



République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

Faculté Des Sciences de La Nature et de La Vie

Département de Biologie

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCE BIOLOGIQUE

Spécialité : Microbiologie appliquée

Par

BOUZIANE Chaimaa

&

BOUICH Rania

Thème :

Évaluation et prédiction des activités PGP par approches statistiques

Soutenue le 23/06/2026 devant le jury composé de :

Président	MEKHALDI Abdelkader	Pr	Université de Mostaganem
Encadreur	NAIMI Mehdi	MCA	Université de Mostaganem
Examinateur	BOUZNAD AHCENE	MCB	Université de Mostaganem
Co-encadreur	HAMOUH Hakim	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Nous exprimons tout d'abord nos profonds remerciements à Allah qui nous a donné la patience, le courage et la volonté pour réaliser ce mémoire.

Nos grands remerciements à **Mr. NAIMI Mehdi** pour avoir accepté d'être notre encadrant, pour ses conseils précieux, ses encouragements constants et ses critiques constructives qui nous ont permis de donner le meilleur de nous-mêmes, ainsi qu'à pour son aide et son co-encadrement durant ce travail **Mr. HAMOUM Hakim**

Nous remercions **Mr. MEKHALDI Abdelkader** et **Mr. BOUZNAD Ahcene** d'avoir accepté d'être le jury de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier également **Mme. TAHLAITI Amina**, ingénieure au laboratoire de recherche de microbiologie et de biologie végétale, pour sa patience et son aide précieuse, ainsi que **Mr. ARABI Abed** pour ses conseils et son aide tout au long de ce travail.

Pour finir, Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés dans la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon parcours. Qu'ALLAH le Tout-Puissant leur accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes chères sœurs et à mon unique frère, pour leur présence, leur soutien et leurs encouragements qui m'ont toujours accompagnée.

À ma belle-sœur, pour son aide précieuse, sa gentillesse et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail.

À mes amis de la promotion de Microbiologie Appliquée, pour leur aide et leurs encouragements durant ce travail.

Chaimaa

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma très chère mère, pour son amour infini, ses sacrifices silencieux et son soutien inconditionnel. Tu as été ma force dans les moments difficiles et ma lumière dans les périodes de doute. Grâce à toi, j'ai appris la patience, le courage et la valeur du travail. Qu'Allah te protège, te garde en bonne santé et t'accorde une longue vie.

Mon cher père, pour sa force exemplaire, sa patience et ses encouragements constants. Tu as toujours été mon modèle de persévérance et de dignité. Merci de croire en moi et de m'avoir soutenue sans jamais faiblir. Qu'Allah te protège, te garde en bonne santé et t'accorde une longue vie.

Mon frère Walid, et mes sœurs Mansouria et Bouchra, pour leur affection et leur soutien.

Mes grands-parents, pour leur amour et leurs bénédictions.

À mon mari, pour son soutien et sa patience.

À ma binôme et chère amie Chaïmaa BOUZIAN, pour sa collaboration, son aide précieuse et surtout pour les beaux moments de partage et d'amitié.

À toute ma famille BOUICH, pour leur soutien et leurs encouragements.

Mes chères amies,

Pour les moments partagés, leur amitié sincère, leur soutien moral et leur aide précieuse durant toute la période de mes études.

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dédie le fruit de mes efforts.

Rania

Sommaire

Liste des abréviations.

Liste des tableaux.

Listes des figures

Résumé.

Abstract.

الملخص

Introduction	1
I.1. Rhizosphère	4
I.2. Bactéries promotrices de la croissance des plants (PGPR)	4
I.3. Mécanismes d'action des PGPR	5
I.3.1. Mécanismes directs	5
I.3.2. Mécanismes indirects	6
I.4. Modélisation des activités PGP : corrélation et prédiction	7
I.4.1. Clustering	7
I.4.2. Analyse de clustering hiérarchique (CHA)	8
I.4.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)	8
II.1. Échantillonnage	14
II.1.1. Prélèvement des échantillons	14
II.2. Isolement et identification des rhizobactéries	15
II.2.1. Isolement des rhizobactéries	15
II.2.2. Purification et conservation des isolats	16
II.2.3. Identification des isolats	17
II.2.3.1. Caractères biochimiques	17
II.3. Evaluation des activités PGP	17
II.3.1. Réactivation des isolats	17
II.3.2. Production de l'acide indole acétique	18
II.3.3. Solubilisation du phosphate	18
II.3.3.1. Évaluation qualitative	18
II.3.3.2. Evaluation quantitative	19
II.3.4. Solubilisation du zinc	20
II.3.5. Fixation d'azote atmosphérique	21

II.3.6. Production des sidérophores	21
II.3.7. Production d'exopolysaccharides (EPS)	22
II.3.8. Évaluation des activités enzymatiques des PGPR	23
II.3.8.1. Activité de production de l'amylase	23
II.3.8.2. Activité de production de cellulase	23
II.3.8.3. Activité de production de pectinase.....	23
II.3.8.4. Activité de production de protéase	23
II.3.8.5. Activité de production de lipase.....	24
II.3.8.6. Détermination de l'indice enzymatique	24
II.4. Analyses multiples des activités PGPR	24
II.4.1. Analyse des corrélations	24
II.4.1.1. Corrélation de Pearson.....	25
II.4.1.2. Corrélation de Spearman	25
II.4.1.3. Corrélation de distance (dCor).....	25
II.4.2. Analyse en Composantes Principales ACP	25
III.1. Isolement et identification des isolats	30
III.1.2. Caractérisation biochimique	30
III.2. Evaluation des activités PGP.....	31
III.2.1. Solubilisation du phosphate	31
III.2.1.1. Evaluation qualitative sur milieu gélosé.....	31
III.2.1.2. Evaluation quantitative	32
III.2.1.3. Corrélation entre phosphate soluble et indice de solubilisation	33
III.2.2. Production de l'acide indole acétique (AIA).....	34
III.2.3. Solubilisation du zinc	35
III.2.4. Fixation d'azote atmosphérique.....	37
III.2.5. Production des sidérophores	38
III.2.6. Production d'exopolysaccharides (EPS).....	39
III.2.7. Évaluation des activités enzymatiques des PGPR.....	40
III.2.7.1. Activité de production d'amylase.....	40
III.2.7.2. Activité de production de lipase	41
III.2.7.3. Activité de production de protéase.....	42
III.2.7.4. Activité de production de cellulase	44
III.2.7.5. Activité de production de pectinase	45
III.3. Analyses multiples des activités PGPR.....	46

III.3.1. Analyse des corrélations.....	46
III.3.1.1. Corrélation de Pearson	46
III.3.1.2. Corrélation de Spearman	47
III.3.1.3. Corrélation de distance (dCor)	48
III.3.1.4. Comparaison des trois méthodes de corrélation	49
III.3.2. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	51

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

AIA : Acide indole acétique

IC : Indice cellulolytique

IP : Indice pectinolytique

AE : Autoencodeur

B&R : Bunt et Rovira

BN : Bouillon nutritif

BTB : Bleu de bromothymol

CAS : Chrome Azurol S

CMC : Carboxyméthylcellulose

dCor : Corrélation de distance

DO : Densité optique

EPS : Exopolysaccharides

GN : Gélose nutritive

LB : Luria-Bertani

LI : Indice lipasique

NBRIP : De l'anglais "National Botanical Research Institute of Phosphate medium"

NF : Norris Nitrogen-Free Medium

NFI : Indice de fixation d'azote

PGPR : De l'anglais "Plant growth promoting rhizobacteria"

PI : Indice protéolytique

PKV : Pikovskaya

PSAM : Pectinase screening agar medium

SDR : Indice de production de sidérophores

SI : Indice de solubilisation

SMA : Skim Milk Agar

tr/min : tours par minute

Tryp : Tryptophane

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des coefficients de corrélation (valeurs brutes)

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique des zones de la rhizosphère

Figure 2 : PGPR et leurs modes d'action

Figure 3: Architecture générale de Randon forest

Figure 4 : Architecture générale d'un autoencodeur

Figure 5 : Architecture générale d'un Perceptron Multicouche (MLP)

Figure 6 : Carte géographique du site d'échantillonnage (Google maps)

Figure 7 : Prélèvement des échantillons de sol

Figure 8 : Schéma représentatif de l'isolement des rhizobactéries

Figure 9 : Purification et conservation des isolats

Figure 10 : Réactivation des isolats et préparation de l'inoculum

Figure 11 : Production de l'acide indole acétique (AIA)

Figure 12 : Solubilisation du phosphate (évaluation qualitative)

Figure 13 : Solubilisation du phosphate (évaluation quantitative)

Figure 14 : Test de solubilisation du zinc

Figure 15 : Test de fixation d'azote

Figure 16 : Test de production de sidérophores

Figure 17 : Test de production d'exopolysaccharide EPS

Figure 18 : Test de production des enzymes amylase, cellulase et pectinase

Figure 19 : Test de production des enzymes protéase et lipase

Figure 20 : Architecture Random Forest

Figure 21 : Architecture MLP direct

Figure 22 : Architecture autoencodeur + MLP

Figure 23 : Isolement sur gélose PVK

Figure 24 : Test oxydase

Figure 25 : Solubilisation du phosphate par des isolats sur milieu PVK

Figure 26 : Distribution de l'indice de solubilisation du phosphate par groupe

Figure 27 : Dosage de phosphore soluble selon la méthode de vanado-molybdate

Figure 28 : Distribution de la production de phosphate soluble par groupe

Figure 29 : Relation entre Phosphate soluble et indice de solubilisation du phosphate

Figure 30 : Production de l'acide indole acétique par les isolats

Figure 31 : Distribution de Production de l'acide indole acétique (AIA) par groupe

Figure 32 : Solubilisation du zinc pour quelques isolats

Figure 33 : Distribution de l'indice de solubilisation du zinc par groupe

Figure 34 : Fixation d'azote par les isolats

Figure 35 : Distribution de l'indice de fixation d'azote atmosphérique par groupe

Figure 36 : Production des sédérophores par les isolats

Figure 37 : Distribution de l'indice de production de sidérophores par groupe

Figure 38 : Distribution de production d'exopolysaccharides (EPS)

Figure 39 : Production de l'amylase par les isolats

Figure 40 : Distribution de l'indice de production de l'amylase par groupe

Figure 41 : Production de lipase par les isolats

Figure 42 : Distribution de l'indice de production de lipase par groupe

Figure 43 : Production de protéase par les isolats

Figure 44 : Distribution de l'indice de production de protéase par groupe

Figure 45 : Production de cellulase par les isolats

Figure 46 : Distribution de l'indice de production de cellulase par groupe

Figure 47 : Production de pectine par les isolats

Figure 48 : Distribution de l'indice de production de pectinase par groupe

Figure 49 : Matrice de corrélation Pear

Figure 50 : Matrice de corrélation Spearman

Figure 51 : Matrice de corrélation Distance (dcor)

Figure 52 : Comparaison des coefficients de corrélation

Figure 53 : Cercle de corrélation ACP

Figure 54 : Contributions des variables aux composantes principales

Figure 55 : Random Forest - R^2 en fonction de K

Figure 56 : MLP direct - R^2 en fonction de K

Figure 57 : Autoencodeur + MLP - R^2 en fonction de K

Figure 58 : Comparaison des R^2 des trois méthode (RF , MLP direct , AE +MLP)

Figure 59 : Comparaison des meilleurs R^2 des trois méthode (RF , MLP direct , AE +MLP)

Résumé

Les activités PGPR constituent un ensemble de mécanismes fonctionnels impliqués dans la nutrition des plantes et le biocontrôle des phytopathogènes. Dans ce travail, 460 isolats bactériens issus de la rhizosphère de 34 échantillons de sol prélevés dans la wilaya de Mostaganem ont été obtenus et évalués pour leurs 11 activités PGPR. L'objectif était d'analyser les interdépendances entre ces traits fonctionnels et de modéliser leur prédictibilité à partir des profils phénotypiques. Les activités étudiées incluent la solubilisation du phosphate et du zinc, la fixation de l'azote, la production d'AIA, de sidérophores et d'exopolysaccharides (EPS), ainsi que la production de cinq enzymes hydrolytiques (amylase, lipase, protéase, cellulase et pectinase). Les analyses de corrélation (Pearson, Spearman, dCor) et l'ACP ont révélé des liaisons globalement faibles entre la plupart des mécanismes, à l'exception d'un antagonisme marqué entre la production d'EPS et les activités enzymatiques hydrolytiques, traduisant un compromis métabolique (trade-off) dans l'allocation des ressources carbonées. En revanche, la production d'AIA est restée systématiquement non prédictible (R^2 négatifs pour les trois approches), suggérant une régulation génétique autonome, déconnectée des autres traits PGP mesurés.

Mots clés : PGPR, solubilisation du phosphate, solubilisation du zinc, Random forest, rhizosphère.

Abstract

PGPR activities constitute a set of functional mechanisms involved in plant nutrition and the biocontrol of phytopathogens. In this work, 460 bacterial isolates obtained from the rhizosphere of 34 soil samples collected in the Mostaganem province were evaluated for 11 PGPR activities. The objective was to analyze the interdependencies between these functional traits and to model their predictability based on phenotypic profiles. The studied activities included phosphate and zinc solubilization, nitrogen fixation, production of IAA, siderophores, and exopolysaccharides (EPS), as well as the production of five hydrolytic enzymes (amylase, lipase, protease, cellulase, and pectinase). Correlation analyses (Pearson, Spearman, dCor) and PCA revealed overall weak links between most mechanisms, with the exception of a marked antagonism between EPS production and hydrolytic enzymatic activities, reflecting a metabolic trade-off in the allocation of carbon resources.. In contrast, IAA production remained consistently unpredictable (negative R^2 for all three approaches), suggesting an autonomous genetic regulation, disconnected from the other measured PGP traits.

Keywords: PGPR, phosphate solubilization, zinc solubilization, Random Forest, rhizosphere.

المخلص

تمثل أنشطة PGPR مجموعة من الآليات الوظيفية المشاركة في تغذية النباتات والمكافحة الحيوية لمسببات الأمراض النباتية. في هذه الدراسة، تم عزل 460 عزلة بكتيرية من الرايزوسفير انطلاقاً من 34 عينة تربة جُمعت من ولاية مستغانم، وتم تقييمها من حيث 11 نشاطاً وظيفياً مرتبطاً بـ PGPR. أظهرت تحليلات الارتباط (Pearson, Spearman, dCor) وتحليل المكونات الرئيسية (ACP) وجود علاقات ضعيفة عموماً بين معظم هذه الأنشطة، باستثناء وجود تعارض واضح بين إنتاج السكريات خارج الخلوية والأنشطة الإنزيمية التحليلية، مما يعكس وجود مفاضلة (trade-off) في تخصيص الموارد الكربونية. في المقابل، ظل إنتاج حمض اندول الخليك غير قابل للتنبؤ بشكل منهجي، مما يشير إلى أنه يخضع لتنظيم مستقل وغير مرتبط ببقية الصفات الوظيفية المدروسة.

الكلمات المفتاحية: PGPR ، siderophores ، الرايزوسفير.

Introduction

Introduction

Les bactéries promotrices de la croissance des plantes (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*, PGPR) sont des microorganismes bénéfiques qui colonisent activement la rhizosphère et stimulent la croissance végétale par divers mécanismes directs et indirects (Vessey, 2003). Parmi ces mécanismes figurent la fixation biologique de l'azote, la solubilisation du phosphate et du zinc, la production de sidérophores, la synthèse de phytohormones ainsi que la production d'exopolysaccharides (EPS) et d'enzymes lytiques (amylase, lipase, protéase, cellulase, pectinase) impliquées dans le biocontrôle (Deka *et al.*, 2015). Chaque souche PGPR peut exprimer simultanément plusieurs de ces activités *in vitro*.

Dans ce contexte, l'étude des interdépendances entre ces multiples traits fonctionnels est cruciale : certaines activités peuvent être synergétiques et renforcer l'efficacité d'une souche, tandis que d'autres peuvent entrer en compétition pour les ressources métaboliques cellulaires, induisant des compromis physiologiques (*trade-offs*) (Gupta et Buch, 2019). Comprendre ces relations est essentiel pour orienter le criblage et la sélection rationnelle de souches performantes en biofertilisation et en biocontrôle.

L'étude des interactions entre les activités PGP nécessite le recours à différentes approches statistiques et computationnelles. Des méthodes de clustering permettent de regrouper des souches présentant des profils fonctionnels similaires (Jain *et al.*, 1999), tandis que les coefficients de corrélation de Pearson, de Spearman ou la corrélation de distance (Székely *et al.*, 2007) quantifient les relations linéaires ou non linéaires entre activités. L'analyse en composantes principales (ACP) facilite la visualisation de la structure multidimensionnelle des données (Abdi et Williams, 2010).

Par ailleurs, des techniques d'apprentissage automatique, telles que Random Forest (Breiman, 2001) ou les réseaux de neurones (perceptron multicouche – MLP – et autoencodeurs) (Lecun *et al.*, 2015), sont employées pour prédire les niveaux d'expression de certaines activités PGP à partir d'un ensemble d'autres caractères phénotypiques.

L'objectif de cette étude est d'analyser et de modéliser les relations entre 11 activités PGP différentes, évaluées sur une large collection de 460 isolats bactériens issus de la rhizosphère de 34 échantillons de sol. Nous avons cherché à : (i) quantifier les corrélations (linéaires, monotones et globales) entre ces activités, (ii) visualiser les structures d'association par ACP, et (iii) comparer les capacités prédictives de trois approches computationnelles (Random Forest, MLP direct, et Autoencodeur associé à un MLP) afin d'identifier les traits

Introduction

fonctionnels les plus facilement prédictibles et de mettre en évidence d'éventuels compromis métaboliques majeurs au sein de ce pool bactérien.

Chapitre I :
Revue bibliographique

I.1. Rhizosphère

Le terme « rhizosphère » provient du grec « rhiza » (racine) et « sphaira » (sphère ou champ d'influence). Il a été introduit par Hiltner (1904) pour désigner la zone du sol directement adjacente aux racines des légumineuses, caractérisée par une activité microbienne intense (Prashar *et al.*, 2014).

La rhizosphère est constituée de trois compartiments principaux (Fig. 1) (Clark et Iowa, 1949; Lynch, 1990; Pinton *et al.*, 2001) : l'endorhizosphère, correspondant aux tissus internes de la racine (endoderme et cortex) ; le rhizoplane, qui représente la surface racinaire en contact direct avec les particules du sol et les micro-organismes, incluant l'épiderme, le cortex externe et la couche mucilagineuse ; et l'ectorhizosphère, qui désigne la zone du sol immédiatement adjacente à la racine.

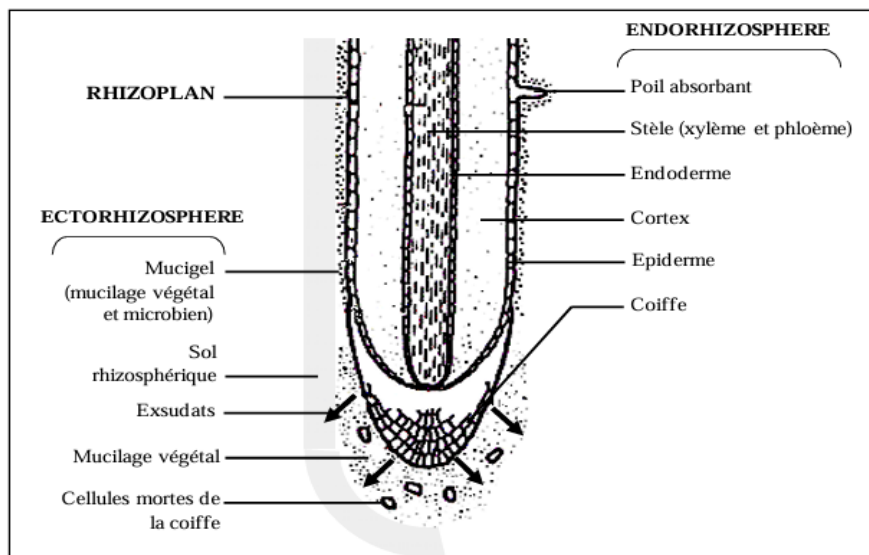


Figure 1 : Représentation schématique des zones de la rhizosphère (Lynch, 1983)

Selon Philippot *et al.* (2013), la rhizosphère est considérée comme l'une des interfaces les plus dynamiques de la planète en raison des interactions multiples qui s'y déroulent entre les racines, les micro-organismes et les invertébrés.

I.2. Bactéries promotrices de la croissance des plants (PGPR)

Le terme « rhizobactéries » a été introduit par Kloepper et Schroth (1978) pour désigner la communauté bactérienne du sol qui colonise de manière compétitive les racines des plantes, stimule leur croissance et réduit ainsi l'incidence des maladies végétales (Fig.2). Kloepper et Schroth (1981) ont ensuite qualifié ces rhizobactéries bénéfiques de « rhizobactéries favorisant la croissance des plantes » (PGPR). Les PGPR peuvent être définies comme la composante

indispensable du biote rhizosphérique qui, lorsqu'elles se développent en association avec les plantes hôtes, sont capables d'en stimuler la croissance (**Bhattacharyya et Jha, 2012**).

