organotrophic bacteria isolated from cyanobacteria-deprived lichens and their ability to solubilize phosphate and to release amino acids and phytohormones. *applied microbiology*,101(5): 1076-1086.
- **Lin TP, Chen CL, Fu HC, Wu CY, Lin GH, Huang SH, Chang LK et Liu ST. (2005).** Functional analysis of fengycin synthetase Fen D. *Biochim Biophys Acta (BBA) - Gene Structure and Expression. Biochimica et Biophysica Acta* , 1730:159-164.
- **Lindow E, Desurmont C, Elkins R, Mccourty G, Clark E et Maria TB. (1998).** Occurrence of Indole - 3- acetic acid-producing bacteria on pear trees and their association with fruit russet. *Phytopathol*, 88: 1149 -1157.
- **Loper JE et Scroth MN. (1986).** Influence of bacterial sources on indole-3-acetic acid on root elongation of sugar beet. *Phytopathology*, 76: 386–389.
- **Lynch JM et Whipps JM. (1990).** Substrate flow in the rhizosphere. *Plant Soil*, 129:1-10.

M

- **MacMillan J. (2002).** Occurrence of gibberellins in vascular plants, fungi, and bacteria. *Journal. Plant Growth Regul*, 20 : 387-442.
- **Madigan M et Martinko J. (2007).** Biologie des microorganismes. 11^{ème} Ed, *Pearson Education*, p: 655.

Bibliographies

- **Malhotra M et Srivastava S. (2008).** Stress-responsive indole-3-acetic acid biosynthesis by *Azospirillum Brasilense SM* and its ability to modulate plant growth. *European Journal of Soil Biology*, 45: 73-80.
- **McGowan SJ, Barnard AML, Bosgelmez G, Sebahia M, Simpson NJL, Thomson NR, Todd DE, Welch M, Whitehead NA et Salmond GPC. (2005).** Carbapenem antibiotic biosynthesis in *Erwinia carotovora* is regulated by physiological and genetic factors modulating the quorum sensing-dependent control pathway. *Mol Microbiol*, 55(2): 526-545.
- **Meena B, Marimuthu T, Vidhyasekaran P et Velazhahan R. (2001).** Biological control of root rots of groundnut with antagonistic *Pseudomonas fluorescens* strains. *Journal of Plant Dis Protect*, 108: 369-381.
- **Tay SAB, Mac Leod JK, Palni LMS et Letham DS. (1985).** Detection of cytokinins in seaweed extract. *Phytochemistry*, 24: 2611-2614.
- **Michel CG, Christian W, Jean-Claude R, Jacques B et Jean-Louis M. (2005).** Sols et environnement. Ed, *Dunod, paris*, p : 881.
- **Mirza MS, Ahmad W, Latif F, Haurat J, Bally R, Normand P et Malik KA. (2001).** Isolation partial caractereztion and effect of plant growth prmoting bacteria on micro propagated sugarcane in vitro. *Plbant Soil*, 237: 47-54.
- **Moore TC. (2012).** Biochemistry and Physiology of Plant Hormones 2^{ème} Ed, *Springer Science & Business Media*, p :330

N

- **Neilands JB, Konopka K, Schwyn B, Coy M, Francis RT et Paw BH. (1987).** Comparative biochemistry of microbial iron assimilation. In: Iron Transport in Microbes, Plants and Animals. Winkelmann G, van der Helm D, and JB Neilands, Ed. *Weinheim: VCH-Verlagsgesells chaft*, p: 3-33.
- **Nita BP, Milind G, Ahiwale SS, Aparna BG et Balasaheb PKD. (2011).** Optimization of Indole-3-acetic acid (IAA) production by *Acetobacter diazotrophicus LI* isolated from Sugarcane. *International journal of environmental sciences*, 2(1):0976-4402.

Bibliographies

- Noel TC, Sheng C, Yost CK, Pharis RP et Hynes MF. (1995). *Rhizobium leguminosarum* as a plant growth-promoting rhizobacterium: direct growth promotion of canola and lettuce. *Can. Journal. Microbiol*, 42:279-283.

O

- O'Sullivan DJ et O'Gara F. (1991). Regulation of iron assimilation: nucleotide sequence analysis of an iron-regulated promoter from a fluorescent *Pseudomonas*. *Mol. Gen. Genet*, 228: 1-8.
- Orhan E, Esitken A, Ercisli S, Turan M et Sahin F. (2006). Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield growth and nutrient contents in organically growing raspberry. *Sci. Hortic*, 111(1): 38-43.
- Omay SH, Schmidt WA, Martin Pet Bangerth F. (1993). Indole acetic acid production by the rhizosphere bacterium *Azospirillum*... Indole acetic acid production by the rhizosphere bacterium *Azospirillum brasilense* Cd under *in vitro* conditions. *canadienne de microbiologie*, 39(2): 187-1920.