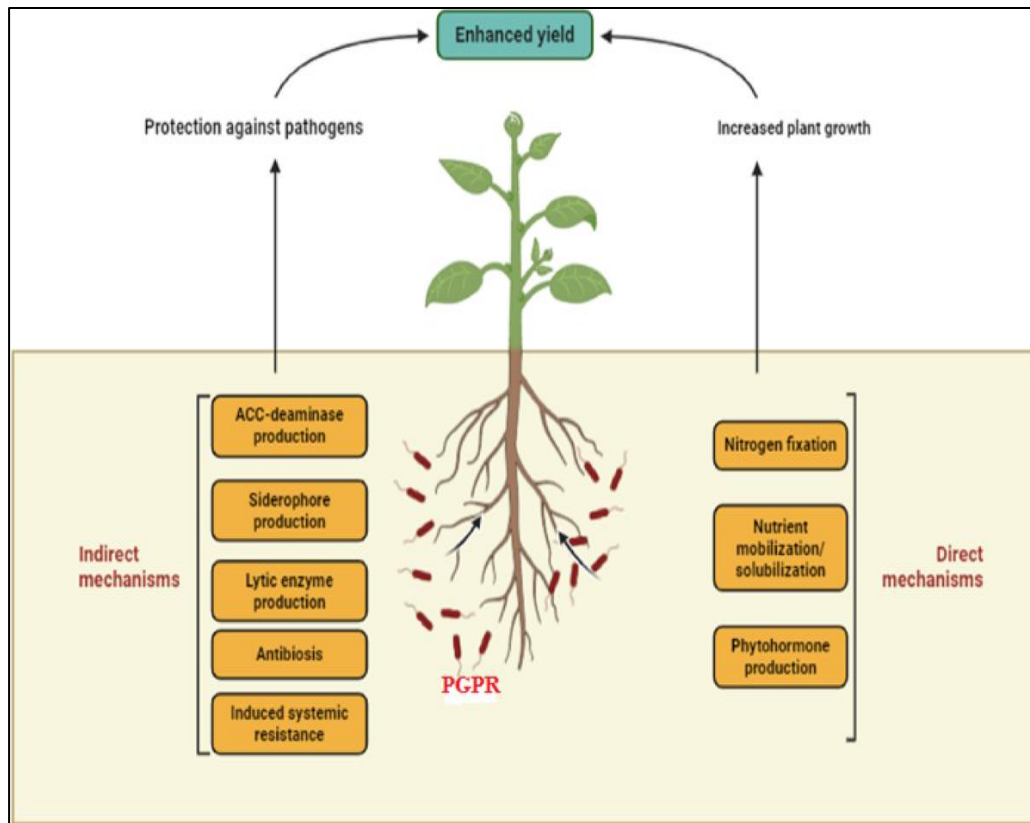


Figure 2 : PGPR et leurs modes d'action (Oubohssaine *et al.*, 2025)

I.3. Mécanismes d'action des PGPR

Les rhizobactéries (PGPR) agissent via deux modes complémentaires (**Chandran *et al.*, 2021**). Le mode direct stimule la croissance en facilitant l'absorption d'azote, phosphore et fer, et en produisant des phytohormones (**Glick, 2012**). Le mode indirect protège contre les pathogènes via des métabolites antimicrobiens, des enzymes hydrolytiques (protéase, lipase) dégradant les parois cellulaires, et l'induction d'une résistance systémique (**Gouda *et al.*, 2018**).

I.3.1. Mécanismes directs

L'activité de fixation de l'azote consiste à convertir l'azote atmosphérique (N_2), inassimilable par les plantes et les animaux, en ammoniac (NH_3) grâce au complexe enzymatique nitrogénase de micro-organismes fixateurs. L'azote est pourtant un élément nutritif essentiel à la croissance des plantes, car il entre dans la composition des acides nucléiques, des protéines et des enzymes. Ce processus est appelé fixation biologique de l'azote (**Tairo et Ndakidemi, 2013**).

L'activité de solubilisation du phosphore est essentielle car le phosphore est un macronutriment majeur pour la croissance des plantes (métabolisme, transduction des signaux, biosynthèse, photosynthèse). Pourtant, plus de 90 % du phosphore du sol est insoluble, immobilisé ou précipité, limitant son absorption. Les plantes ne l'assimilent que sous forme d'ions H_2PO_4^- ou $(\text{HPO}_4)^{2-}$. Les bactéries solubilisatrices de phosphate, abondantes dans la rhizosphère, synthétisent des acides organiques (gluconique, citrique) et possèdent l'enzyme phosphatase, convertissant ainsi le phosphore inorganique en ions assimilables (**Anand et al., 2016**).

L'activité de solubilisation du zinc est essentielle car le zinc est un oligo-élément impliqué dans la synthèse des protéines, des acides nucléiques et la régulation des hormones végétales. Dans le sol, le zinc est souvent présent sous des formes peu solubles, difficilement assimilables. Les PGPR capables de solubiliser le zinc transforment ces composés insolubles en formes biodisponibles grâce à la production d'acides organiques (notamment gluconique et citrique), de sidérophores et d'autres agents chélateurs. Ces acides abaissent le pH du sol et forment des complexes solubles avec le zinc (**Pathak et al., 2026**).

L'acide indole-3-acétique (AIA) est une phytohormone produite par les PGPR, synthétisée principalement au niveau de la rhizosphère. Cette hormone joue un rôle clé dans la stimulation de l'élongation racinaire, de la formation des poils racinaires et du développement des racines latérales, ce qui améliore globalement la capacité des plantes à absorber l'eau et les nutriments. D'autres activités directes des PGPR incluent la production de sidérophores (capture du fer), la synthèse de cytokinines et gibbérellines, ainsi que l'activité ACC désaminase qui réduit le stress éthylénique (**Luo et al., 2018; Poveda et al., 2021**).

I.3.2. Mécanismes indirects

Les mécanismes indirects incluent la production de sidérophores, d'exopolysaccharides (EPS) et d'enzymes lytiques. Les sidérophores sont de petites molécules chélatrices synthétisées par certaines bactéries pour solubiliser le Fe^{3+} , forme insoluble et inassimilable du fer en milieu aérobie, ce mécanisme prive les micro-organismes pathogènes du fer indispensable, constituant ainsi un moyen de biocontrôle (**Rehman et al., 2020**). Par ailleurs, les PGPR sécrètent des EPS, des polymères glucidiques qui peuvent former une capsule ou être libérés sous forme de mucus ; ces exopolysaccharides jouent un rôle clé dans la formation de biofilms, la protection contre la dessiccation, le maintien des fonctions cellulaires, l'activité antibactérienne, la gélification et la régulation de la dégradation des polluants (**Glick, 1999 ; Bhaskar et Bhosle, 2005; Pal et al., 1999; Fusconi et Godinho, 2002**). Enfin, la production

d'enzymes lytiques telles que les glucanases, protéases, pectinase, cellulase, chitinases et lipases par les PGPR permet de dégrader la paroi cellulaire fongique des agents pathogènes, entraînant leur digestion ou déformation et protégeant ainsi les plantes contre le stress biotique (Jeyanthi et Kanimozhi, 2018).

I.4. Modélisation des activités PGP : corrélation et prédiction

La modélisation statistique vise à décrire, expliquer et anticiper les liens entre différentes variables. La corrélation, qui mesure l'intensité du lien, constitue une étape exploratoire préliminaire. Pour étudier les relations entre paramètres, on utilise fréquemment la corrélation de Pearson et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La corrélation de Pearson évalue la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables (Hussain *et al.*, 2013). L'ACP réduit la dimension des données, visualise les liaisons multiples et identifie les traitements les plus performants en les projetant sur des axes factoriels (Khan *et al.*, 2022).

L'apprentissage automatique (machine learning) désigne un ensemble de techniques capables d'identifier des motifs complexes et de générer des prédictions à partir de données, sans imposer d'hypothèses contraignantes. En biologie, ces approches sont de plus en plus employées pour modéliser des relations non linéaires et analyser des données bruitées. Parmi ces méthodes, les forêts aléatoires (Random Forest) et les réseaux de neurones artificiels, notamment le perceptron multicouche (MLP), ont démontré une grande efficacité dans divers domaines biologique (Allen Akselrud, 2024). Par ailleurs, l'autoencodeur, qui relève de l'apprentissage non supervisé, est utilisé en amont afin de réduire la dimension des données et d'en atténuer le bruit avant de procéder à la modélisation prédictive (Vessies *et al.*, 2023).

I.4.1. Clustering

Le clustering, ou classification non supervisée, est une méthode d'analyse de données dont l'objectif est de partitionner un ensemble d'observations en sous-groupes homogènes, appelés clusters. Cette approche consiste à diviser les données de telle sorte que les échantillons appartenant à un même cluster soient les plus similaires possibles entre eux, tandis que les échantillons de clusters différents soient les plus dissimilaires possible. Contrairement à la classification supervisée, le clustering ne dispose d'aucune étiquette ou réponse préétablie pour guider l'apprentissage : les groupes doivent être découverts aveuglément à partir des seules caractéristiques des données. Chaque cluster est caractérisé par un centroïde, qui représente le membre idéal moyen du groupe. Une question centrale dans cette méthode est la détermination du nombre optimal de clusters, noté K, qui peut être choisie à partir de connaissances du domaine (Biscarini et Nazzicari, 2026).

I.4.2. Analyse de clustering hiérarchique (CHA)

La classification hiérarchique ascendante (CHA) est une méthode de clustering qui permet d'explorer la structure des échantillons en formant des groupes et des sous-groupes organisés hiérarchiquement (**Lee et Yang, 2009**). Le résultat de cette méthode est généralement représenté sous forme de dendrogramme, un schéma en arbre illustrant les relations entre les échantillons ainsi que leur organisation en clusters.

Deux stratégies principales permettent de construire cette hiérarchie : l'approche agglomérative et l'approche divisive. Dans l'approche agglomérative, chaque échantillon constitue initialement un cluster individuel, puis les groupes les plus proches sont progressivement fusionnés. Dans l'approche divisive, on part d'un seul cluster contenant tous les échantillons, que l'on subdivise de manière récursive (**Granato et al., 2018**). La construction des groupes repose sur une mesure de distance entre échantillons (par exemple la distance euclidienne ou la distance de Manhattan) et sur un critère de liaison qui définit la distance entre clusters. Les critères les plus courants sont les liaisons simple, complète et moyenne, ainsi que la méthode de Ward. Cette dernière cherche à minimiser l'augmentation de l'inertie intra-groupe à chaque fusion, ce qui permet d'obtenir des clusters compacts et homogènes (**Granato, Karnopp et van Ruth, 2015**).

I.4.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique d'apprentissage non supervisé. Elle permet de résumer des données de grande dimension (c'est-à-dire comportant de nombreuses variables numériques) en un plus petit nombre de variables synthétiques appelées composantes principales. Ces composantes capturent l'essentiel de la variabilité présente dans les données d'origine. Chaque composante principale j est une combinaison linéaire des p variables initiales, pondérée par des coefficients spécifiques appelés *poids* (ou charges, notés w). Pour un individu i et une composante j , le score est donné par :

$$z_{ij} = w_{1j}x_{i1} + w_{2j}x_{i2} + \dots + w_{pj}x_{ip}$$

Les composantes principales sont centrées (moyenne nulle), orthogonales entre elles (non corrélées), et leur variance calculée sur n individus est :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ij}^2$$

Ces composantes peuvent ensuite être utilisées à diverses fins : classification (clustering), création de nouvelles variables, extraction de caractéristiques, ainsi que visualisation des tendances et des relations entre les variables au sein des données (**Biscarini et Nazzicari, 2026**).

Chapitre II :
Matériels et méthodes

II. Matériels et méthodes

II.1. Échantillonnage

II.1.1. Prélèvement des échantillons

Les échantillons de sol ont été prélevés dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées : navet, fève, salade, oignon, menthe, petit pois, pomme de terre, blé, carotte et tomate. Les prélèvements ont été réalisés dans plusieurs localités de la wilaya de Mostaganem (**Fig. 6**) : Aïn Tedeles, Douar Ouled Chikh (Mansourah), Ben Abdelmalek Ramdane, Ouled Boughalem, Hadjadj, Sidi Ali, Ouillis, Sidi Lakhdar, Sour et Douar-Dreifia (Mansourah). Les coordonnées géographiques (latitude, longitude) de chaque point de prélèvement sont présentées dans le tableau en annexe (**Annexe V**).



Figure 6 : Carte géographique du site d'échantillonnage (Google maps)

Les échantillons de sol rhizosphérique ont été prélevés à une profondeur de 10 à 15 cm. Dans des conditions aseptiques, le sol a été recueilli afin d'éviter toute contamination, puis transféré dans des sacs en plastique stériles. Les échantillons ont ensuite été acheminés au laboratoire pour y être analysés (**Fig. 7**).



Figure 7 : Prélèvement des échantillons de sol

II.2. Isolement et identification des rhizobactéries

II.2.1. Isolement des rhizobactéries

Une solution mère a été préparée par dissolution de 10 g de sol dans 90 mL d'eau physiologique stérile, puis homogénéisée à l'aide d'un vortex. Des dilutions décimales successives ont ensuite été réalisées jusqu'à 10^{-5} . Ensuite 0,1 mL des trois dernières dilutions a été utilisées pour l'ensemencement en surface des boîtes de pétri contenant le milieu Pikovskaya (PKV) (Pikovskaya, 1948) (Annexe I). Les boîtes ont ensuite été incubées à 30 °C pendant 7 jours (Fig. 8) (Mengesha et Legesse, 2024).

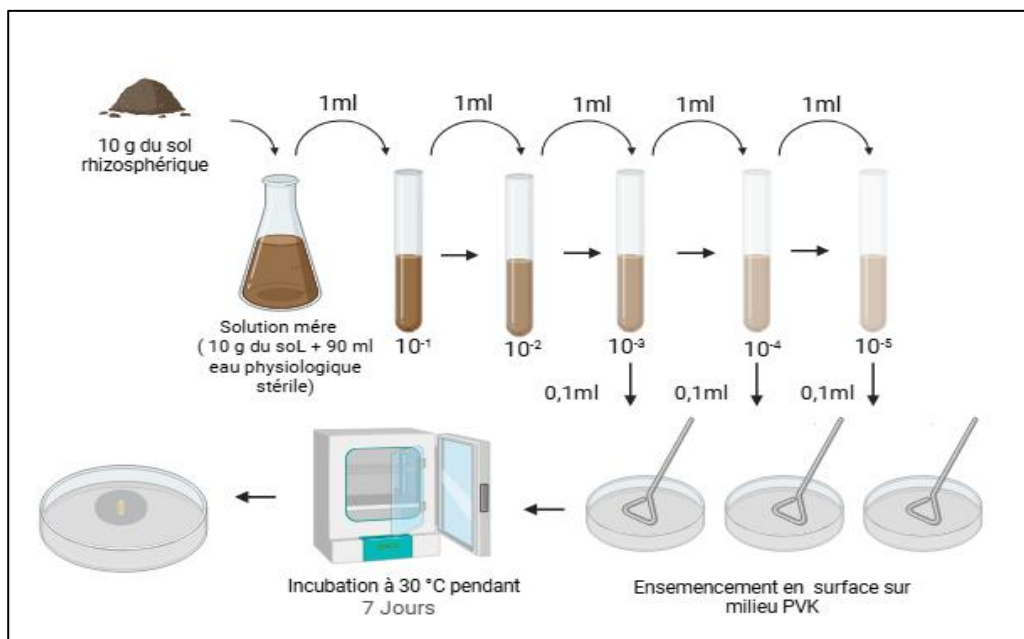


Figure 8 : Schéma représentatif de l'isolement des rhizobactéries

II.2.2. Purification et conservation des isolats

Après incubation, les isolats présentant un halo clair ont été repiqués par strie d'épuisement sur gélose nutritive (GN) (**Annexe I**), puis incubés à 30 °C pendant 24 h. Cette opération a été répétée jusqu'à l'obtention de colonies pures. Les isolats purs ont ensuite été conservés à 4 °C dans des tubes de gélose inclinée (**Fig. 9**).

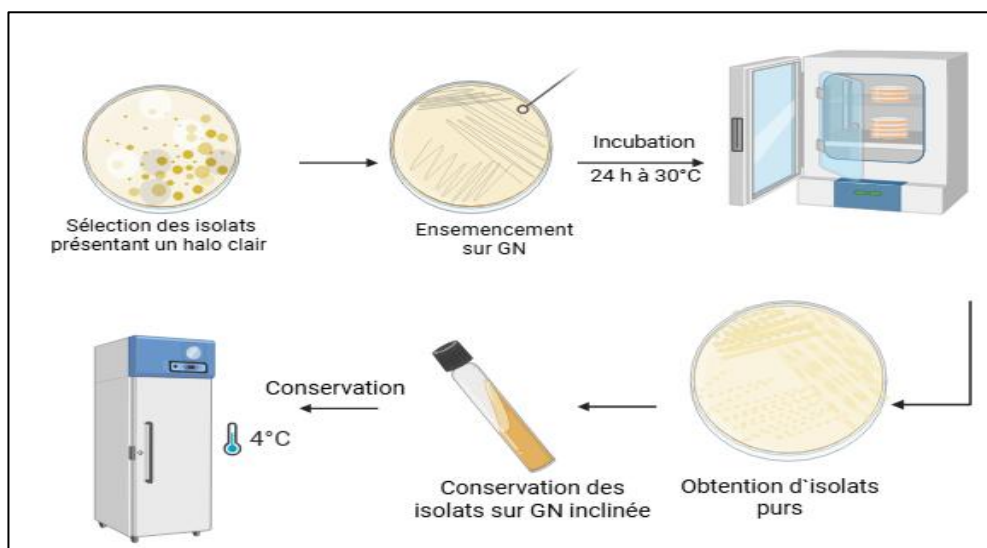


Figure 9 : Purification et conservation des isolats

II.2.3. Identification des isolats

II.2.3.1. Caractères biochimiques

II.2.3.1.1. Test de catalase

La catalase est une enzyme qui dégrade l'eau oxygéné (H_2O_2) en eau (H_2O) et oxygène (O_2), selon la réaction suivante :



Le test de la catalase a été réalisé en déposant, à l'aide d'une anse stérile, une colonie bactérienne sur une lame de verre propre, puis en ajoutant quelques gouttes de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à 3 %. Une production immédiate de bulles d'oxygène (O_2) indique une réaction positive ; l'absence de bulles, une réaction négative (**Marchal *et al.*, 1982**).

II.2.3.1.2. Test oxydase

La recherche d'oxydase (cytochrome oxydase) a été effectuée à l'aide de disques d'oxydase. Une partie de la colonie à tester a été étalée sur le disque. Une coloration violet foncé apparaissant immédiatement indique une oxydase positive ; l'absence de coloration indique une oxydase négative (**Flandrois et Chomarat, 1988**).

II.3. Evaluation des activités PGP

II.3.1. Réactivation des isolats

Les isolats ont été réactivés par ensemencement sur gélose nutritive (GN) et incubation à 30 °C pendant 18–24 h. Les cultures obtenues ont servi à préparer l'inoculum des tests, après ajustement de la densité optique à $\text{DO}_{620} = 0,08$ à l'aide d'un spectrophotomètre (*JENWAY 6715*) (**Fig. 10**).

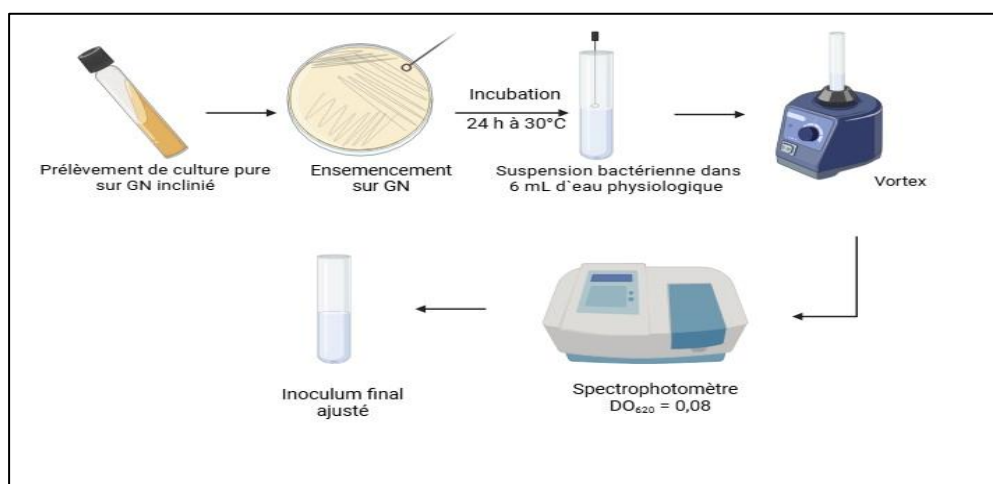


Figure 10 : Réactivation des isolats et préparation de l'inoculum

II.3.2. Production de l'acide indole acétique

La production d'AIA (acide indole-3-acétique) a été évaluée selon la méthode décrite par **Loper et Schroth (1986)**. Tous les isolats ont été cultivés dans du bouillon LB additionné de tryptophane (100 mg/L). Après ensemencement de 50 mL de milieu avec 1 mL d'inoculum ($DO_{620} = 0,08$) et incubation à 30 °C pendant 96 h sous agitation (160 tr/min), 5 mL de culture ont été centrifugés (6 000 tr/min, 20 min). 1 mL de surnageant a été ajoutés à 2 mL de réactif de Salkowski et deux gouttes d'acide orthophosphorique (**Fig. 11**). Après 30 min à l'obscurité et à température ambiante, une couleur rose indique une production positive d'AIA. La DO a été mesurée à 530 nm, et la concentration en AIA déterminée par courbe d'étalonnage (**Annexe II**).

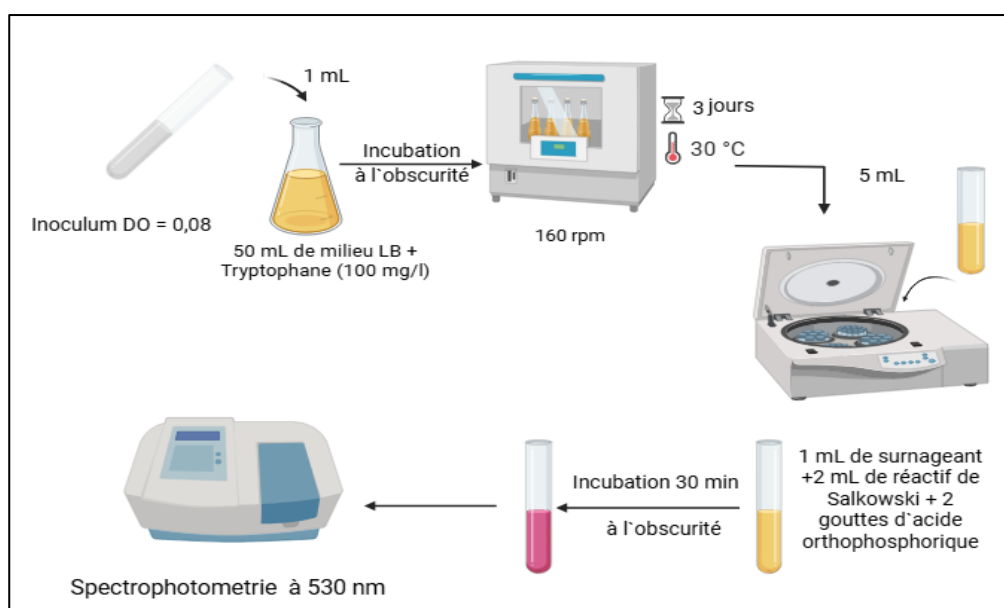


Figure 11 : Production de l'acide indole acétique (AIA)

II.3.3. Solubilisation du phosphate

La capacité des isolats à solubiliser le phosphate inorganique $Ca_3(PO_4)_2$ a été évaluée par deux approches complémentaires : qualitative (observation de halos de solubilisation) et quantitative (dosage du phosphate libéré en milieu liquide).

II.3.3.1. Évaluation qualitative

Selon **Ali et al. (2022)**. Des spots de 5 μ L de l'inoculum de chaque isolat ont été déposés à la surface de boîtes de Petri contenant de la gélose de Pikovskaya (**Annexe I**). Les boîtes ont ensuite été incubées à 30 °C pendant 6 à 7 jours. L'apparition d'un halo clair autour des colonies a été considérée comme un indicateur de l'activité de solubilisation du phosphate (**Fig. 12**).

L'indice de solubilisation (IS) a ensuite été calculé selon l'équation suivante (**Boubekri et al., 2021**).

$$SI = \frac{\text{diamètre de la colonie} + \text{diamètre de la zone d'halo}}{\text{diamètre de la colonie}}$$

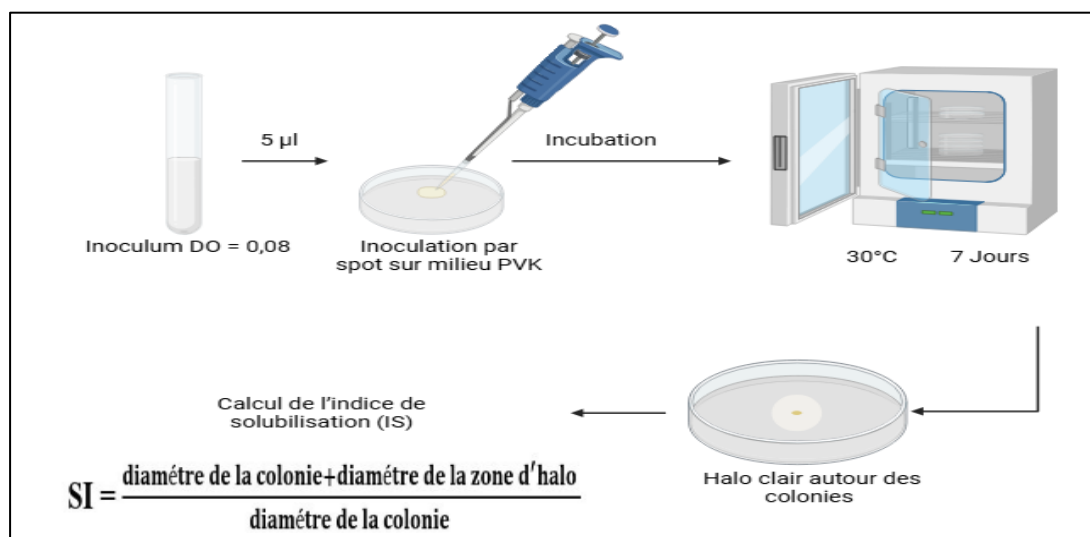


Figure 12 : Solubilisation du phosphate (évaluation qualitative)

II.3.3.2. Evaluation quantitative

L'évaluation quantitative de la solubilisation du phosphate a été réalisée en utilisant le milieu NBRIP (**Nautiyal, 1999**) (**Annexe I**) (National Botanical Research Institute's Phosphate broth).

Un volume de 50 mL de milieu a étéensemencé avec 1 mL d'inoculum, puis incubé à 30 °C sous agitation (160 tr/min pendant 7 jours). Après centrifugation (6 000 tr/min, pendant 10 min), le surnageant a été récupéré. Le phosphate soluble a été dosé par la méthode au jaune vanado-molybdate (**Jackson, 1958**): 1 mL de surnageant plus 2,5 mL de réactif de Barton (**Annexe IV**) dans une fiole de 50 mL, complétée à 50 mL avec de l'eau distillée. Après 10 min d'incubation, l'absorbance a été mesurée à 430 nm (spectrophotomètre *JENWAY 6715*) (**Fig. 13**). La concentration en phosphore a été calculée à partir de la courbe d'étalonnage (**Annexe II**).

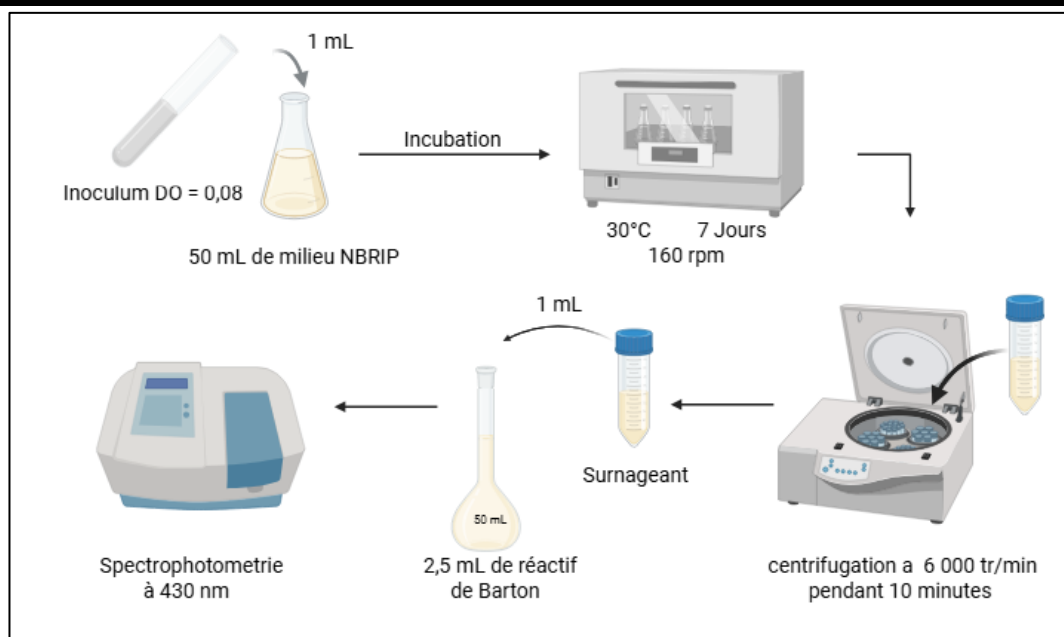


Figure 13 : Solubilisation du phosphate (évaluation quantitative)

II.3.4. Solubilisation du zinc

La capacité des souches isolées à solubiliser le zinc a été évaluée en utilisant le milieu de Bunt et Rovira (B&R) (**Chanu et Yadav, 2024**) (**Annexe I**) supplémenté de 1,0 mg/mL d'oxyde de zinc (ZnO) comme source insoluble de zinc. Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur gélose, puis incubés à 28 °C pendant 7 jours (**Chaffai et al., 2024**). L'apparition d'un halo clair indique une solubilisation du zinc (**Fig. 14**). Les diamètres des colonies et des halos ont été mesurés après 72 h. L'indice de solubilisation (IS) a été calculé selon **Boubekri et al. (2021)** à l'aide de l'équation suivante :

$$SI = \frac{\text{diamètre de la colonie} + \text{diamètre de la zone d'halo}}{\text{diamètre de la colonie}}$$

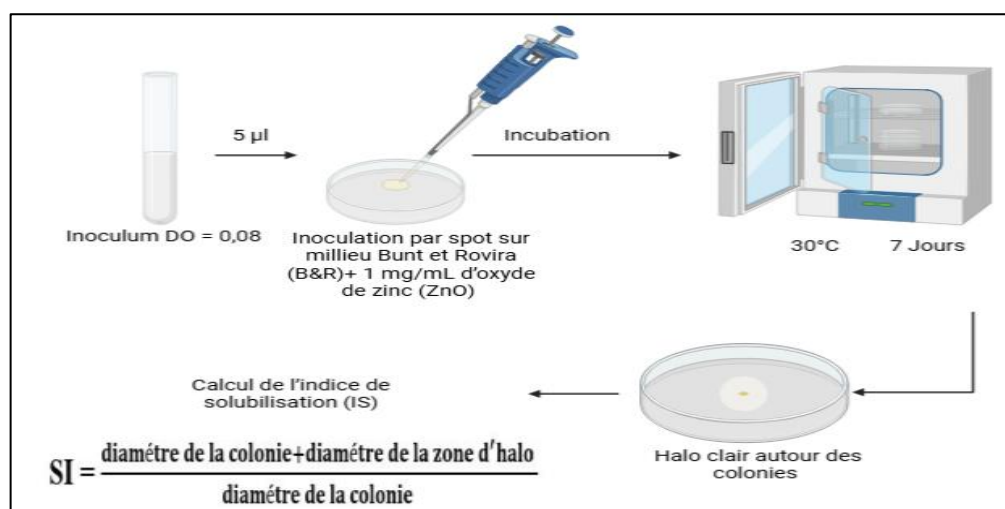


Figure 14 : Test de solubilisation du zinc

II.3.5. Fixation d'azote atmosphérique

La fixation d'azote a été évaluée sur milieu Norris NF sans azote, additionné de bleu de bromothymol (BTB) (**Annexe I**). Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur gélose NF, puis incubés à 30 °C pendant 24 h (**Fig. 15**). Une coloration bleue autour des colonies indique une fixation positive. L'indice de fixation a été calculé selon **Rupareliya et Shukla, (2026)** à l'aide de l'équation suivante :

$$NFI = \frac{\text{diamètre de la colonie} + \text{diamètre de la zone bleu}}{\text{diamètre de la colonie}}$$

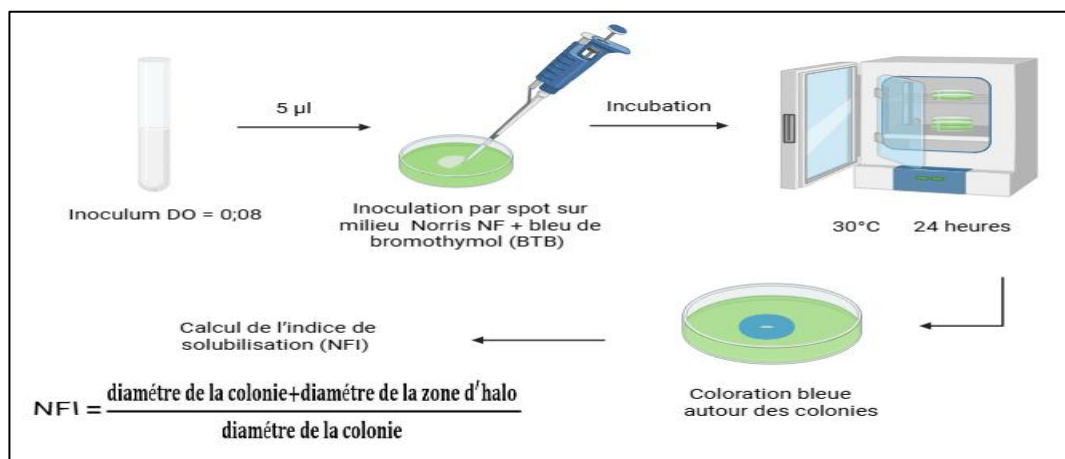


Figure 15 : Test de fixation d'azote

II.3.6. Production des sidérophores

La production de sidérophores a été testée sur milieu Chrome Azurol S (CAS) (**Annexe IV**). Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur gélose CAS, puis incubés à 30 °C pendant 5 jours. Un halo orange indique une production positive (**Alexander et Zuberer, 1991**) (**Fig. 16**). L'indice de sidérophore (SI) a été calculé selon **Shreshtha et al. (2025)** à l'aide de l'équation suivante :

$$SI = \frac{\text{diamètre de la colonie} + \text{diamètre de la zone d'halo}}{\text{diamètre de la colonie}}$$

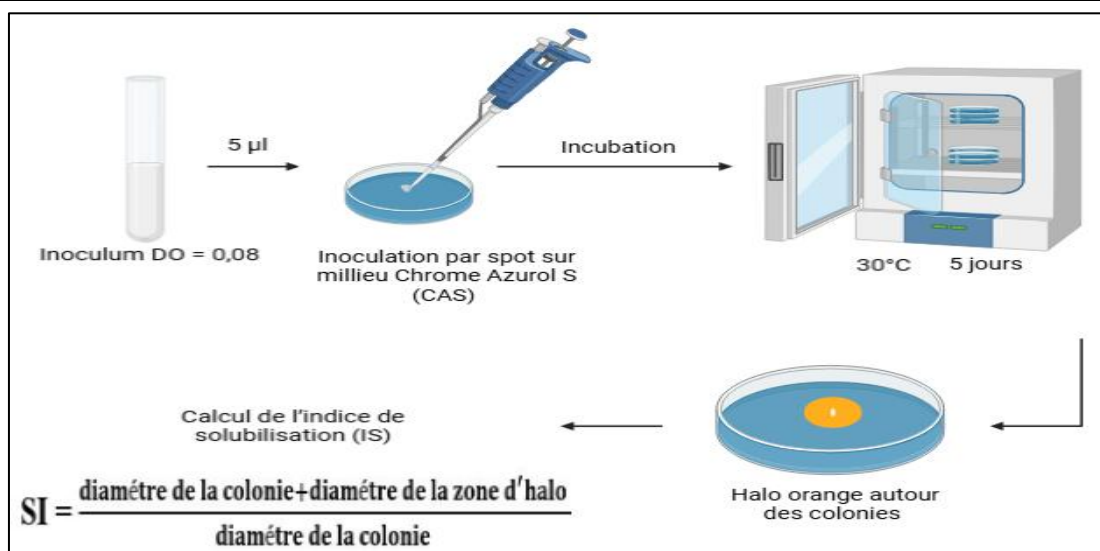


Figure 16 : Test de production de sidérophores

II.3.7. Production d'exopolysaccharides (EPS)

La production d'exopolysaccharides (EPS) a été évaluée selon **Nicolaus *et al.* (1999)** en milieu liquide. Des tubes contenant 10 mL de bouillon nutritif (BN) enrichi en glucose à 5 % (**Annexe I**) ont été ensemencés avec 100 μL d'inoculum, puis incubés à 30°C pendant 40 h. Après centrifugation (6 000 tr/min pendant 20 min), le surnageant a été mélangé à de l'acétone froide (1:2, v/v) et incubé pendant 24 h pour précipiter les EPS. Le mélange a été filtré par papier filtre prépesé. Après séchage, le papier a été repesé pour déterminer la masse d'EPS produite (**Fig. 17**) (**Einizadeh *et al.*, 2025**).

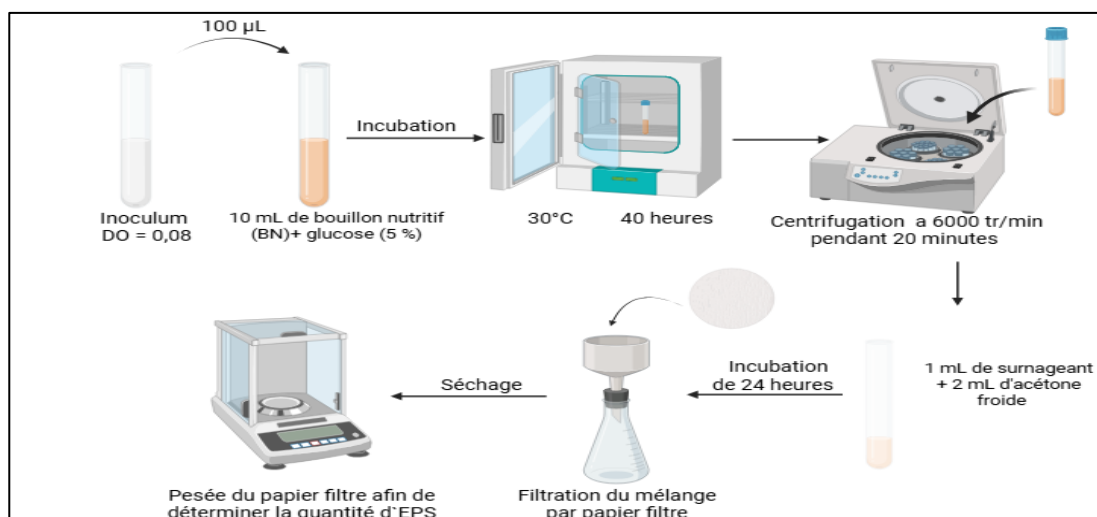


Figure 17 : Test de production d'exopolysaccharide EPS

II.3.8. Évaluation des activités enzymatiques des PGPR

II.3.8.1. Activité de production de l'amylase

L'activité de production de l'amylase a été testée sur gélose à l'amidon (starch agar) (**Annexe I**) (**Jabiri *et al.*, 2023**). Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur le milieu, puis incubés à 30 °C pendant 72 h. Après ajout de lugol, une zone claire autour des colonies indique une hydrolyse positive de l'amidon (**Fig. 18**) (**Taoussi *et al.*, 2026**).

II.3.8.2. Activité de production de cellulase

L'activité de production de cellulase a été évaluée selon **Bera *et al.* (2015)** sur gélose à la carboxyméthylcellulose (CMC) (**Annexe I**). Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur le milieu CMC, puis incubés à 30 °C pendant 48 h. Après incubation, une solution de lugol a été ajoutée (pendant 5 min) pour révéler l'hydrolyse de la CMC. Un halo clair autour des colonies indique une activité positive (**Fig. 18**).

II.3.8.3. Activité de production de pectinase

La production de pectinase a été testée sur gélose PSAM (**Annexe I**). Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur le milieu, puis incubés à 30 °C pendant 7 jours. Après incubation, le lugol a été ajouté (pendant 15 min). Une zone claire autour des colonies indique une activité pectinase positive (**Fig. 18**) (**Venkata Naga Raju et Divakar, 2013**).

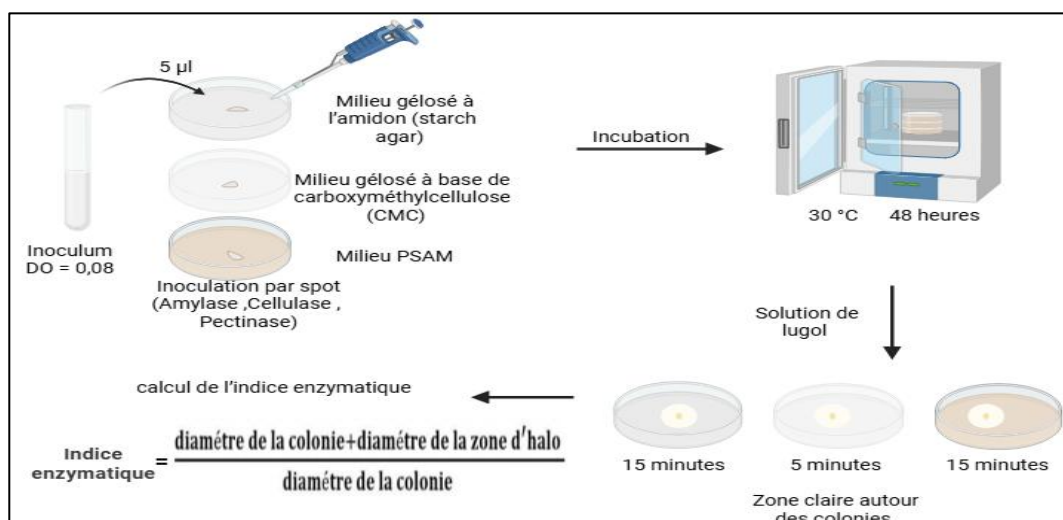


Figure 18 : Test de production des enzyme amylase, cellulase et pectinase

II.3.8.4. Activité de production de protéase

La capacité production de protéase des différents isolats bactériens a été testée sur gélose au lait écrémé (SMA) (**Annexe I**). Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur le milieu SMA, puis incubés à 30 °C pendant 48 h (**Fig. 19**). Une zone claire autour des colonies,

témoignant de l'hydrolyse des protéines du lait, indique une activité protéasique positive (Malleswari et Bagyanarayana, 2013; Ntabo *et al.* 2018).

II.3.8.5. Activité de production de lipase

L'activité de production de lipase a été testée sur gélose au Tween 80 (**Annexe I**). Des spots de 5 µL d'inoculum par isolat ont été déposés sur le milieu, puis incubés à 30 °C pendant 48 h. Un précipité blanc opaque autour des colonies indique une activité positive (**Fig. 19**) (Ilesanmi *et al.*, 2020; Mengstie *et al.*, 2024).

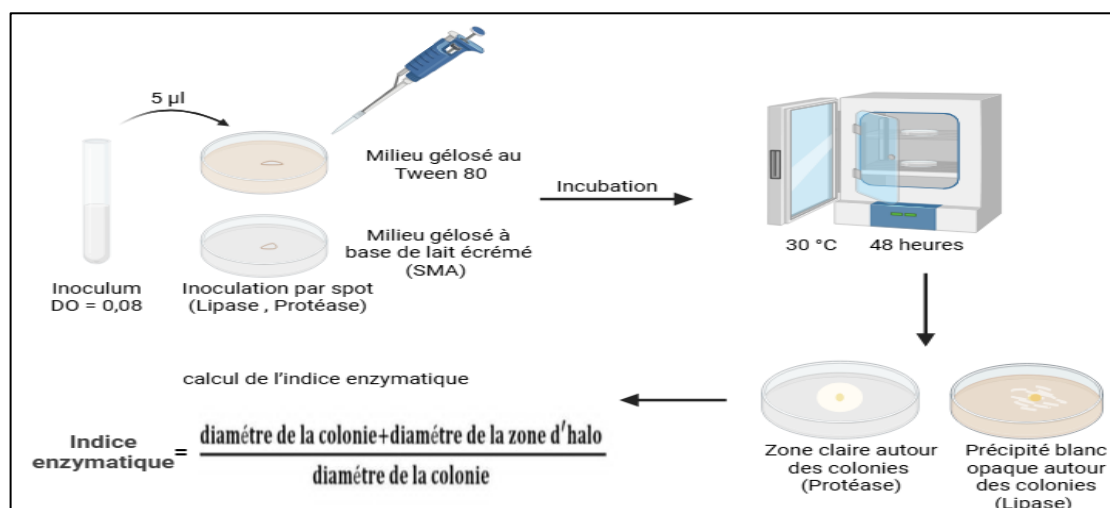


Figure 19 : Test de production des enzymes protéase et lipase

II.3.8.6. Détermination de l'indice enzymatique

L'indice enzymatique a été déterminé après chaque test selon l'équation suivante (Ezrari *et al.*, 2021) :

$$\text{Indice d'activité enzymatique} = \frac{\text{diamètre de la colonie} + \text{diamètre de la zone d'halo}}{\text{diamètre de la colonie}}$$

II.4. Analyses multiples des activités PGPR

II.4.1. Analyse des corrélations

Les relations entre les 11 activités PGP ont été explorées par trois méthodes de corrélation complémentaires : Pearson, Spearman et dCor. Ces approches capturent les dépendances linéaires, monotones et non linéaires, fournissant une évaluation robuste des associations entre variables.