P

- Patten CL et Glick BR. (1996). Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Can. Journal. Microbiol*, 42 : 207-220.
- Patten CL et Glick BR. (2002). Role of *Pseudomonas putida* indole acetic acid in development of the host plant root system. *Appl Environ Microbiol*, 68: 3795-3801.
- Peter H, Georges BJ, Raven KA, Mason JB, Losos SR et Singer. (2015). *Biologies, 9^{ème} Ed. amirécaïne du Raven*, p: 1406.
- Pelmont J. (1995). Bactéries et Environnement : Adaptations Physiologiques. *Office des Publications universitaires*. Algérie, p : 145-147.
- Perrig D, Boiero M, Masciarelli O, Penna C, Ruiz O, Cassán F et Luna M. (2007). Plant-growth-promoting compounds produced by two agronomically important strains of *Azospirillum brasilense*, and implications for inoculant formulation. *Appl Microbiol Biotech*, 75: 1143-1150.
- Peypoux F, Bonmatin JM et Wallach J. (1999). Recent trends in the biochemistry of sur factin. *Appl. Environ Microbiol*, 51(5): 553-563.

Bibliographies

- **Plassard C, Robin A, Le Cadre E, Marsden C, Trap J, Herrmann L, Waithaisong K, Lesueur D, Blanchart E, Chapuis-Lardy L et Hinsinger P. (2015).** Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol. *Innovations Agronomiques*, 43 ; 115-138.
- **Prescott LM, Harley JP, Klein DA, Claire M, Bacq C et Dusart J. (2007).** Microbiologie .Ed, *De Boeck université*, p:492.
- **Prinsen E. (1993).** *Azospirillum Brasilense* indole-3-acetic acid biosynthesis: evidence for a non tryptophan- dependent pathway. *Mol. Plant–Microbe Interact*, 6 : 609-615.

R

- **Raaijmakers JM, Vlami M et de Souza JT. (2002).** Antibiotic production by bacterial biocontrol agents. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81(4):537-547.
- **Rahman MS, Ano T et Shoda M. (2007).** Biofilm fermentation of *iturin A* by a recombinant strain of *Bacillus subtilis*168. *J. Biotechnol*, 127(3):503-507.
- **Rajkumar M, Lee KJ et Freitas H. (2008).** Effects of chitin and salicylic acid on biological control activity of *Pseudomonas* sp. Against damping off of *pepper*. *South African J. Botany*, 74: 268-273.
- **Raven PH, Evert RF et Eichhorn SE. (2000).** Biologie végétale. Ed, De Boeck Supérieur, p:944 .
- **Raven P, Evert R, Eichhorn S et Bouharmont J. (2007).** Biologie végétale. 2^{ème} Ed, De Boeck Université Bruxelles, p 870.
- **Richardson AE. (1994).** Soil microorganisms and phosphorus availability. *In: Soil biota, management In: Sustainable farming systems*, Ed. Pankhwst CE, Doube BM, Gupts SR and PR Grace *CSIRû Auralia, Melbourne*, p: 50-62.
- **Ryan RP, Germaine K, Franks A, Ryan DJ et Dowling DN. (2008).** Bacterial endophytes: recent developments and applications. *FEMS. Microbiol. Lett*, 278: 19.
- **Ryu Ret Patten CL. (2008).** Aromatic amino acid-dependent expression of indole-3-pyruvate decarboxylase is regulated by 4 TyrR in *Enterobacter cloacae* UW5. *Am Soc Microbiol*, 190: 1-35.