II.4.1.1. Corrélation de Pearson

Le coefficient de corrélation de Pearson mesure la force et le sens de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. Il varie de -1 (corrélation négative parfaite) à $+1$ (corrélation positive parfaite), une valeur nulle indiquant l'absence de liaison linéaire. Cette méthode suppose une distribution approximativement normale des variables et est sensible aux valeurs aberrantes. Elle ne capture que les dépendances linéaires : une relation forte mais non linéaire peut ainsi donner un coefficient proche de zéro. Dans cette étude, Pearson a été calculé pour toutes les paires d'activités PGP, servant à la fois d'exploration initiale et de référence pour les corrélations non paramétriques.

II.4.1.2. Corrélation de Spearman

La corrélation de Spearman, mesure non paramétrique basée sur les rangs, évalue la force et le sens d'une relation monotone (croissante ou décroissante, non nécessairement linéaire). Son coefficient (-1 à $+1$) est robuste aux valeurs aberrantes et ne suppose pas la normalité. Elle a été employée dans cette étude pour identifier des associations que la corrélation de Pearson pourrait ne pas détecter.

II.4.1.3. Corrélation de distance (dCor)

La corrélation de distance (dCor) capture dépendances linéaires et non linéaires, sans hypothèse de distribution. Elle varie de 0 à 1 : 0 indique l'indépendance complète (Székely *et al.*, 2007). Dans le cadre de cette analyse, la corrélation de distance a été utilisée pour révéler des relations non linéaires susceptibles d'échapper aux approches précédentes. Les matrices de corrélation (Pearson, Spearman, dCor) ont été comparées, puis une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour visualiser la structure multivariée des données.

II.4.2. Analyse en Composantes Principales ACP

Afin de synthétiser l'ensemble des résultats et d'explorer les relations multivariées entre les 11 activités PGPR évaluées, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été mise en œuvre. L'analyse des 11 variables a conduit à l'extraction de 10 composantes principales, classées par ordre décroissant de la variance expliquée. Les deux premières composantes, concentrant l'essentiel de l'information, ont été sélectionnées pour la représentation graphique. Les activités PGP ont ensuite été projetées sur le plan factoriel défini par ces deux composantes, permettant ainsi de visualiser les corrélations entre les variables et d'identifier celles qui contribuent le plus à la structuration des données.

Chapitre III :
Résultat et discussion

III. Résultats et discussion

III.1. Isolement et identification des isolats

Après incubation à 30 °C pendant 7 jours sur le milieu d'isolement (PVK) et purification sur gélose nutritive, 460 isolats présentant un halo de solubilisation ont été sélectionnés à partir du sol rhizosphérique de 34 échantillons (**Fig. 23**). L'identification préliminaire de ces isolats a été réalisée sur la base de quelques tests biochimiques (**Annexe VII**).

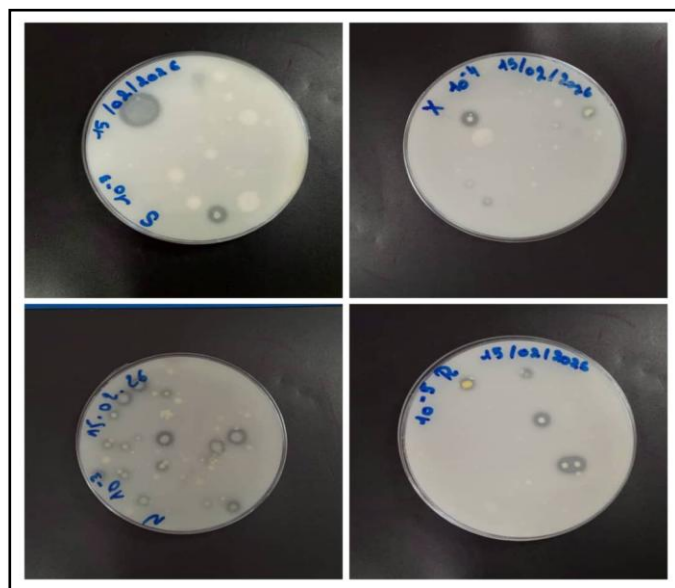


Figure 23 : Isolement sur gélose PVK

III.1.2. Caractérisation biochimique

Le test de la catalase s'est révélé positif pour l'ensemble des 460 isolats (100 %). La recherche de l'oxydase a montré que 49 % des isolats étaient oxydase positive, tandis que 51 % étaient oxydase négative (**Annex VI**) (**Fig. 24**).

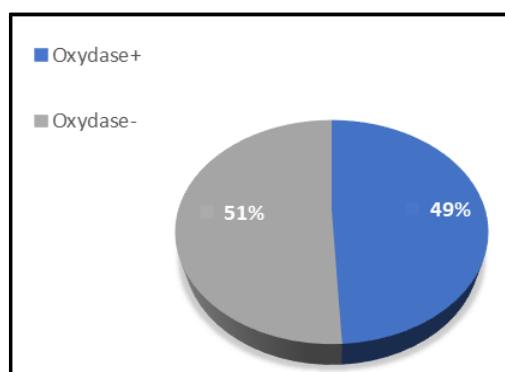


Figure 24 : Test oxydase

III.2. Evaluation des activités PGP

III.2.1. Solubilisation du phosphate

III.2.1.1. Evaluation qualitative sur milieu gélosé

La capacité à solubiliser le phosphate inorganique a été évaluée sur milieu Pikovskaya, après 7 jours à 30 °C, un halo apparaît autour des colonies (**Fig. 25**). L'indice de solubilisation, qui mesure cette capacité, varie selon les isolats. Un clustering des valeurs du SI a réparti les isolats en quatre catégories (**Fig. 26**) : 120 négatifs (SI = 1) ; 163 à faible solubilisation (SI de 1,27 pour HH6 à 3,18 pour BE2) ; 109 à solubilisation moyenne (SI de 3,23 pour HI10 à 4,32 pour HQ14) ; et 68 à solubilisation maximale (SI de 4,41 pour HE1 à 8,08 pour HO3).

D'après la littérature, **Boubekri et al. (2021)** obtiennent un indice de solubilisation (SI) maximal de 3,17 pour *Streptomyces anulatus* P16, valeur qui range leur meilleure souche dans notre catégorie à faible solubilisation (SI compris entre 1,27 et 3,19). **Batykova et al. (2025)** rapportent des SI de 2,88 à 4,00 pour *Stenotrophomonas indicatrix* AS8, *Pantoea agglomerans* AS23 et *Bacillus thuringiensis* AS31, situant ces souches à la frontière entre nos groupes faible (2,88–3,19) et moyen (3,24–4,00). **Rupareliya et Shukla, (2026)** mentionnent un SI de 3,8 pour *Azotobacter vinelandii* PGY11, ce qui relève de notre groupe à solubilisation moyenne (3,24–4,33). À l'opposé, nos 68 isolats à solubilisation maximale (SI de 4,41 à 8,08), notamment l'isolat HO3 (SI = 8,08), affichent des valeurs très supérieures à celles des études citées.

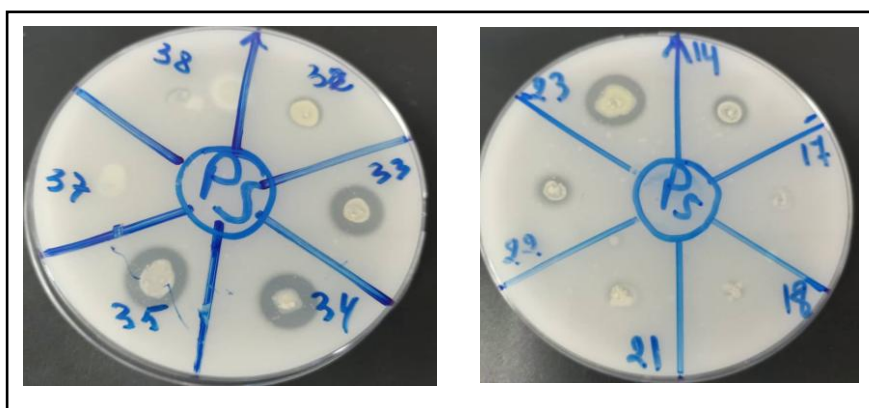


Figure 25 : Solubilisation du phosphate par des isolats sur milieu PVK

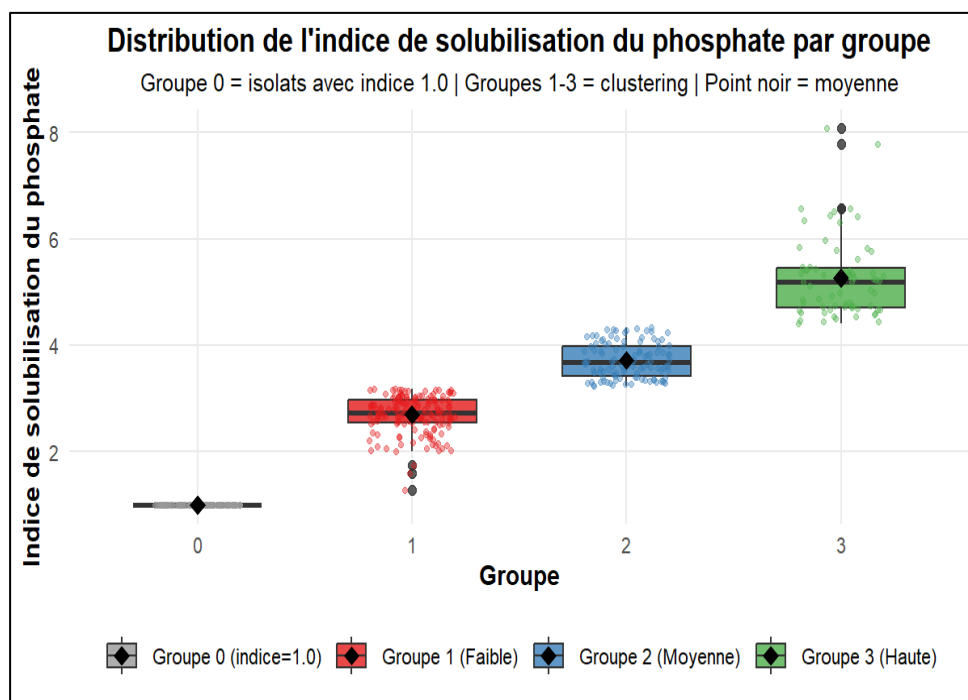


Figure 26 : Distribution de l'indice de solubilisation du phosphate par groupe

III.2.1.2. Evaluation quantitative

La quantification des phosphates inorganiques libérés dans le milieu par les différents isolats a été effectuée selon la méthode au jaune de vanado-molybdate, après culture en bouillon NBRIP (**Fig. 27**). Les concentrations mesurées s'échelonnent de 3,57 $\mu\text{g/mL}$ à 1 610,71 $\mu\text{g/mL}$. Un clustering des données a permis de distinguer quatre groupe (**Fig. 28**) : des 12 isolats négatifs (production nulle) ; 341 isolats à faible solubilisation (de 3,57 $\mu\text{g/mL}$ pour HN22 à 320,71 $\mu\text{g/mL}$ pour HX6) ; 99 isolats à solubilisation moyenne (de 330,71 $\mu\text{g/mL}$ pour BH29 à 616,42 $\mu\text{g/mL}$ pour BH28) ; et 8 isolats à solubilisation maximale (de 686,42 $\mu\text{g/mL}$ pour HP3 à 1 610,71 $\mu\text{g/mL}$ pour HI10).

Amri et al. (2023) ont rapporté des fourchettes de 535,70 à 618,57 $\mu\text{g/mL}$ pour des souches de *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas* et *Pantoea*, lesquelles se répartissent dans nos catégories moyenne et faible. **Salimi et al. (2025)** annoncent des teneurs nettement inférieures (6,7 à 20,13 $\mu\text{g/mL}$) pour *Enterobacter hormaechei* et *Enterococcus durans*. **Jadhav et al. (2025)** communiquent une solubilisation de 7 à 14 $\mu\text{g/mL}$ pour *Pseudomonas putida* CR1. Par conséquent, nos 8 isolats à solubilisation maximale (atteignant 1610,71 $\mu\text{g/mL}$) surpassent très largement les capacités des souches rapportées dans ces trois travaux.

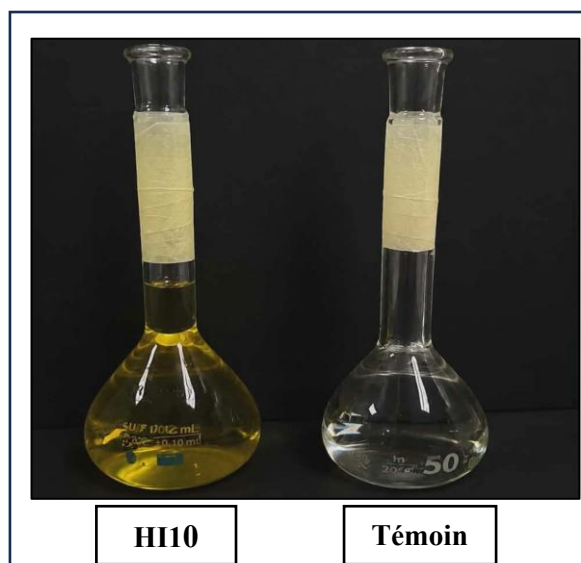


Figure 27 : Dosage de phosphore soluble selon la méthode de vanado-molybdate

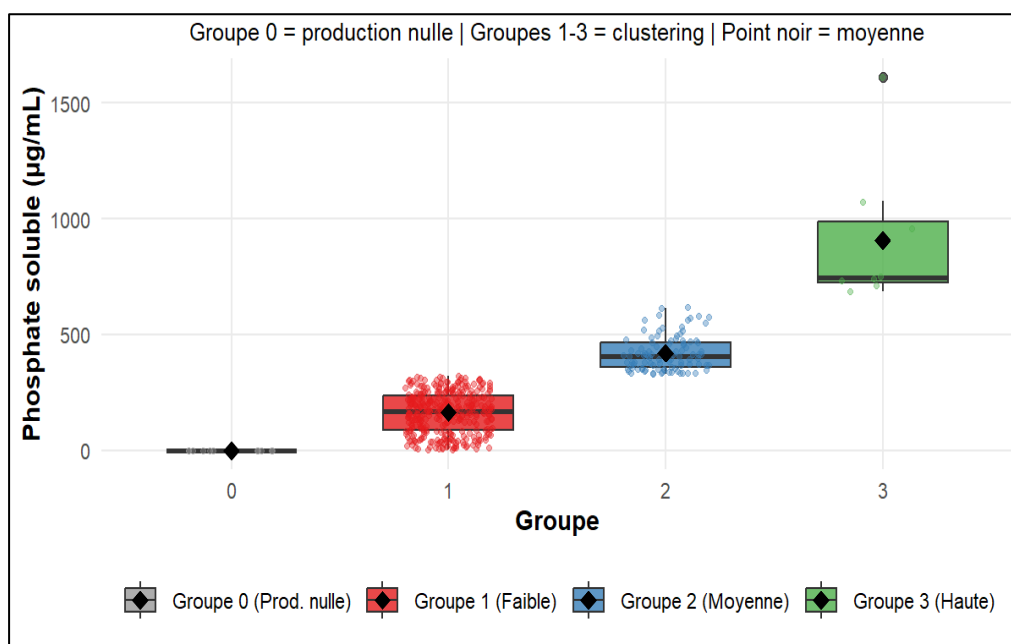


Figure 28 : Distribution de la production de phosphate soluble par groupe

III.2.1.3. Corrélation entre phosphate soluble et indice de solubilisation

Le calcul de corrélation entre le phosphate soluble et l'indice de solubilisation (SI) a fourni un coefficient de Pearson très faible ($r = 0,1067$), indiquant une liaison négligeable entre ces deux grandeurs. Ainsi, aucune relation linéaire biologiquement pertinente ne se dégage : un SI élevé n'est pas nécessairement associée à une forte concentration en phosphate soluble. (Fig. 29). Des conclusions comparables ont été rapportées par *Baig et al.* (2010) ainsi que par *Walpola et Hettiarachchi*, (2020) qui mettent en évidence l'absence

de corrélation entre les méthodes qualitative et quantitative d'évaluation de la solubilisation du phosphate.

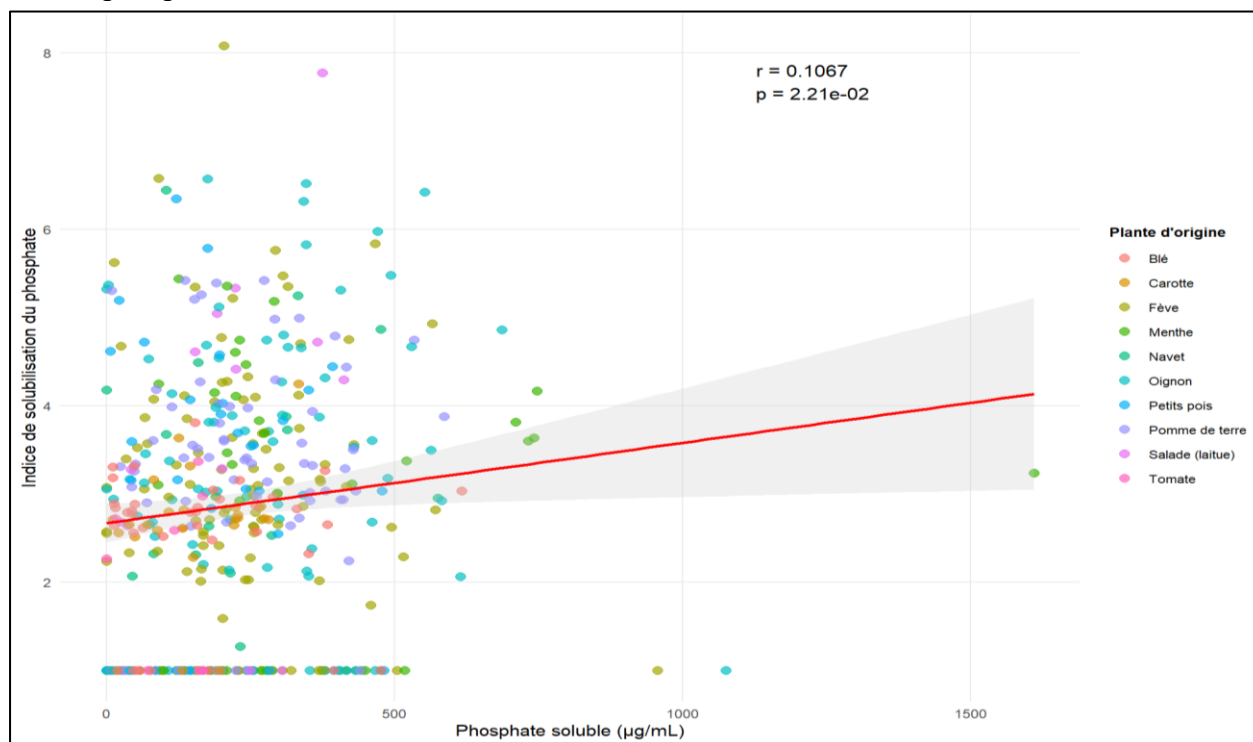


Figure 29: Relation entre Phosphate soluble et indice de solubilisation du phosphate

III.2.2. Production de l'acide indole acétique (AIA)

La détection de l'acide indole-acétique (AIA) a été effectuée sur l'intégralité des isolats, après mise en culture dans le milieu LB additionné de tryptophane (100 mg/L). Après quatre jours d'incubation sous agitation à 30 °C, l'ajout du réactif de Salkowski a provoqué une coloration rose (**Fig. 30**), témoignant d'une synthèse d'AIA. Les quantités produites s'étendent de 0,01 à 136,32 µg/mL. Un partitionnement par clustering a dégagé quatre profils (**Fig. 31**): 10 isolats sans production (nulle) ; 355 isolats à faible production (de 0,01 µg/mL pour HG2 à 15,13 µg/mL pour BB37) ; 75 isolats à production modérée (de 15,43 µg/mL pour BB47 à 36,12 µg/mL pour BA8) ; et 20 isolats à production très élevée (de 93,39 µg/mL pour HU17 à 136,32 µg/mL pour HX9).

En comparant nos résultats avec ceux d'autres chercheurs, nos 20 isolats à production maximale (entre 93,4 et 136,3 µg/mL) sont aussi performants que les souches choisies par **Ferioun et al. (2023)**, où les isolats MFF3 et MFF5 produisaient respectivement 141,08 et 96,67 µg/mL. Nos isolats à production moyenne (de 15,4 à 36,1 µg/mL) ressemblent à ceux de *Pseudomonas fluorescens* étudiés par **Lukkani et Reddy, (2014)** (16,6 à 22,5 µg/mL).

Enfin, nos isolats à faible production (0,01 à 15,1 $\mu\text{g/mL}$) restent tout de même au-dessus des mesures de **Kesaulya *et al.* (2015)**, dont les productions ne dépassaient pas 5,8 $\mu\text{g/mL}$.

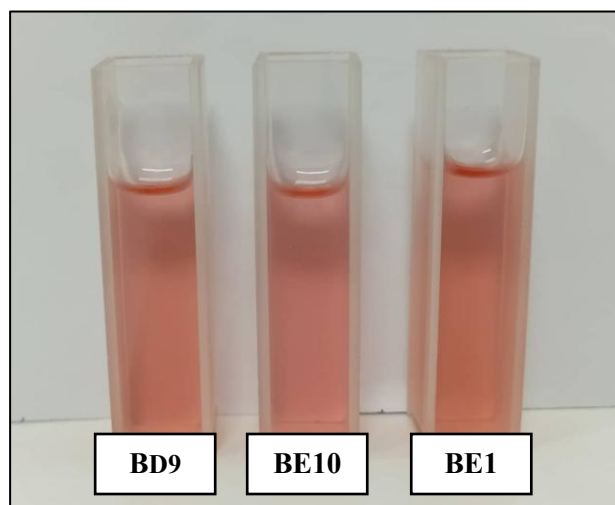


Figure 30 : Production de l'acide indole acétique par les isolats

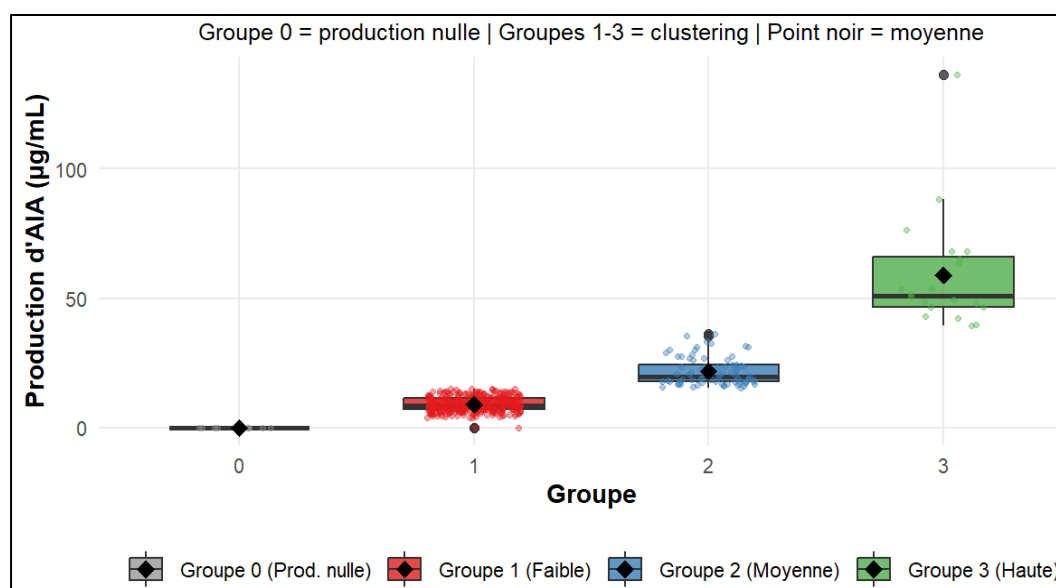


Figure 31 : Distribution de Production de l'acide indole acétique (AIA) par groupe

III.2.3. Solubilisation du zinc

La capacité des isolats à solubiliser le zinc a été mesurée après leur croissance sur un milieu B&R contenant 1,0 mg/mL de ZnO. Au bout de 7 jours d'incubation à 30 °C, l'apparition d'un halo clair autour des colonies montre que le zinc est solubilisé (**Fig. 32**). L'importance de cette propriété est évaluée par un indice de solubilisation, qui n'est pas le même pour tous les isolats.

Le regroupement par clustering a divisé les isolats en quatre catégories (**Fig. 33**) : 129 sans activité (SI = 1) ; 171 à faible solubilisation (SI de 2 pour HA2 à 4,59 pour HV7) ; 98 à

solubilisation moyenne (SI de 4,63 pour HP4 à 6,85 pour BB3) ; et 62 à forte solubilisation (SI de 6,93 pour HQ26 à 12,33 pour HR10).

Si on compare nos résultats à ceux de la littérature, nos valeurs sont bien plus élevées. **Batykova et al. (2025)**, travaillant sur le blé, n'ont obtenu que deux souches actives : *Pantoea agglomerans* AS23 avec un indice de solubilisation (SI) de 3,60, et *Bacillus thuringiensis* AS31 avec un SI de 2,47. **Ranjith et al. (2022)** sur le maïs, rapportent un SI modéré de 3,51 pour la souche *Alcaligenes* sp. RAF5. Dans l'étude de **Zahoor et al. (2022)** sur le quinoa, leur meilleure souche CQ10 (*Enterobacter hormachei* subsp. *hoffmannii*) a atteint un SI de 9,33. Pourtant, 62 de nos isolats dépassent ou égalent cette valeur, et le nôtre, HR10, arrive à 12,33.

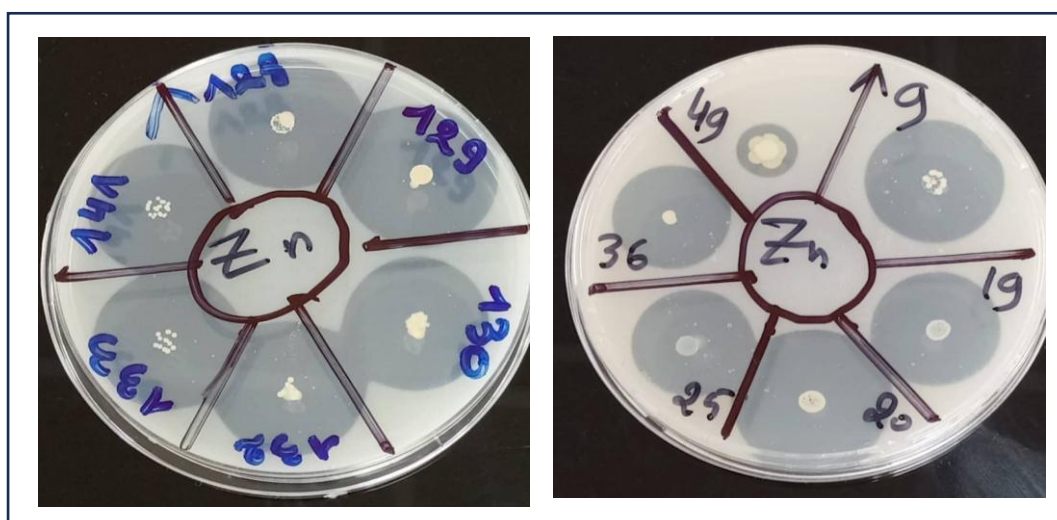


Figure 32 : Solubilisation du zinc pour quelques isolats

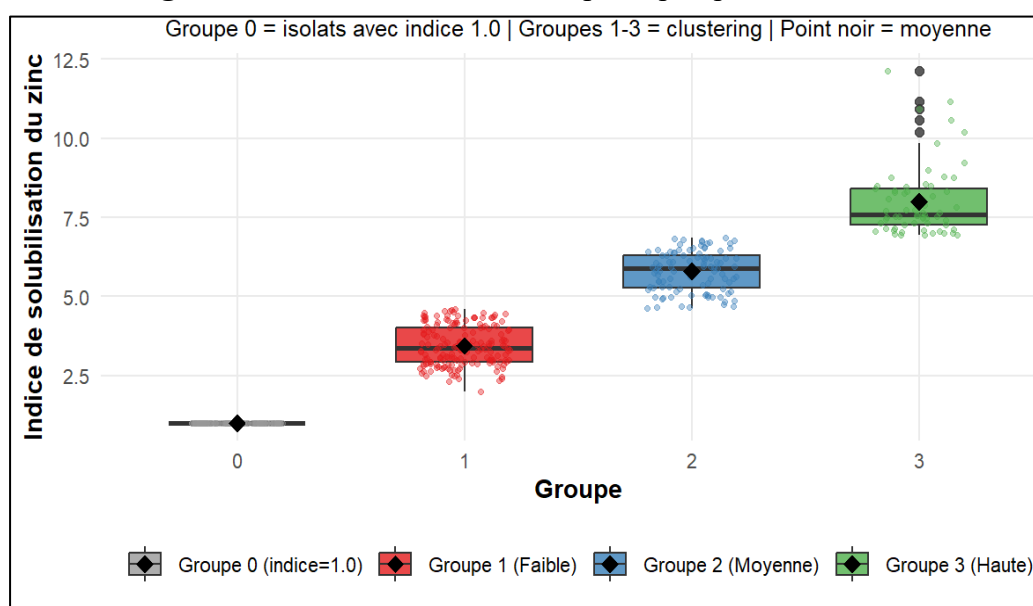


Figure 33 : Distribution de l'indice de solubilisation du zinc par groupe

III.2.4. Fixation d'azote atmosphérique

Après 24 heures d'incubation à 30 °C, la capacité des isolats à fixer l'azote atmosphérique a été évaluée par l'apparition d'une couleur bleue autour des colonies sur le milieu de Norris NF dépourvu d'azote et additionné de bleu de bromothymol (BTB) (**Fig. 34**). L'indice de fixation d'azote (NFI) a ensuite été calculé. Le regroupement des valeurs du NFI par clustering a produit quatre catégories (**Fig. 35**) : 83 isolats sans activité (NFI = 1) ; 150 à faible capacité (NFI de 1,41 pour HO2 à 4,41 pour HP8) ; 136 à capacité intermédiaire (NFI de 4,47 pour HV25 à 6,44 pour HQ15) ; et 91 à forte capacité (NFI de 6,50 pour BB19 à 12,42 pour HS2).

Dans l'étude de **Rupareliya et Shukla, (2026)**, les indices NFI obtenus pour des *Azotobacter* spp. se situent entre 1,6 et 3,6, leur meilleur isolat (PGY11) n'atteignant que 3,6, ce qui correspond, d'après notre classification, à un niveau faible à moyen. Ainsi, notre collection renferme des souches nettement plus performantes, la valeur maximale relevée étant de 12,42, soit plus du triple de celle rapportée dans leur travail.

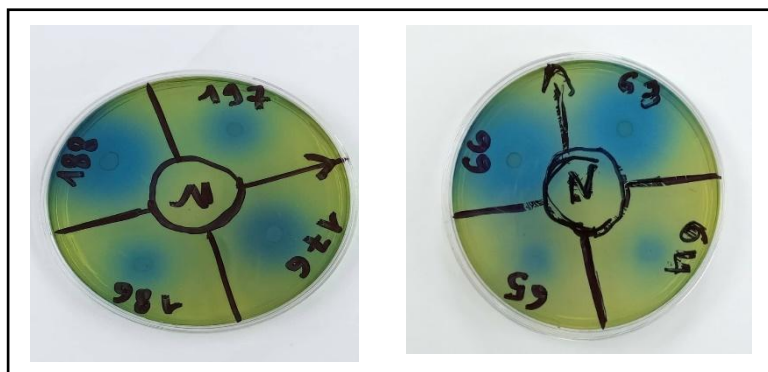


Figure 34 : Fixation d'azote par les isolats

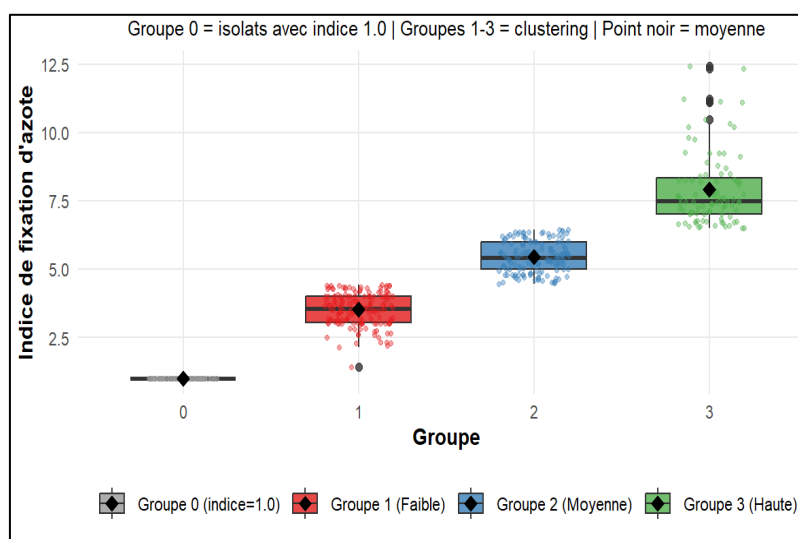


Figure 35 : Distribution de l'indice de fixation d'azote atmosphérique par

III.2.5. Production des sidérophores

La production de sidérophores a été examinée sur milieu Chrome Azurol S (CAS) après 5 jours d'incubation à 30 °C. L'apparition d'un halo orange autour des colonies traduit cette production (**Fig. 36**), puis l'indice correspondant (SDR) a été calculé. Le partitionnement des valeurs du SDR par clustering a permis de séparer les isolats en quatre groupes (**Fig. 37**) : 98 sans activité (SDR = 1) ; 199 à faible production (SDR allant de 2,00 pour HL5 à 3,69 pour HP6) ; 145 à production modérée (SDR de 3,72 pour BB1 à 5,39 pour HN21) ; et 18 à production élevée (SDR de 5,75 pour HN20 à 11,58 pour HM21).

Dans la littérature, les indices de production de sidérophores varient considérablement selon les études. **Kumari et al. (2017)** rapportent des valeurs de 1,5 à 2,94 chez des rhizobactéries antagonistes, tandis que **Rupareliya et Shukla, (2026)** obtiennent des indices plus faibles (0,3 à 1,2) chez *Azotobacter vinelandii*. À l'opposé, **Zahoor et al. (2022)** atteignent jusqu'à 7,56 chez *Bacillus licheniformis*. Dans ce contexte, nos 145 isolats à production modérée dépassent déjà les meilleures performances des deux premières études, et nos 18 isolats à production élevée (SDR maximal de 11,58) surpassent également le maximum publié par **Zahoor et al. (2022)**.



Figure 36 : Production des sidérophores par les isolats

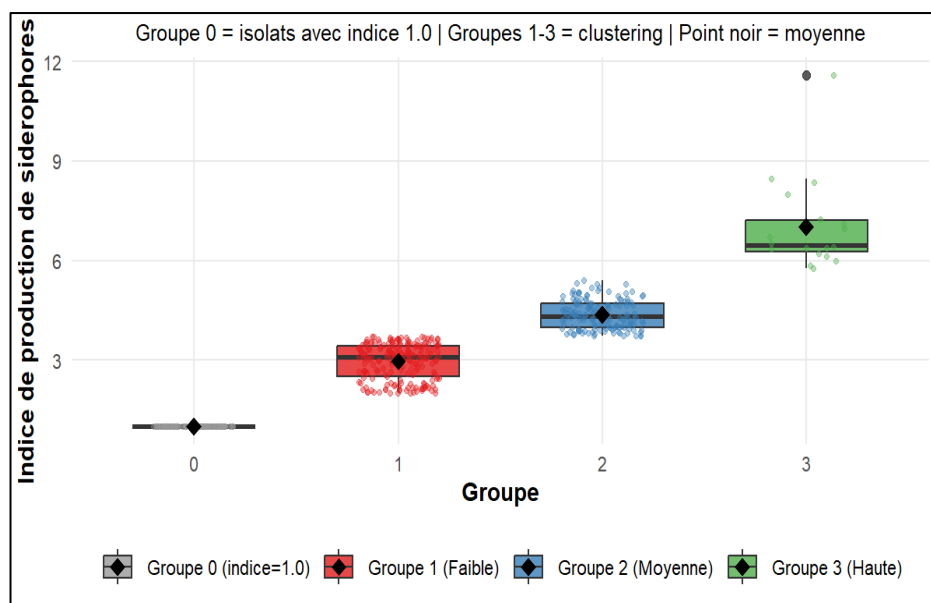


Figure 37 : Distribution de l'indice de production de sidérophores par groupe

III.2.6. Production d'exopolysaccharides (EPS)

La production d'exopolysaccharides (EPS) a été mesurée après 40 heures à 30 °C dans un bouillon nutritif additionné de 5 % de glucose. La quantité synthétisée a été déterminée par pesée après filtration et dessiccation (exprimée en milligrammes). La catégorisation des données par clustering a réparti les isolats en quatre catégories (**Fig. 38**) : 69 sans production (nulle) ; 357 à faible rendement (de 6 mg pour HL7 à 34 mg pour HC1) ; 24 à rendement modéré (de 35 mg pour HI2 à 72 mg pour HP14) ; et 10 à fort rendement (de 84 mg pour HW3 à 197 mg pour HA1).

Une comparaison avec les données publiées fait apparaître des écarts importants. **Begum et al. (2026)** ont mesuré chez des souches de *Staphylococcus* spp une production d'EPS qui ne dépasse pas 1 mg, une quantité très inférieure à celle enregistrée pour nos meilleurs producteurs. De même, **Devanathan et al. (2020)** ont obtenu, pour des isolats de la rhizosphère du piment, des productions allant de 0,02 à 0,41 mg, avec un maximum de 0,41 mg chez *Klebsiella* sp., des valeurs là aussi nettement en dessous de nos constats.

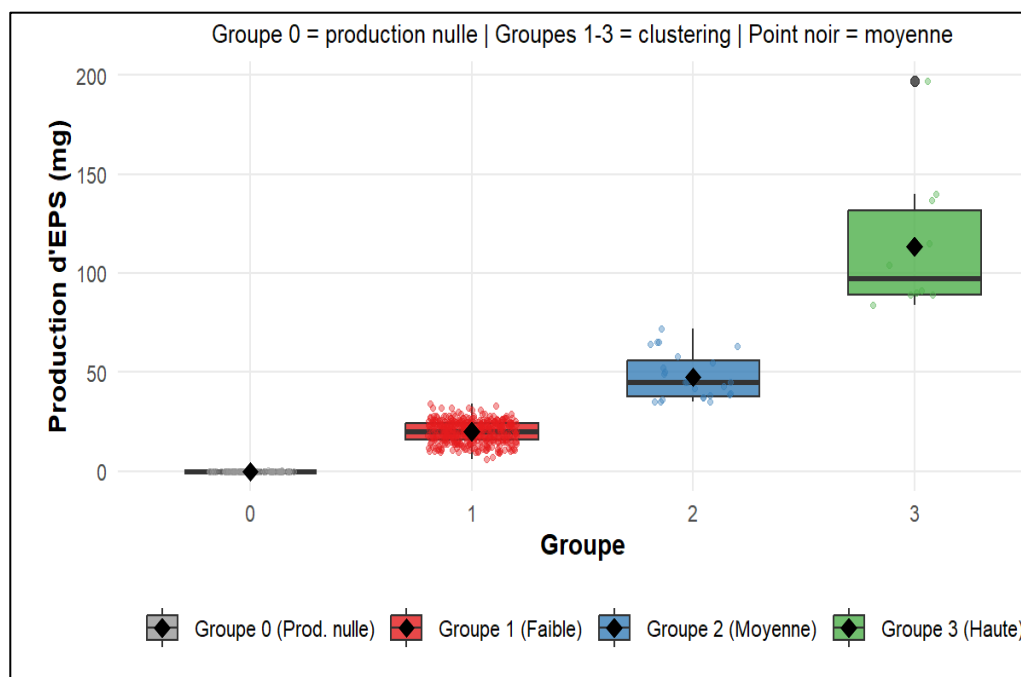


Figure 38 : Distribution de production d'exopolysaccharides (EPS)

III.2.7. Évaluation des activités enzymatiques des PGPR

III.2.7.1. Activité de production d'amylase

La mise en évidence de l'activité amylasique des isolats a été réalisée après 72 heures d'incubation à 30 °C sur gélose à l'amidon. La révélation par le lugol a fait apparaître une zone transparente autour des colonies positives (**Fig. 39**), puis l'indice d'activité (IA) a été calculé. La classification des valeurs de l'IA par clustering a donné quatre classes (**Fig. 40**) : 192 isolats sans activité (IA = 1) ; 114 à faible activité (IA de 2,33 pour HP2 à 4,23 pour HY14) ; 135 à activité moyenne (IA de 4,27 pour HN21 à 7,03 pour HS2) ; et 19 à forte activité (IA de 7,25 pour HQ9 à 11,44 pour BE8).

Une comparaison avec les travaux existants révèle que les isolats de cette étude possèdent un pouvoir amylasique bien supérieur. **Zahoor et al. (2022)** rapportent des indices AI compris entre 2,5 et 4,7 pour des souches issues du quinoa. **Ezrari et al. (2021)** obtiennent des valeurs n'excédant pas 2,1 chez des isolats d'agrumes. **Taoussi et al., (2026)** enregistrent des AI allant de 1,29 à 2,38 pour des isolats de fraisier. L'ensemble de ces résultats reste très en deçà de ceux obtenus dans la présente étude, où l'indice maximal atteint 14,17.

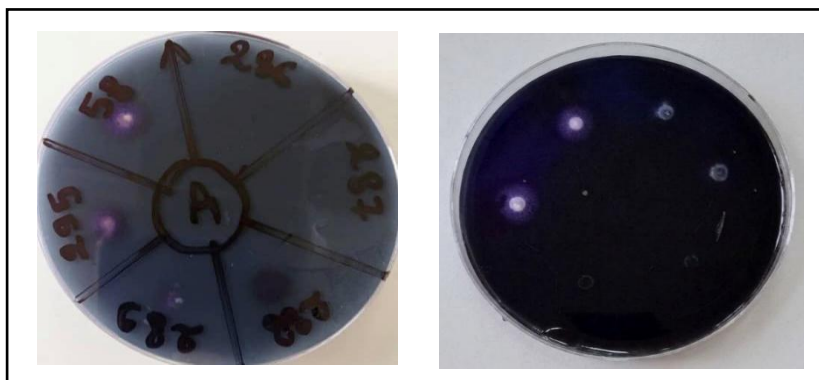


Figure 39 : Production de l'amylase par les isolats

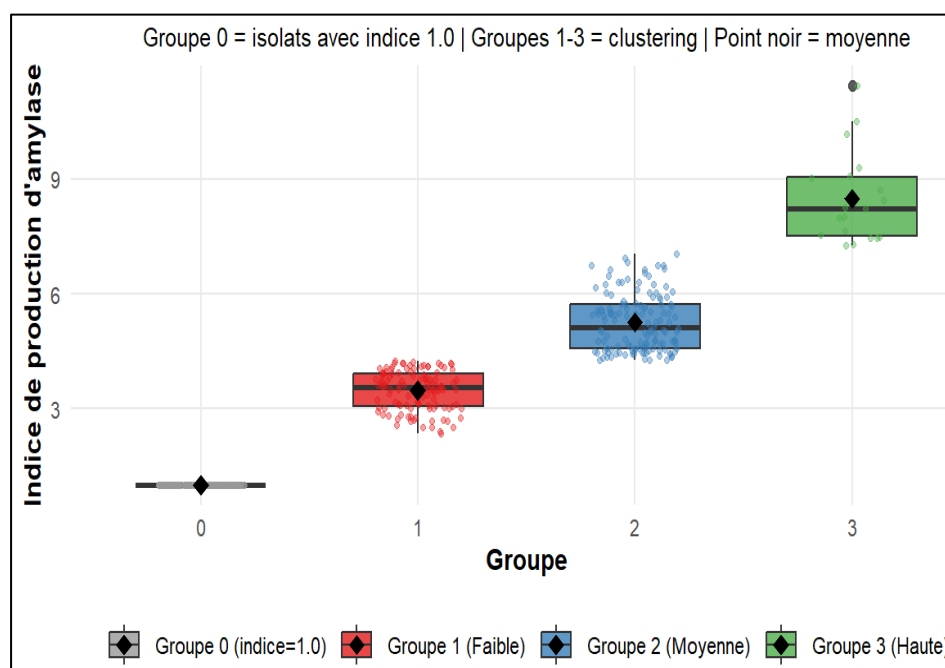


Figure 40 : Distribution de l'indice de production de l'amylase par groupe

III.2.7.2. Activité de production de lipase

L'activité lipasique des isolats a été détectée après 48 heures d'incubation à 30 °C sur gélose additionnée de Tween 80. L'apparition d'un dépôt blanc trouble autour des colonies traduit une réaction positive (**Fig. 41**), puis l'indice correspondant (LI) a été calculé. Le regroupement des valeurs du LI par clustering a fourni quatre ensembles (**Fig. 42**) : 81 isolats inactifs (LI = 1) ; 203 à faible efficacité (LI de 0,74 pour HI2 à 2,76 pour BA5) ; 128 à efficacité modérée (LI de 2,8 pour HM24 à 3,669 pour HV5) ; et 48 à très bonne efficacité (LI de 3,69 pour HU11 à 8,2 pour HI6).