Bibliographies

S

- **Saharan BS et Nehra V (2011).** Plant Growth promoting rhizobacteria: *A critical review. Life Sci. Med, LSMR* ,2 :1-30.
- **Salisbury FB (1994).** The Role of Plant Hormones. In: Plant-Environment Interactions. Ed. Marcel Dekker Wilkinson RE, New York, USA, p: 39-81.
- **Sasirekha B, Shivakumar S et Sullia SB. (2012).**Statistical optimization for improved indole-3-acetic acid (IAA) production by *Pseudomonas aeruginosa* and demonstration of enhanced plant growth promotion. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*,12(4) : 863-873.
- **Sawada H, Kuykendall LD et Young JM. (2003).** Changing concepts in the systematics of bacterial nitrogen fixing legume symbionts. *Journal. Gen. Applied Microbiol*, 49: 155-179.
- **Schwartz C, Decroux J et Muller JC. (2005).** Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairie, *Ed Boeck Université Paris*, p : 414.
- **Shah S, Li J, Moffatt BA et Glick BR. (1998).** Isolation and characterization of ACC deaminase genes from two different plant growth-promoting rhizobacteria. *Can. J. Microbiol*, 44: 833-843.
- **Shahab S, Ahmed N et Khan NS. (2009).** Indole acetic acid production and enhanced plant growth promotion by *indigenous PSBs*. *African Journal of Agricultural Research*, 4(11):1312-1316.
- **Shamsul H, Pichtel J et Iqbal A. (2008).** Plant-Bacteria Interactions: Strategies and Techniques to Promote Plant Growth. *John Wiley & Sons*, p330 : 83-98.
- **Sharma K, Dak G, Agrawal A, Bhatnagar M et Sharma R (2007).** Effect of phosphate solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seeds and seedling growth. *J. Herb. Med. Toxicol*, 1: 61-63.
- **Somers E et Vanderlyden J. (2004).** Rhizosphere bacterial signalling: a love parade beneath our feet. *Critical Reviews in Microbiology*, 30: 205-240.

Bibliographies

- **Spaepen S, Vanderleyden J et Remans R. (2007).** Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signalling. *FEMS Microbiol*, 31(4): 425-448.
- **Sridevi M et Mallaiah KV. (2007).** Production of indole-3-acetic acid by *Rhizobium*, isolates from *Sesbania species*, *African Journal of Microbiology Research*, 1(7): 125-128.
- **Strzelczyk E et Pokojnska BA. (1984).** Production of auxins and gibberellin like substances by mycorrhizal fungi, bacteria and actinomycetes isolated from soil and mycorrhizosphere of pine (*Pinussilvestris* L). *Plant Soil*, 81: 185-194.
- **Sturz AV et Christie BR. (2003).** Beneficial microbial allelopathies in the root zone: the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil Til*, 72: 107-123.
- **Subba RNS. (1999).** Soil Microbiology. 4thEd, *Oxford and IBH publishing Co. Pvt. Ltd*, New Delhi, India, p: 424.

T

- **Thuler DS, Floh EIS, Handro W et Barbosa HR (2003).** Plant growth regulators and amino acids released by *Azospirillum sp.* in chemically defined media. *Lett Appl Microbiol*, 37: 174-178.
- **Tien TM, Gaskins MS et Hubbel DH (1979).** Plant growth substance produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of *pearl* millet. *Appl. Environ. Micro*, 37(5): 1016-1024.

V

- **Vande Broek A, Lambrecht M, Eggermont K et Vanderleyden J. (1999).** Auxin supregulate expression of the indole-3-pyruvate decarboxylase gene in *Azospirillum Brasilense*. *Journal Bacteriol*, 181:1338-1342.
- **Venant N, Marc O, Maïté S et Philippe T. (2011).** Beneficial effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health. *Journal of Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 15(2) :327-337.

Bibliographies

- **Vessey JK. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*, 255 : 571-586.
- **Voisard C, Keel C, Haas D et Dafago G. (1989).** Cyanid production by *Pseudomonas fluorescens* helps suppress black mot rot of *tobacco* under gnotobiotic conditions. *EMBO Journal*, 8:351-358.

W

- **Wani P, Khan MS et Zaidi A. (2007).** Co-inoculation of nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria to promote growth, yield and nutrient uptake in *chickpea*. *Acta Agronomica Hungarica*, 55 (3): 315-323.
- **Wani P, Hameeda B, Harini G, Rupela OP et Gopal R. (2008).** Growth promotion of *maize* by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and *macrofauna*. *Microbiol*, 163:234-242.
- **Williams PM et Sicardi DM. (1982).** Abscisic acid and gibberellin-like substances in root nodule of *Glycine max*. *Plant Soil* , 65: 19-26.
- **Whipps JM. (2001).** Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *J. Exp. Bot*, 52 :487-511.

y

- **Yadav RH (2013).** Indole acetic acid production by *bacillus papillae* isolated from few legume plants rhizosphere soils. *International Proceedings of Social and Behavioral Sciences*, 1(1): 58-63.

Z

- **Zahir ZA, Arshad M et Frankenberger WT. (2004).** Plant growth promoting rhizobacteria : applications and perspectives in agriculture. *Adv. Agron*, 81: 97-168.
- **Zhao Y (2010).** Auxin biosynthesis and its role in plant development. *Annu. Plant Boil*, 61: 49-64.