Si l'on se réfère aux travaux publiés, les indices lipasiques obtenus dans cette étude sont globalement plus élevés. **Rupareliya et Shukla, (2026)** ont mentionné un indice maximal de 2,8 chez *Azotobacter vinelandii* PGY11. **Admassie et al. (2022)** et **Savalia et Dungrechiya,**

(2022) ont quant à eux trouvé des gammes respectives de 1,5 à 6,2 et de 1,2 à 4,5. Les isolats les plus performants de notre collection ont donné des indices atteignant 8,2, dépassant ainsi les valeurs maximales rapportées dans ces études. En revanche, les isolats à activité moyenne se situent dans des fourchettes proches de celles décrites dans la littérature.

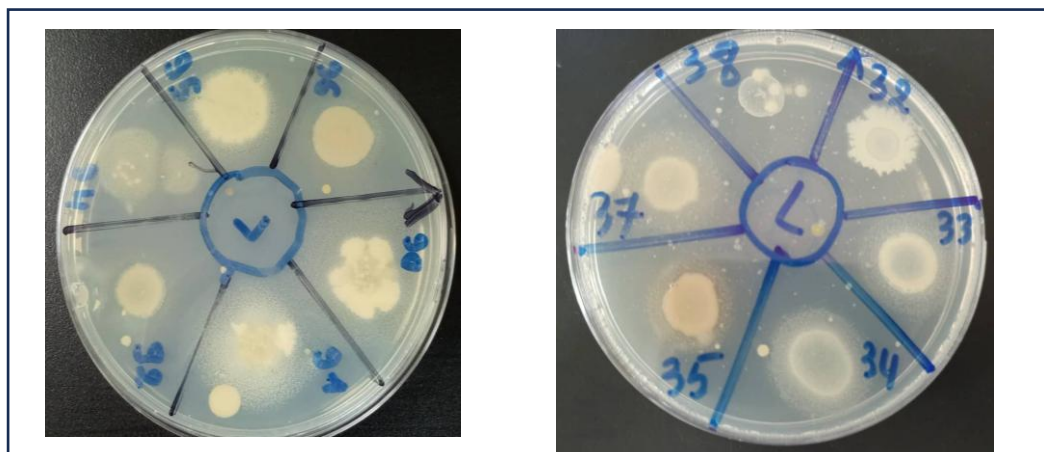


Figure 41 : Production de lipase par les isolats

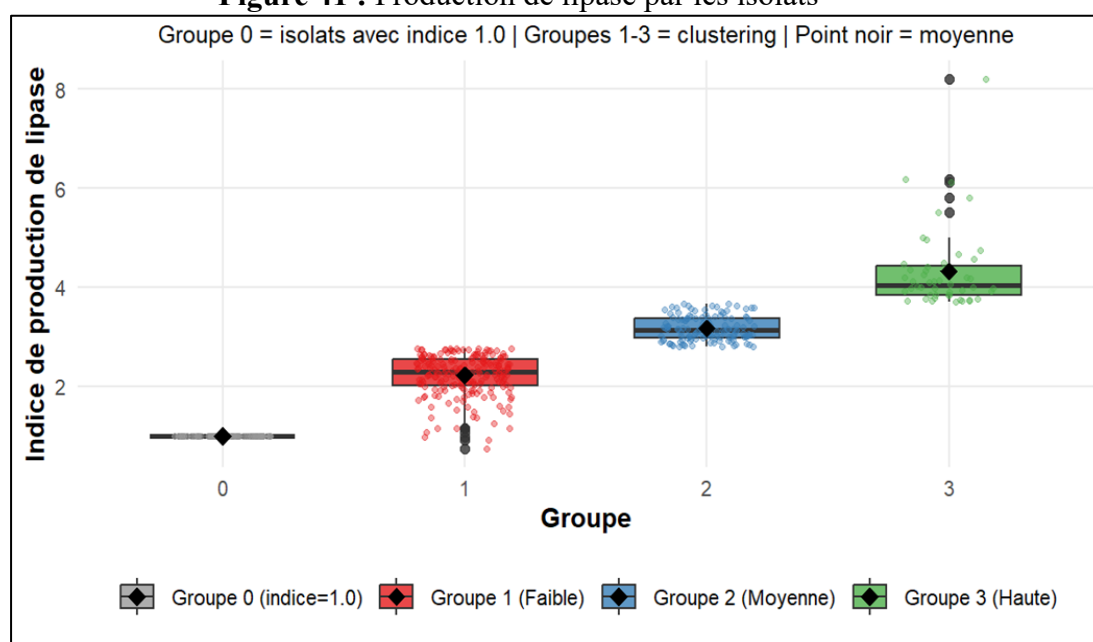


Figure 42 : Distribution de l'indice de production de lipase par groupe

III.2.7.3. Activité de production de protéase

La production de protéase par les isolats a été testée après 48 heures à 30 °C sur gélose au lait écrémé (SMA). La formation d'un halo transparent autour des colonies traduit une dégradation des protéines (**Fig. 43**), puis l'indice protéolytique (PI) a été calculé. Le classement des valeurs du PI par clustering a distribué les isolats en quatre groupes (**Fig. 44**) : 129 inactifs (PI = 1) ; 171 à faible pouvoir (PI de 2 pour HS9 à 4,59 pour HT14) ; 98 à pouvoir intermédiaire

(PI de 4,63 pour HQ21 à 6,85 pour BB14) ; et 62 à fort pouvoir (PI de 6,93 pour BB46 à 12,13 pour HM13).

Dans les études existantes, **Ezrari *et al.* (2021)** signalent que leurs 20 isolats antagonistes de *Neocosmospora solani* produisent des protéases, leurs indices protéolytiques (PI) s'échelonnant de 1,5 à 2,37. **Taoussi *et al.* (2026)** notent également une activité protéolytique chez leurs 11 isolats efficaces contre *Pythium irregulare*, avec des PI allant de 1,10 à 2,62. Quant à **Rupareliya et Shukla, (2026)**, ils constatent que les souches d'*Azotobacter* testées sont protéolytiques, leurs PI se situant entre 1,1 et 3. Par conséquent, notre travail se démarque par une fourchette d'indices protéolytiques (2 à 12,13) plus large que celles mentionnées dans ces trois publications.

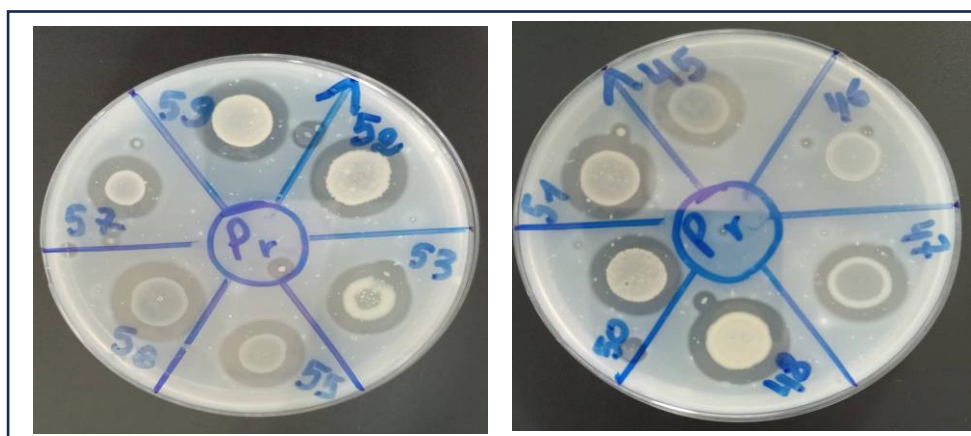


Figure 43 : Production de protéase par les isolats

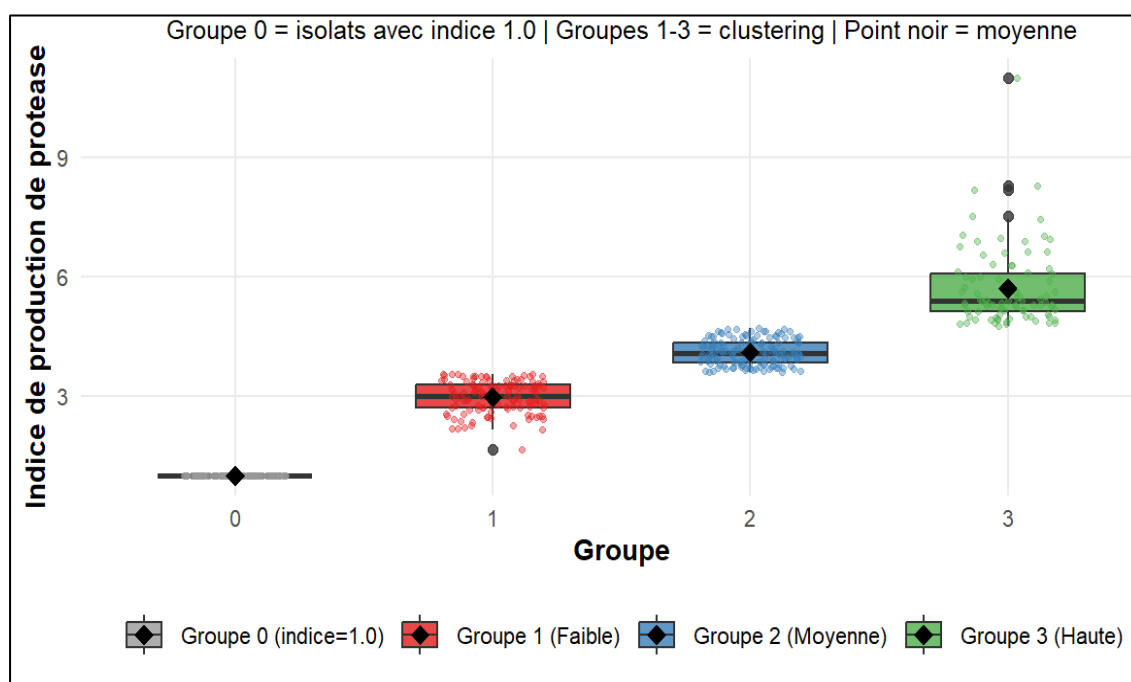


Figure 44 : Distribution de l'indice de production de protéase par groupe

III.2.7.4. Activité de production de cellulase

La capacité des isolats à produire de la cellulase a été mesurée après 48 heures à 30 °C sur gélose contenant de la carboxyméthylcellulose (CMC). La révélation par une solution d'iode a fait apparaître un halo clair autour des colonies signant une activité cellulase positive (**Fig. 45**), puis l'indice cellulolytique (IC) a été déterminé. Le regroupement des IC par clustering a séparé les isolats en quatre catégories (**Fig.46**) : 158 inactifs (IC = 1) ; 58 à faible efficacité (IC de 1,21 pour BH14 à 3,59 pour HV11) ; 149 à efficacité moyenne (IC de 3,50 pour HV8 à 5,38 pour BE9) ; et 95 à forte efficacité (IC de 5,48 pour HM22 à 17 pour HJ6).

D'après la littérature, **Ezrari et al. (2021)** notent que 16 de leurs 20 isolats antagonistes de *Neocosmospora solani* sont capables de produire de la cellulase, avec des IC s'étalant de 1,5 à 2,62. **Taoussi et al. (2026)** constatent également une activité cellulolytique chez plusieurs de leurs 11 isolats efficaces contre *Pythium irregulare*, leurs indices variant de 0,31 à 3,09. **Zahoor et al. (2022)** relèvent une activité cellulase chez 11 souches bactériennes de la rhizosphère du quinoa, les IC se situant entre 3,0 et 6,13. Enfin, **Rupareliya et Shukla, (2026)** indiquent que 5 de leurs 7 isolats d'*Azotobacter* sont cellulolytiques, avec des valeurs allant de 1,8 à 3. Dans ce contexte, notre travail se caractérise par une plage d'indices cellulolytiques (1,2 à 17) nettement plus large que celles publiées dans ces quatre études.

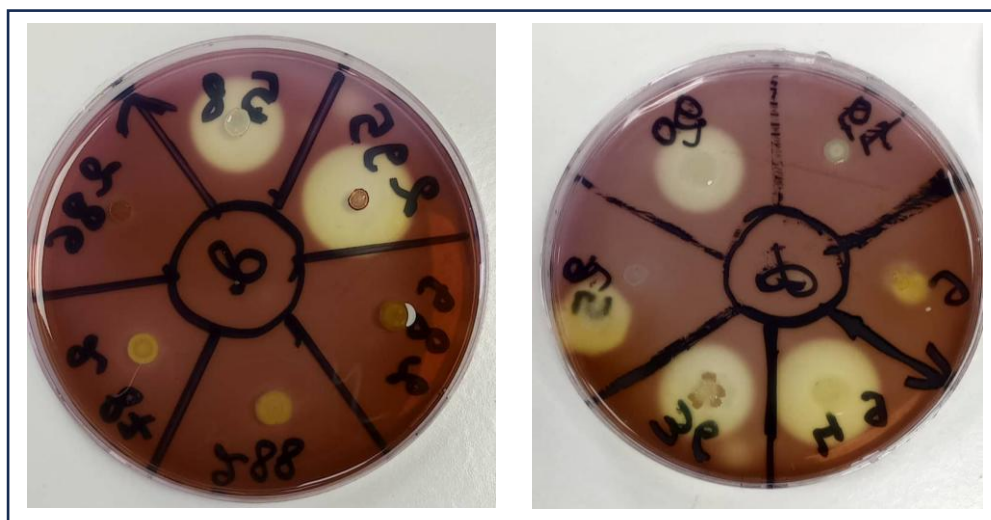


Figure 45 : Production de cellulase par les isolats

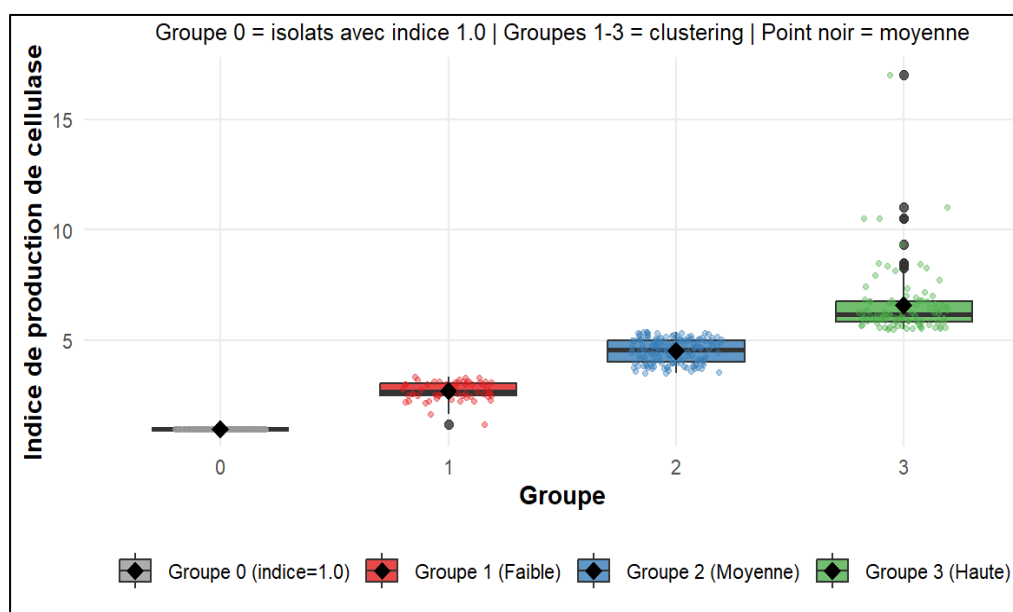


Figure 46 : Distribution de l'indice de production de cellulase par groupe

III.2.7.5. Activité de production de pectinase

La production de pectinase par les isolats a été recherchée après 7 jours à 30 °C sur gélose PSAM. La révélation à la solution d'iode a fait apparaître une zone claire autour des colonies, ce qui traduit une activité pectinase positive (**Fig. 47**), puis l'indice pectinolytique (IP) a été déterminé. La catégorisation des valeurs de l'IP par clustering a fourni quatre ensembles (**Fig. 48**) : 96 isolats sans activité (IP = 1) ; 120 à faible rendement (IP de 1,24 pour BG14 à 4,30 pour BA16) ; 155 à rendement moyen (IP de 4,33 pour HR1 à 5,85 pour BE2) ; et 89 à rendement élevé (IP de 5,91 pour HW5 à 14,18 pour HO9).

Comparé aux travaux existants, l'éventail des valeurs obtenues dans cette étude est plus large. **Ezrari et al. (2021)** font état d'indices pectinolytiques de 1,24 à 2,70 pour des rhizobactéries du citrus. **Taoussi et al. (2026)** enregistrent des indices plus faibles, variant de 0,10 à 0,30 chez des bactéries du fraisier. **Zahoor et al. (2022)** relèvent quant à eux des indices intermédiaires, compris entre 2,61 et 5,56. Nos 89 isolats à fort pouvoir (IP de 5,91 à 14,18) dépassent donc nettement les valeurs citées dans ces trois publications.

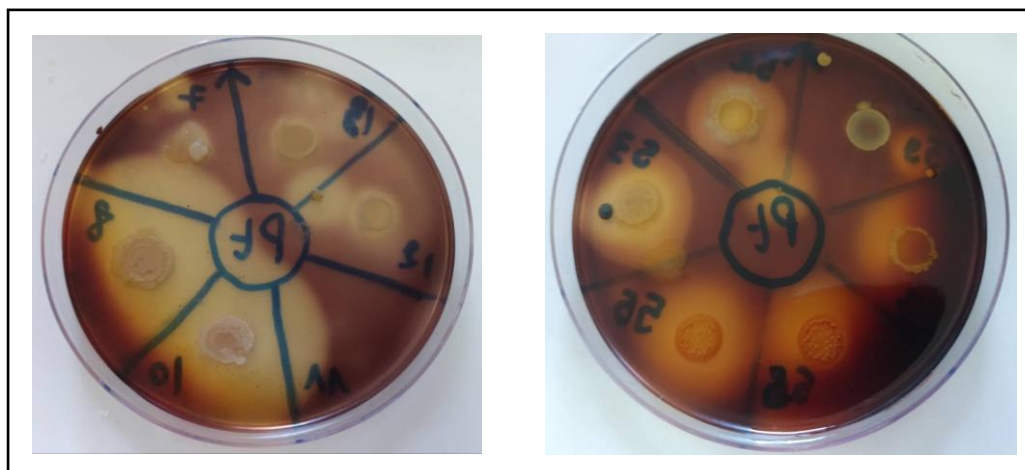


Figure 47 : Production de pectine par les isolats

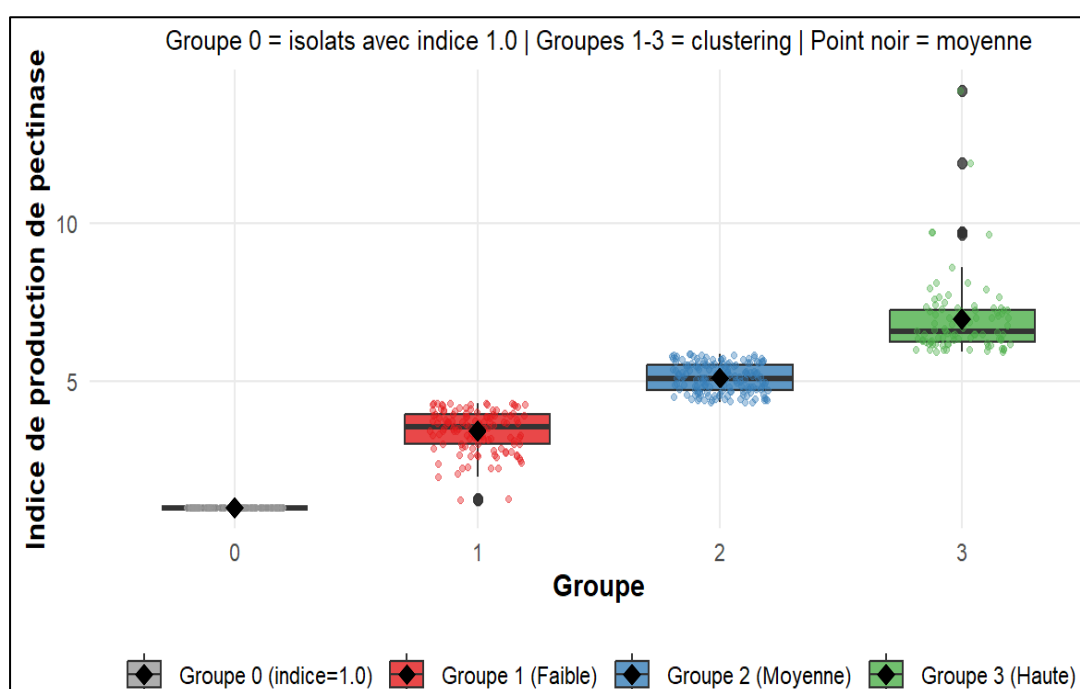


Figure 48 : Distribution de l'indice de production de pectinase par groupe

III.3. Analyses multiples des activités PGPR

III.3.1. Analyse des corrélations

III.3.1.1. Corrélation de Pearson

Les coefficients de corrélation de Pearson entre les 11 activités PGP ont été calculés (Tab. 1, Fig. 49). Ils varient de $-0,15$ à $0,33$, avec une moyenne arithmétique de $0,08$. La très grande majorité des valeurs se situe proche de zéro. Une corrélation nulle ($r = 0,00$) a notamment été observée entre l'indice de production de lipase et celui de cellulase, soulignant l'absence totale de relation linéaire entre ces deux paramètres. Dans l'ensemble, ces coefficients

révèlent des liaisons linéaires globalement faibles, sans qu'aucune association marquée, positive ou négative, ne se manifeste entre les variables mesurées.