Bibliographies

- **Zimmer W et Both H. (1989).** The phytohormonal interactions between *Azospirillum* and *Wheat*. In: Nitrogen Fixation with Non-Legumes, *Skinner Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands*, p: 137-146.
- **Zimmer W et Bothe H. (1988).** The phytohormonal interactions between *Azospirillum* and wheat. *Plant Soil*, 110:239-247.
- **Zimmer W, Roeben K et Bothe H. (1988).** An alternative explanation for plant growth promotion by bacteria of the genus *Azospirillum*. *Planta*, 176:333-342.

Conclusion

Le principal objectif de cette étude est l'optimisation de la production de l'acide indole-acétique « AIA » par deux bactéries S_1 et S_2 appartenant à l'espèce *Stenotrophomonas maltophilia* isolées de la rhizosphère du sol salin en évaluant les différents facteurs qui peuvent influencer la fonctionnalité et la capacité de ces isolats sélectionnés à produire cette hormone.

Les résultats expérimentaux ont révélé une efficacité de ces rhizobactéries à produire des quantités importantes d'AIA. La composition du milieu de culture influe considérablement sur l'efficacité de production de l'AIA d'où on a pu déterminer que la source de carbone et de l'azote approprié pour une meilleure production pour les deux isolats était l'acide malique et NH_4Cl respectivement. Concernant les conditions de cultures un pH de 6 et une température de 30°C ont mené à un rendement maximal dans la production de l'AIA par les deux isolats bactériens. Le meilleur taux de production a été observé après le sixième jour d'incubation, par contre la croissance bactérienne a été élevée jusqu'à le 10^{ème} jour d'incubation.

Une faible production de l'AIA par les isolats a été enregistrée en absence de L-tryptophane dans le milieu de culture ($2,878\mu\text{g/ml}$), par ailleurs, la capacité de production de l'AIA par les deux bactéries augmente avec l'augmentation de la concentration du tryptophane dans le milieu de culture avec une production maximale de ($68,955\mu\text{g/ml}$) chez l'isolat S_1 .

Les résultats obtenus ont montré que les paramètres étudiés ont présenté un effet significatif sur la production d'AIA par les isolats bactériens utilisés.

La conclusion de la présente étude a confirmé que nos rhizobactéries ont une grande capacité à produire l'acide indole acétique et peuvent être utilisées comme alternative aux engrais azotés comme inoculant microbiens, ainsi il faut y avoir des études expérimentales approfondies pour la détermination des isolats compétents qui peuvent mener à mieux optimiser *in vitro* la production d'hormone de la croissance végétale « acide indole acétique » pour être utilisés comme bio-fertilisants végétale pour l'amélioration de la production agricole en vue d'une application industrielle à grande échelle à des rentabilités économique plus importante.

Annexe

Gélose nutritive (GN) (g/l)

Peptone.....	5 g
Extrait de viande	1g
Extrait de levure.....	3g
Chlorure de sodium Na cl	2g
Agar Agar.....	18g
Eau distillée q.s.p	1000ml

pH= 7,2±0,2

Milieu NF addition aux tryptophan (200mg/l)

Acide malique.....	5g
KOH.....	4g
K ₂ HPO ₄	0.5g
CaCl ₂	0.02g
MgSO ₄	0.2g
Na Cl.....	0.1g
FeSO ₄	0.5g
MnSO ₄	5.0g
NH ₄ cl.....	1g
Eau distillée q.s.p.....	1000 ml

pH= 6,8

Réactif de de Salkowski

FeCl ₃	(0,5 M) 1ml
Acide perchlorique.....	50 ml, (35%)

Eau physiologique

Eau distillée stérile	1000ml
Chlorure de sodium Na Cl	9g

Annexe

Solution tampon phosphate citrate

*Préparation une solution (solution A) d'acide citrique à $0,50\text{mol}^{-1}$ (soit 105,06g de $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_8\cdot\text{H}_2\text{O}$ par litre).

* Préparation une solution (solution P) de phosphate de sodium disodique $0,5\text{ mol. l}^{-1}$ (soit 71,01g de Na_2HPO_4 par litre)

*Mélanger selon les proportions suivant, selon le pH désiré, puis ajouter de l'eau distillée jusqu'à 200ml.

pH désiré	solution P /ml	solution A / ml
5	41 ,20	19 ,40
6	50 ,52	14 ,74
7	65 ,88	7 ,06
8	77 ,80	1 ,10

Introducción

Partie

Bibliographique

Chapitre

: 1

Les rhizobactéries

Chapitre : 2

Les phytohormones

Partie
Expérimentales

Chapitre : 1

Matériels et

méthodes

Chapitre : 2

Résultats et

Discussions

*Références
bibliographiques*

Conclusion

Annexe