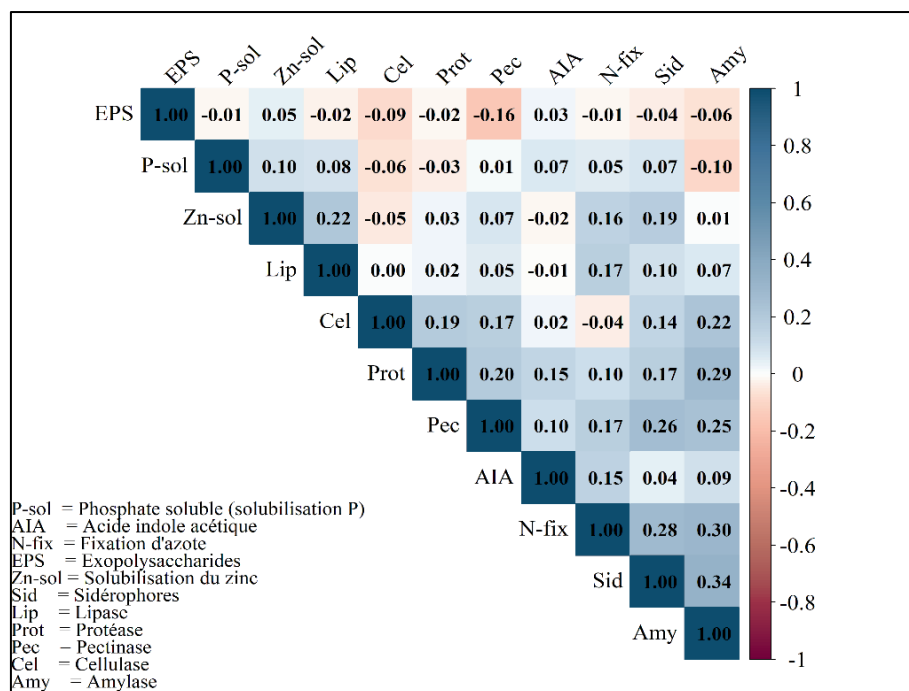


Figure 49 : Matrice de corrélation Pearson

III.3.1.2. Corrélation de Spearman

Les coefficients de Spearman entre les 11 activités PGP varient de $-0,11$ à $0,37$, pour une valeur moyenne de $0,11$ (Tab. 1, Fig. 50). La grande majorité des coefficients est proche de zéro, ce qui traduit des liaisons monotones globalement faibles entre les paramètres. Les corrélations les plus élevées ($r_s=0,37$) ont été relevées d'une part entre l'indice de production de sidérophores et l'indice de production d'amylase, et d'autre part entre la production d'AIA et l'indice de fixation d'azote. Ces valeurs indiquent des associations monotones modérées pour ces deux paires d'activités. Quant aux corrélations négatives, leur ampleur reste très limitée (minimum $-0,11$) et ne suggèrent pas de tendance décroissante marquée.

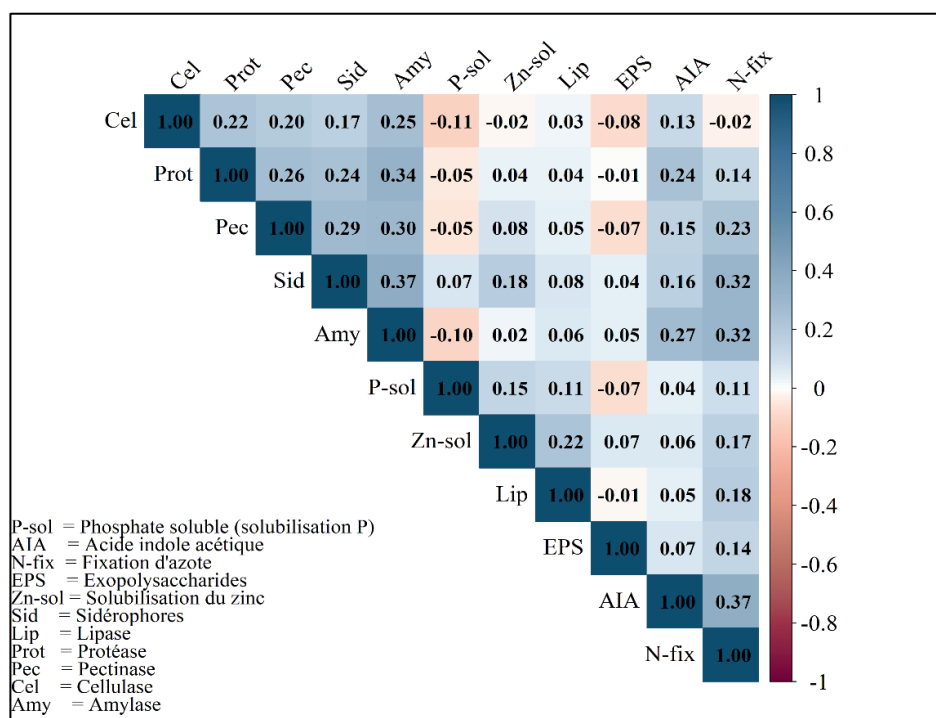


Figure 50 : Matrice de corrélation Spearman

III.3.1.3. Corrélation de distance (dCor)

Les coefficients de corrélation de distance varient de 0,06 à 0,37 (**Tableau 1, Fig. 51**). L'ensemble des valeurs reste modeste, ce qui indique que les dépendances globales (linéaires et non linéaires) entre les activités PGP sont globalement faibles. Contrairement aux corrélations de Pearson ou de Spearman, aucun coefficient n'est nul ou proche de zéro : la valeur minimale de 0,06 montre que toutes les paires de variables partagent une forme de dépendance, même ténue. La valeur maximale (0,37) révèle une dépendance modérée pour certaines paires d'activités, sans qu'aucun lien fort ne soit observé. Ces résultats confirment que les relations entre les paramètres PGP sont majoritairement limitées, qu'elles soient linéaires, monotones ou non linéaires.

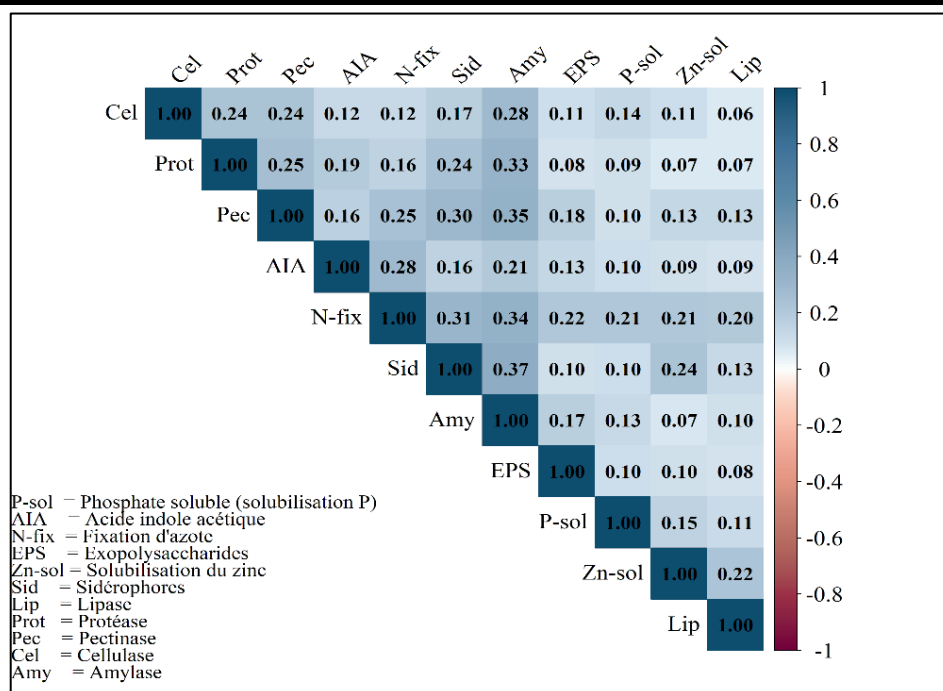


Figure 51 : Matrice de corrélation Distance (dcor)

Tableau 1 : Synthèse des coefficients de corrélation (valeurs brutes)

Méthode	Moyenne	Écart.type	Minimum	Maximum
Pearson	0.08160403	0.11332084	-0.1553105	0.3389151
Spearman	0.11820108	0.12846275	-0.1140632	0.3707016
dCor	0.17113890	0.08237736	0.0628372	0.3713991

III.3.1.4. Comparaison des trois méthodes de corrélation

Les trois méthodes de corrélation offrent des perspectives complémentaires pour l'analyse des activités PGP. La corrélation de Pearson, qui quantifie les relations strictement linéaires, varie de $-0,15$ à $0,33$. L'examen du box-plot (**Fig. 52**) montre que la majorité des valeurs se concentre autour de zéro, traduisant une liaison linéaire globalement très faible, bien plus resserrée autour de la neutralité que pour les deux autres méthodes. La corrélation de Spearman, fondée sur les rangs, présente des coefficients légèrement supérieurs à ceux de Pearson dans la partie positive (maximum de $0,37$ contre $0,34$). Le box-plot révèle d'ailleurs un léger décalage vers le haut de sa distribution, ce qui indique qu'elle détecte des tendances monotones là où Pearson n'observe qu'une absence de relation linéaire. Cependant, les deux méthodes classiques partagent un point commun : elles comportent toutes deux des valeurs négatives, traduisant des oppositions faibles entre certaines variables. Enfin, la corrélation de

distance (dCor) affiche la distribution la plus élevée sur le box-plot, avec un minimum de 0,06. Par construction, cette méthode repose sur la distance et ne produit que des valeurs positives. L'absence totale de points proches de zéro montre que dCor capture des dépendances de fond et des interactions non linéaires globales que Pearson et Spearman sous-estimaient, en restant bloquées autour de la valeur null.

Les analyses de Pearson et Spearman montrent que l'EPS est systématiquement corrélé négativement aux autres variables (notamment les enzymes hydrolytiques), traduisant un arbitrage physiologique. La solubilisation du phosphore (P-sol) est quant à elle la variable la plus indépendante, avec des corrélations proches de zéro, confirmant sa déconnexion totale des autres mécanismes PGP.

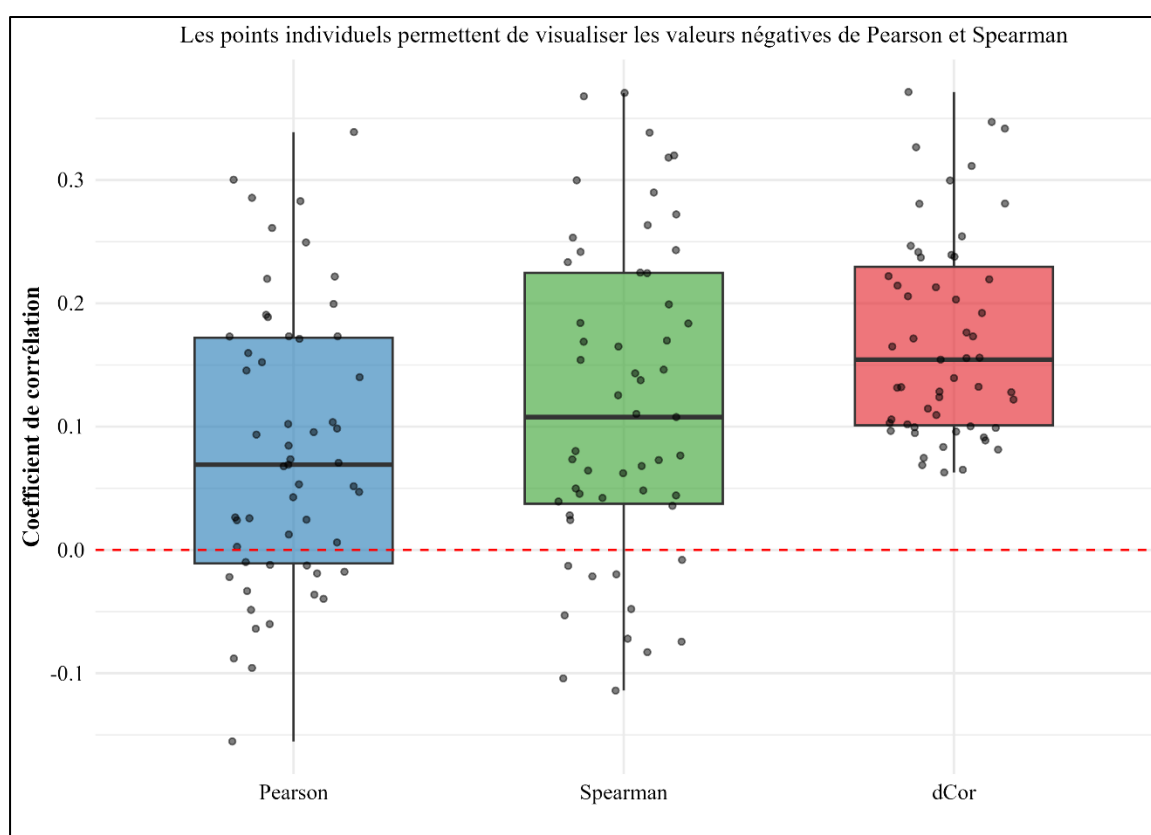


Figure 52 : Comparaison des coefficients de corrélation

Dans notre étude, les coefficients de corrélation entre les activités PGP se sont révélés faibles. Ces valeurs sont inférieures à celles généralement rapportées dans la littérature, où les niveaux de corrélation sont souvent plus élevés. Ainsi, **Rai et al. (2018)** ont mis en évidence une corrélation positive très forte (0,99) entre la production d'IAA et celle de HCN, ainsi qu'une corrélation de 0,95 entre la production de sidérophores et l'activité ACC déaminase. **Gupta et Buch, (2019)** ont quant à eux observé une corrélation positive modérée (0,53) entre la

production de sidérophores et celle de HCN, bien que leurs travaux aient également révélé des corrélations négatives entre la solubilisation du phosphate et la production d'IAA ($-0,11$) d'une part, et avec la production de sidérophores ($-0,18$) d'autre part.

III.3.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse du cercle de corrélation montre que les dimensions 1 et 2 expliquent 32,7 % de la variabilité totale des données (19,8 % pour la dimension 1 et 12,8 % pour la dimension 2) (**Fig. 53**).

La première dimension oppose principalement les variables solubilisation du zinc (Zn-sol) et activité lipasique (Lip) à l'activité enzymatique cellulolytique (Cel) (**Fig. 54**). Cette opposition traduit une corrélation négative entre ces deux blocs de variables. Par ailleurs, les fortes proximités observées entre la solubilisation du zinc (Zn-sol) et l'activité lipasique (Lip) indiquent l'existence d'une corrélation positive à l'intérieur de ce groupe. Au vu de ces caractéristiques, cette première dimension peut être qualifiée d'axe métabolique et minéral ».

La deuxième dimension est principalement associée aux activités de production de sidérophores (Sid), de fixation de l'azote (N-fix), ainsi qu'aux activités enzymatiques amylasique (Amy), pectinolytique (Pec) et protéolytique (Prot) (**Fig. 54**), qui présentent des corrélations positives entre elles. En revanche, la production d'exopolysaccharides (EPS) est orientée dans la direction opposée sur cette même dimension (**Fig. 53**), ce qui indique une corrélation négative entre la production d'exopolysaccharides (EPS) et l'ensemble de ces caractères. Par conséquent, cette deuxième dimension peut être définie comme l'axe enzymatique et nutritionnel ».

Le variable AIA n'est presque corrélée avec aucune autre variable sur les deux premières dimensions. Bien qu'elle suive la même direction que certaines activités, sa projection reste très proche du centre, ce qui montre que ses liaisons sont faibles. Enfin, la variable solubilisation du phosphore (P-sol) apparaît relativement indépendante des autres activités PGP étudiées (**Fig. 53**).

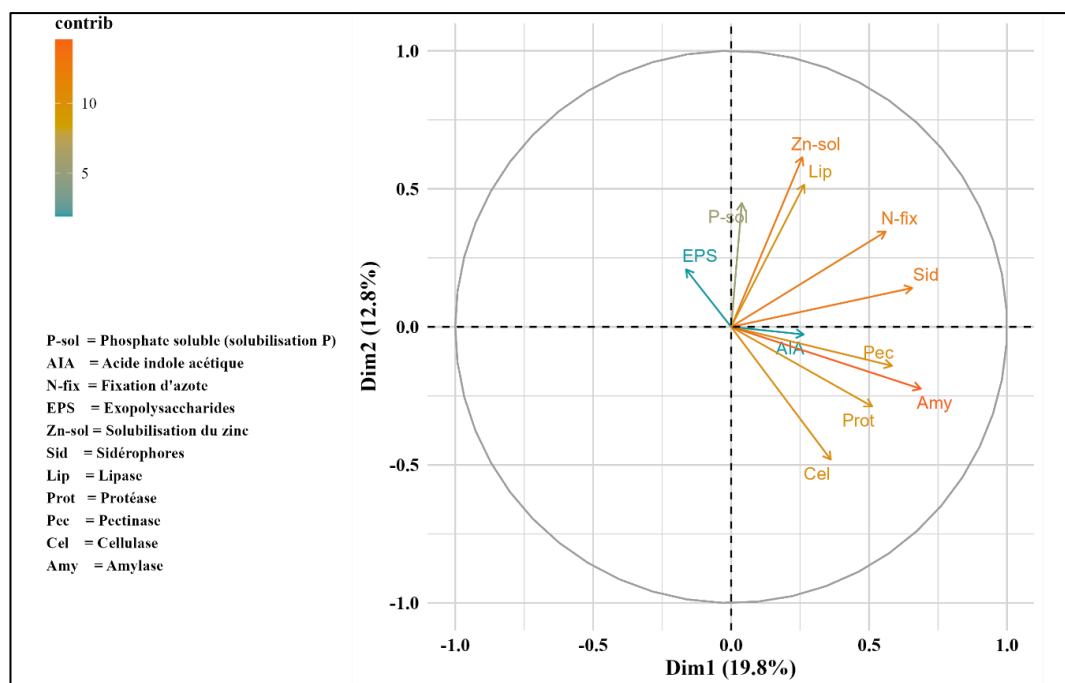


Figure 53 : Cercle de corrélation ACP

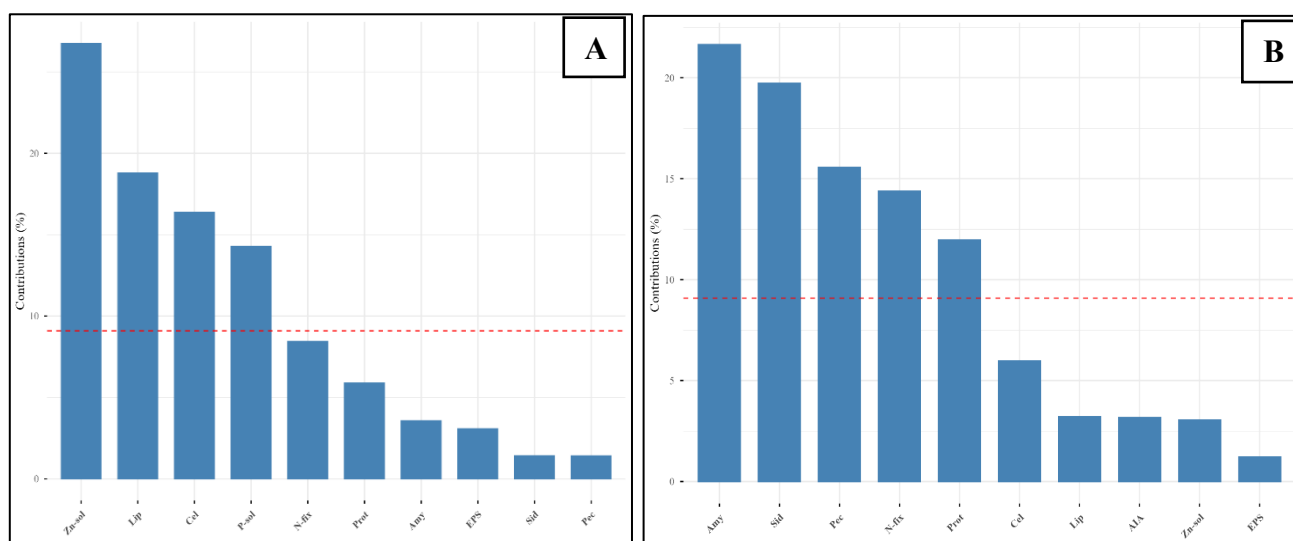


Figure 54 : Contributions des variables aux composantes principales

A : Dimension 1, B : Dimension 2

Dans notre étude, la **première dimension** (19,8 % de la variance) est structurée par l'opposition entre le bloc « solubilisation du zinc et activité lipasique » et l'activité cellulolytique. Cette organisation originale n'a pas été rapportée par **Alapati et Saharan, (2025)**, chez qui la solubilisation du zinc est au contraire corrélée positivement à la production d'AIA et d'ammoniac.

La **deuxième dimension** (12,8 %) associe quant à elle positivement la production de sidérophores, la fixation de l'azote et les activités amylasique, pectinolytique et protéolytique. Ce regroupement fonctionnel rejoint les observations de **Barbaccia *et al.* (2022)** et de **Voronina *et al.* (2024)**, qui lient la production de sidérophores à d'autres mécanismes clés du biocontrôle, tels que la production de HCN ou l'activité antifongique.

Par ailleurs, contrairement à ces trois études qui décrivent de fortes corrélations positives entre l'AIA, la solubilisation du phosphore et les autres caractères PGPR, notre ACP met en évidence leur comportement indépendant. L'AIA se positionne presque au centre du cercle de corrélation, indiquant des liaisons très faibles, tandis que la solubilisation du phosphore apparaît comme une variable isolée.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010).** Principal component analysis. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* (Vol. 2, Number 4, pp. 433–459).
- Admassie, M., Woldehawariat, Y., & Alemu, T. (2022).** In Vitro Evaluation of Extracellular Enzyme Activity and Its Biocontrol Efficacy of Bacterial Isolates from Pepper Plants for the Management of *Phytophthora capsici*. *BioMed Research International*, 2022.
- Alapati, P. S. N. T., & Saharan, B. S. (2025).** Identification and functional characterization of plant growth-promoting rhizobacteria enhancing growth and nutritional quality of *Sorghum bicolor*. *Discover Plants*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00284-3>
- Alexander, M. B., & Zuberer, D. A. (1991).** Biology and Fertilization ~ Soil Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophore production by rhizosphere bacteria. In *Biol Fertil Soils* (Vol. 12).
- Ali, B., Wang, X., Saleem, M. H., Sumaira, Hafeez, A., Afridi, M. S., Khan, S., Zaib-Un-nisa, Ullah, I., Amaral Júnior, A. T. Do, Alatawi, A., & Ali, S. (2022).** PGPR-Mediated Salt Tolerance in Maize by Modulating Plant Physiology, Antioxidant Defense, Compatible Solutes Accumulation and Bio-Surfactant Producing Genes. *Plants*, 11(3).
- Allen Akselrud, C. I. (2024).** Random forest regression models in ecology: Accounting for messy biological data and producing predictions with uncertainty. *Fisheries Research*, 280.
- Amri, M., Rjeibi, M. R., Gatrouni, M., Mateus, D. M. R., Asses, N., Pinho, H. J. O., & Abbes, C. (2023).** Isolation, Identification, and Characterization of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Tunisian Soils. *Microorganisms*, 11(3).
- Anand, K., Kumari, B., & Mallick, M. A. (2016).** *PHOSPHATE SOLUBILIZING MICROBES: AN EFFECTIVE AND ALTERNATIVE APPROACH AS BIOFERTILIZERS* Review Article.
- Baig, K. S., Arshad, M., Zahir, Z. A., & Cheema, M. A. (2010).** Short Communication Comparative efficacy of qualitative and quantitative methods for rock phosphate solubilization with phosphate solubilizing rhizobacteria. In *Soil & Environ* (Vol. 29, Number 1).
- Barbaccia, P., Gaglio, R., Dazzi, C., Miceli, C., Bella, P., Lo Papa, G., & Settanni, L. (2022).** Plant Growth-Promoting Activities of Bacteria Isolated from an Anthropogenic Soil Located in Agrigento Province. *Microorganisms*, 10(11).
- Batykova, Z., Pidlisnyuk, V., Kistaubayeva, A., Ust'ak, S., Savitskaya, I., Saidullayeva, L., & Mamirova, A. (2025).** Isolation and Screening of the Novel Multi-Trait Strains for Future Implications in Phytotechnology. *Microorganisms*, 13(8).

- Begum, M., Paul, R. C., Paul, P. C., Islam, K. M. S., & Ghosh, A. (2026).** Isolation and characterization of salt-tolerant *Staphylococcus* spp. as plant-growth-promoting rhizobacteria enhancing rice seedling growth under salinity stress. *Microbe (Netherlands)*, 10.
- Bera, A., Ghosh, A., Mukhopadhyay, A., Chattopadhyay, D., & Chakrabarti, K. (2015).** Improvement of degummed ramie fiber properties upon treatment with cellulase secreting immobilized *A. larrymoorei* A1. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 38(2), 341–351.
- Bhaskar, P. V., & Bhosle, N. B. (2005).** Microbial extracellular polymeric substances in marine biogeochemical processes. In *REVIEW ARTICLES CURRENT SCIENCE* (Vol. 88, Number 1).
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012).** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. In *World Journal of Microbiology and Biotechnology* (Vol. 28, Number 4, pp. 1327–1350).
- Biscarini, F., & Nazzicari, N. (2026).** *Deep Learning for Life Sciences*.
- Boubekri, K., Soumare, A., Mardad, I., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2021).** The screening of potassium-and phosphate-solubilizing actinobacteria and the assessment of their ability to promote wheat growth parameters. *Microorganisms*, 9(3), 1–16.
- Breiman, L. (2001).** *Random Forests* (Vol. 45).
- Breiman, Leo. (1984).** *Classification and regression trees*.
- Chaffai, Radhouane., Ganesan, Markkandan., & Cherif, Ameer. (2024).** *Plant adaptation to abiotic stress : from signaling pathways and microbiomes to molecular mechanisms*.
- Chandran, H., Meena, M., & Swapnil, P. (2021).** Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Number 19).
- Chanu, P. H., & Yadav, J. (2024).** Exploring Microbial Solutions: A Comprehensive Study on Isolating, Characterizing, and Selecting Zinc-Solubilizing Fungi from Rhizospheric Soil. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(3), 369–377.
- Clark, F. E., & Iowa, A. (1949).** *Soil Microorganisms and Plant Roots and Iowa Agriculture Experiment Station* *.
- Deka, H., Deka, S., & Baruah, C. K. (2015).** *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Value Addition: Mechanism of Action* (pp. 305–321).
- Einizadeh, S., Shokouhian, A. A., Ghavidel, A., Azarmi, R., & Kazemzadeh-Beneh, H. (2025).** Novel PGPR rhizobacteria from *Artemisia* and *Salicornia* rhizospheres alleviate the undesirable effects of salinity stress in tomato seedlings. *Plant Stress*, 18.

- Ezrari, S., Mhidra, O., Radouane, N., Tahiri, A., Polizzi, G., Lazraq, A., & Lahlali, R. (2021). Potential role of rhizobacteria isolated from citrus rhizosphere for biological control of citrus dry root rot. *Plants*, 10(5).
- F, R., M, K., M, A., MD, T., & A, Z. (2020). Plant Growth Promoting Rhizobacteria and their Mechanisms Involved in Agricultural Crop Production: A Review. *SunText Review of BioTechnology*, 01(02).
- Ferioun, M., Srhiouar, N., Tirry, N., Belahcen, D., Siang, T. C., Louahlia, S., & El Ghachtouli, N. (2023). Optimized drought tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 50, 102691.
- Flandrois, J. P., & Chomarat, M. (1988). L'examen cyto bactériologique des urines. *Bactériologie Médical Pratique, MEDSI/Mc GRAW-HILL, Paris*, 21, 3–11.
- Fusconi, & Godinho. (2002). EXOPOLYSACCHARIDE-PRODUCING BACTERIA 363 SCREENING FOR EXOPOLYSACCHARIDE-PRODUCING BACTERIA FROM SUB-TROPICAL POLLUTED GROUNDWATER. In *Braz. J. Biol* (Vol. 62, Number 2).
- Glick, B. R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica*, 2012, 1–15.
- Glick, B. R. . (1999). *Biochemical and genetic mechanisms used by plant growth promoting bacteria*. Imperial College Press.
- Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H. S., & Patra, J. K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. In *Microbiological Research* (Vol. 206, pp. 131–140). Elsevier GmbH.
- Granato, D., Karnopp, A. R., & van Ruth, S. M. (2015). Characterization and comparison of phenolic composition, antioxidant capacity and instrumental taste profile of juices from different botanical origins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(10), 1997–2006.
- Granato, D., Santos, J. S., Escher, G. B., Ferreira, B. L., & Maggio, R. M. (2018). Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 72, pp. 83–90). Elsevier Ltd.
- Gupta, V., & Buch, A. (2019). *Pseudomonas aeruginosa* predominates as multifaceted rhizospheric bacteria with combined abilities of p-solubilization and biocontrol. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 13(1), 319–328. <https://doi.org/10.22207/JPAM.13.1.35>
- Hamoum H., (2017) - Screening des diazotrophes non symbiotiques associés aux plantes des zones salines de l'ouest algérien : effet phyto-stimulateur sur la croissance du blé dur, Thèse de Doctorat, Université de A. Ben badis de Mostaganem, 115p.

- Hiltner, L. (1904).** On recent experiences and problems in the field of Bodenbakteriologie with special emphasis on green manure and fallow (translated from German). *German Agricultural Society*, 98, 59–78.
- Hussain, M. I., Asghar, H. N., Arshad, M., & Shahbaz, M. (2013).** SCREENING OF MULTI-TRAITS RHIZOBACTERIA TO IMPROVE MAIZE GROWTH UNDER AXENIC CONDITIONS. In *J. Anim. Plant Sci* (Vol. 23, Number 2).
- Ilesanmi, O. I., Adekunle, A. E., Omolaiye, J. A., Olorode, E. M., & Ogunkanmi, A. L. (2020).** Isolation, optimization and molecular characterization of lipase producing bacteria from contaminated soil. *Scientific African*, 8.
- J, D., T, T., K.A, S., A, R. K., S, S., & L, R. (2020).** Isolation and characterization of drought stress tolerant plant growth promoting rhizobacter from chilli crop. *Bulletin of Scientific Research*, 1–12.
- Jabiri, S., Legrifi, I., Benhammou, M., Laasli, S. E., Mokrini, F., Amraoui, M. B., & Lahlali, R. (2023).** Screening of Rhizobacterial Isolates from Apple Rhizosphere for Their Biocontrol and Plant Growth Promotion Activity. *Applied Microbiology*, 3(3), 948–967.
- Jackson, M. L. (1958).** *Soil Chemical Analysis*, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Jadhav, I., Vasniwal, R., & Jadhav, K. (2025).** Seed Priming with Sulfur Oxidizing Bacteria Isolated from the Rhizosphere and their Effect on Vigna radita (L.). In *Indian Journal of Microbiology* (Vol. 65, Number 3, pp. 1395–1404).
- Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999).** Data clustering: a review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 31(3), 264–323.
- Jeyanthi, V., & Kanimozhi, S. (2018).** Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR)-prospective and mechanisms: A review. In *Journal of Pure and Applied Microbiology* (Vol. 12, Number 2, pp. 733–749). *Journal of Pure and Applied Microbiology*.
- Kesaulya, H., Zakaria, B., & Syaiful, S. A. (2015).** Isolation and physiological characterization of PGPR from potato plant rhizosphere in medium land of Buru Island. *Procedia Food Science*, 3, 190–199.
- Khan, A., Singh, A. V., Kumar, R., Kukreti, B., Bundela, V., & Upadhayay, V. K. (2022).** Relative impact of PGPR inoculation on biofortification and yield of wheat under field conditions and their performance assessment through statistical tools. ~ 490 ~ *The Pharma Innovation Journal*, 11(8), 490–495.
- Kim, K. G. (2016).** Book Review: Deep Learning. *Healthcare Informatics Research*, 22(4), 351.

- Kloepper, J. W. (1978).** Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. *Proc. of the 4th Internat. Conf. on Plant Pathogenic Bacter, Station de Pathologie Vegetale et Phytobacteriologie, INRA, Angers, France, 1978, 2*, 879–882.
- Kloepper, J. W., & Schroth, M. N. (1981).** Relationship of in vitro Antibiosis of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria to Plant Growth and the Displacement of Root Microflora. In *Ecology and Epidemiology*.
- Knudby, A., LeDrew, E., & Brenning, A. (2010).** Predictive mapping of reef fish species richness, diversity and biomass in Zanzibar using IKONOS imagery and machine-learning techniques. *Remote Sensing of Environment*, 114(6), 1230–1241.
- Kumari, P., Khanna, V., & Kumar, P. (2017).** Multifaceted Rhizobacteria-Mediated Growth Augmentation in Chickpea. *Agricultural Research*, 6(4), 368–377.
- Lecun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015).** Deep learning. In *Nature* (Vol. 521, Number 7553, pp. 436–444). Nature Publishing Group.
- Lee, I., & Yang, J. (2009).** Common clustering algorithms. *Comprehensive Chemometrics: Chemical and Biochemical Data Analysis*, 577–618.
- Loper, J. E., & Schroth, M. N. (1986).** *Physiology and Biochemistry Influence of Bacterial Sources of Indole-3-acetic Acid on Root Elongation of Sugar Beet-561, deficient in IAA production did not.*
- Lukkani, N. J., & Surendranatha Reddy, E. C. (2014).** *EVALUATION OF PLANT GROWTH PROMOTING ATTRIBUTES AND BIOCONTROL POTENTIAL OF NATIVE FLUORESCENT PSEUDOMONAS SPP. AGAINST ASPERGILLUS NIGER CAUSING COLLAR ROT OF GROUND NUT.* www.ijpaes.com
- Luo, J., Zhou, J. J., & Zhang, J. Z. (2018).** Aux/IAA gene family in plants: Molecular structure, regulation, and function. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 19, Number 1).
- Lynch, J. M. . (1983).** *Soil biotechnology : microbiological factors in crop productivity.* Blackwell Scientific Publications ; Blackwell Mosby Book Distributors.
- Lynch, J. M. . (1990).** *The Rhizosphere.* J. Wiley.
- Malleswari, D., & Bagyanarayana, G. (2013).** Plant Growth-Promoting Activities and Molecular Characterization of Rhizobacterial Strains Isolated From Medicinal and Aromatic Plants. In *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences (IOSR-JPBS)* (Vol. 6, Number 6).
- Marchal, N., Bourdon, J. L., & Richard, C. (1991).** Les milieux de culture pour l'isolement et l'identification des bactéries. *Nouvelle Édition Paris: Doin.*

- Mengesha, A. S., & Legesse, N. H. (2024).** Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of lentil (*Lens culinaris* M.) collected from Hagere Mariam district, Central Ethiopia. *PLoS ONE*, 19(11 November).
- Mengstie, G. Y., Awlachew, Z. T., & Degefa, A. M. (2024).** Screening of rhizobacteria for multi-trait plant growth-promoting ability and antagonism against *B. fabae*, the causative agent of chocolate spot disease of faba bean. *Heliyon*, 10(3).
- Nautiyal, C. S. (1999).** *An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms.*
- Nicolaus, B., Lama, L., Esposito, E., Manca, M. C., Improta, R., Bellitti, M. R., Duckworth, A. W., Grant, W. D., & Gambacorta, A. (1999).** Haloarcula spp able to biosynthesize exo-and endopolymers. In *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* (Vol. 23).
- Ntabo, R. M., Nyamache, A. K., Lwande, W., Kabii, J., & Nonoh, J. (2018).** Enzymatic Activity of Endophytic Bacterial Isolates from Selected Mangrove Plants in Kenya. *The Open Microbiology Journal*, 12(1), 354–363.
- Oliveira Monteiro, L. M., Saraiva, J. P., Brizola Toscan, R., Stadler, P. F., Silva-Rocha, R., & Nunes da Rocha, U. (2022).** PredicTF: prediction of bacterial transcription factors in complex microbial communities using deep learning. *Environmental Microbiomes*, 17(1).
- Oubohssaine, M., Sbabou, L., & Aurag, J. (2025).** Enhancing ecosystem restoration and soil productivity through PGPR: a sustainable approach to bioremediation and biofertilization. In *Discover Applied Sciences* (Vol. 7, Number 12).
- Pal, S., Manna, A., & Paul, A. K. (1999).** *Production of poly(b-hydroxybutyric acid) and exopolysaccharide by Azotobacter beijerinckii WDN-01.*
- Pathak, A., Rabani, M. S., Shrivastav, M., & Gupta, M. K. (2026).** Mechanistic insights into plant growth promoting rhizobacteria with focus on root soil interactions, functional attributes and agricultural sustainability. *Discover Biotechnology*, 3(1), 1.
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & Van Der Putten, W. H. (2013).** Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 11, Number 11, pp. 789–799). <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>
- Pikovskaya, R. (1948).** Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya* 17: 362–370. *Plant Soil*, 287, 77–84.
- Pinton, Roberto., Varanini, Zeno., & Nannipieri, Paolo. (2001).** *The rhizosphere : biochemistry and organic substances at the soil-plant interface.* Marcel Dekker.
- Poveda, J., Eugui, D., Abril-Uriás, P., & Velasco, P. (2021).** Endophytic fungi as direct plant growth promoters for sustainable agricultural production. *Symbiosis*, 85(1), 1–19.

- Prashar, P., Kapoor, N., & Sachdeva, S. (2014).** Rhizosphere: Its structure, bacterial diversity and significance. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 13, Number 1, pp. 63–77).
- Rai, A., Rai, P. K., & Singh, S. (2018).** Characterization of phosphate solubilizing fluorescent pseudomonads from the rhizosphere of Aloe vera (L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(7), 1032–1040.
- Ranjith, S., Kalaiselvi, T., Muthusami, M., & Sivakumar, U. (2022).** Maize Apoplastic Fluid Bacteria Alter Feeding Characteristics of Herbivore (Spodoptera frugiperda) in Maize. *Microorganisms*, 10(9).
- Rubbens, P., Brodie, S., Cordier, T., Destro Barcellos, D., Devos, P., Fernandes-Salvador, J. A., Fincham, J. I., Gomes, A., Handegard, N. O., Howell, K., Jamet, C., Kartveit, K. H., Moustahfid, H., Parcerisas, C., Politikos, D., Sauzède, R., Sokolova, M., Uusitalo, L., Van Den Bulcke, L., ... Irisson, J. O. (2023).** Machine learning in marine ecology: an overview of techniques and applications. In *ICES Journal of Marine Science* (Vol. 80, Number 7, pp. 1829–1853). Oxford University Press.
- Rupareliya, S., & Shukla, R. (2026).** *Evaluation of Extracellular Enzyme Activity of Azotobacter spp. in Relation to Plant Growth-Promotion.*
- Salimi, F., Amirahmadi, F., Kousha, A., Khorshidi, M., Zanganeh, K., Mahabadi, A., & Sardashti, S. (2025).** Isolation and Characterization of Native Halotolerant Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Pistacia Vera L. Cultivation in Semi-Arid Regions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(4), 9172–9192.
- Savalia, H. J., & Dungrechiya, A. (2022).** identification and Optimization Study of lipase Producing Bacteria isolated from Municipal Waste and Bio-deteriorated Waste. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 16(4), 2592–2600.
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013).** Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 587.
- Shreshtha, K., Prakash, A., Pandey, P. K., Pal, A. K., Singh, J., Tripathi, P., Mitra, D., Jaiswal, D. K., Santos-Villalobos, S. de los, & Tripathi, V. (2025).** Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria from cacti root under drought condition. *Current Research in Microbial Sciences*, 8.
- Spaepen, S., & Vanderleyden, J. (2011).** Auxin and plant-microbe interactions. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 3(4), 1–13.
- Suikkanen, S., Uusitalo, L., Lehtinen, S., Lehtiniemi, M., Kauppila, P., Mäkinen, K., & Kuosa, H. (2021).** Diazotrophic cyanobacteria in planktonic food webs. *Food Webs*, 28.

- Kumar, R., Veena, S. M., Sowmya, C., Nair, A., Rao, A. S., Muddapur, U., Anantharaju, K. S., & More, S. S. (2022).** Optimization of Process Parameters of Various Classes of Enzymes Using Artificial Neural Network. In *Optimization of Sustainable Enzymes Production* (pp. 145–164).
- Székely, G. J., Rizzo, M. L., & Bakirov, N. K. (2007).** Measuring and testing dependence by correlation of distances. *Annals of Statistics*, 35(6), 2769–2794.
- Tairo, E. V., & Ndakidemi, P. A. (2013).** POSSIBLE BENEFITS OF RHIZOBIAL INOCULATION AND PHOSPHORUS SUPPLEMENTATION ON NUTRITION, GROWTH AND ECONOMIC SUSTAINABILITY IN GRAIN LEGUMES.
- Taoussi, M., Hamim, A., Radi, M., Legrifi, I., Krachi, S., Ibijbijen, J., Nassiri, L., & Lahlali, R. (2026).** Strawberries native rhizobacteria as PGPR and biocontrol agents against root rot caused by *Pythium irregulare* in strawberry plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 141.
- Venkata Naga Raju, E., & Divakar, G. (2013).** PRODUCTION OF PECTINASE BY USING *BACILLUS CIRCULANS* ISOLATED FROM DUMP YARDS OF VEGETABLE WASTES. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research* 2615 IJPSR, 4(7), 12
- Vessey, J. K. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. In *Plant and Soil* (Vol. 255).
- Vessies, M., van de Leur, R., Wouters, P., & van Es, R. (2023).** Deep learning-Autoencoders. In *Clinical Applications of Artificial Intelligence in Real-World Data* (pp. 203–220).
- Voronina, E., Sokolova, E., Tromenschleger, I., Mishukova, O., Hlistun, I., Miroshnik, M., Savenkov, O., Buyanova, M., Ivanov, I., Galyamova, M., & Smirnova, N. (2024).** Properties of Potential Plant-Growth-Promoting Bacteria and Their Effect on Wheat Growth Promotion (*Triticum aestivum*) and Soil Characteristics. *Microbiology Research*, 15(1), 20–32.
- Walpola, B. C., & Hettiarachchi, R. H. A. N. (2020).** *Comparison of Qualitative and Quantitative Methods for Isolation of Phosphate Solubilizing Microorganisms*.
- Zahoor, S., Naz, R., Keyani, R., Roberts, T. H., Hassan, M. N., Yasmin, H., Nosheen, A., & Farman, S. (2022).** Rhizosphere bacteria associated with *Chenopodium quinoa* promote resistance to *Alternaria alternata* in tomato. *Scientific Reports*, 12(1).

Annexes

Annexe I : Composition des milieux de culture

1. Gélose nutritif (par litre)

Peptone	10g
NaCl	5g
Extrait de levure	3g
Extrait de viande.....	3g
pH = 7±0,2.	

2. Gélose PVK (par litre)

Glucose.....	10g
Extrait de levure	0,5g
KCl	0,2g
NaCl	0,2g
(NH ₄) ₂ .SO ₄	0,5g
MgSO ₄ .7H ₂ O.....	0,1g
MnSO ₄ .H ₂ O.....	0,1mg
FeSO ₄	0,1mg
Ca ₃ (PO ₄) ₂	5g
pH = 7,0.	

3. Bouillon NBRIP (par litre)

Glucose.....	10g
(NH ₄) ₂ .SO ₄	0,1g
MgSO ₄ .7H ₂ O.....	0,25g
KCl	0,2g
MgCl ₂ .6H ₂ O	5g
Ca ₃ (PO ₄) ₅	5g
pH = 7±0,2.	

4. Bouillon LB (par litre)

Tryptone	10g
Extrait de levure	5g
NaCl	5g
pH = 7±0,2.	

5. Bouillon nutritif (BN) (par litre)

Peptone	5g
Extrait de levure	2g
Extrait de viande.....	1g
NaCl	5g
pH = $7 \pm 0,2$.	

6. Milieu NF (par litre)

Acide malique	5g
KOH	4g
K ₂ HPO ₄ .7H ₂ O	0,5g
MgSO ₄ .7H ₂ O.....	0,2g
CaCl ₂ .2H ₂ O.....	0,002g
NaCl	0,1g
FeSO ₄ .7H ₂ O	0,5g
Bleu de bromothymol dans (solution KOH 2N)	2ml
NaMoO ₄	2mg
MnSO ₄ .7H ₂ O.....	10mg
pH = $6,8 \pm 0,2$.	

7. Milieu Bunt and Rovira (B&R) (par litre)

Glucose.....	10g
Peptone	1g
Extrait de levure	1g
K ₂ HPO ₄	0,18g
MgCl ₂ .6H ₂ O	0,2g
(NH ₄) ₂ .SO ₄	0,5
pH = 7,2.	

8. Gélose à l'amidon (par litre)

MgSO ₄ ·7H ₂ O.....	0.5g
Peptone	0.5g
KCl	0.1g
NaH ₂ PO ₄	0.1g
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.1g
Amidon.....	20g
pH = 7±0,2.	

9. Gélose au Tween 80 (par litre)

Peptone	10g
NaCl	15g
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0,1g
Tween 80	10ml
pH = 7±0,2.	

10. Milieu SMA (par litre)

Glucose.....	1g
Extrait de levure	2,5
Casein	5g
Lait écrémé	70g
pH = 7,0.	

11. Milieu CMC (par litre)

Peptone	2g
KCl	0,5g
MgSO ₄ ·7H ₂ O.....	0,5g
NaNO ₃	2g
K ₂ HPO ₄	1g
Sel de carboxyméthylcellulose.....	2g
pH = 7±0,2.	

12. Milieu PSM (par litre)

MgSO₄·7H₂O.....0,1g

(NH₄)₂HPO₄.....3g

KH₂PO₄.....2g

K₂HPO₄.....3g

Pectine 10g

pH = 7,0.