

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA  
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA TERRE  
DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE



Réf : ...../UAMOB/FSNVST/DEP.BIO/21

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER**

**Domaine : SNV    Filière : Sciences Biologiques**  
**Spécialité : Microbiologie Appliquée**

**Présenté par :**

*DEHIMI Hayet & KHALI Meriem*

*Thème*

**Intérêt agricole des bactéries solubilisatrices du  
phosphate : Avancées et Perspectives**

**Soutenu le :** 15 / 07 / 2021

**Devant le jury composé de**

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>		
MEDBOUA Chafia	MCB	Univ. de Bouira	Président
BOUHENNI Hamida	MAB	Univ. de Bouira	Examineur
RAI Abdelwahab	MCB	Univ. de Bouira	Promoteur
HANSALI Khalef	Doctorant	Univ. de Bouira	Co-promoteur

*Année Universitaire : 2020/2021*

# Remerciements

## **Remerciements**

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude tout d'abord à dieu de nous avoir donné courage, volonté, santé et force pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions vivement **M. RAI Abdelwahab** d'avoir accepté de nous encadrer ainsi que pour tous ses conseils, son suivi et sa disponibilité.*

*Nos remerciements sont également adressés à **Mme IDIR Thiziri** qui a généreusement accepté de présider le jury de notre soutenance et à **Mme BOUHENNI Hamida** d'avoir accepté l'examen de ce travail et sa mise en valeur.*

*Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui ont veillé à notre formation durant notre parcours Universitaire.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

# **Dédicace**

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents qui m'ont soutenu tout au  
longue de mes études, que DIEU me les protégés*

*Mes sœurs Zoulikha, Nassira, Souad, Razika,  
Sabrina, Amel, Aya et Djomana*

*Mes amies Chaïma, Imane, Sara... merci  
beaucoup*

*Toute ma famille sans exception*

*Ma binôme et amie Meriem avec qui j'ai  
partagé tous les moments de stress de fatigue,  
mais aussi de fous rires.*

*Tous mes enseignants et mes camarades*

*Tous les étudiants de la promotion M2*

*Microbiologie Appliquée 2020/2021*

*Hayet*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents qui m'ont soutenu tout au  
longue de mes études, que DIEU me les protégés*

*Mes sœurs Sara, Hadjer et Nada*

*Mon frère Hamada*

*Toute ma famille sans exception*

*Ma binôme et amie Hayet*

*Meriem*

# Liste des Tableaux

**Liste des tableaux**

**Tableau 01.** Composition du milieu PVK Pour un volume de 1L.....9

**Tableau 02.** Composition du milieu NBRIP pour un volume de 1L.....9

# Liste des Figures

## Liste des figures

<b>Figure1.</b> Cycle du phosphore dans le sol .....	4
<b>Figure2.</b> Solubilisation du phosphate par les BSP .....	6
<b>Figure3.</b> Halo transparent autour d'une colonie .....	10

# Liste des abréviations

## Liste des abréviations

**DAP** : Phosphate de diammonium.

**Pi** : Phosphate inorganique.

**Po** : Phosphate organique.

**PRPG** : *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*.

**PSB** : *phosphorus solubilizing bacteria*.

**PSF** : *Phosphorus solubilizing fungi*.

# **Sommaire**

## Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures .....	v
Liste des abréviations.....	vi
Sommaire .....	vii
Introduction.....	1
<b>Chapitre I. Les bactéries solubilisatrices du phosphate</b>	
1. Le phosphate dans le sol .....	3
2. Cycle du phosphate dans le sol .....	3
3. Les bactéries solubilisatrices du phosphate .....	4
3.1. Mécanismes d'action des BSP.....	5
3.1.1. Solubilisation du phosphate minéral .....	6
a. <i>Production d'acides organiques</i> .....	6
b. <i>Production d'acides inorganiques</i> .....	7
c. <i>Autres</i> .....	7
3.1.2. La minéralisation du phosphate organique.....	7
a. <i>Phosphatases (phosphohydrolase)</i> .....	8
b. <i>Phytase</i> .....	8
<b>Chapitre II. Procédure d'isolement et de sélection des BSP</b>	
1. Exemple d'un protocole d'isolement sur milieu solide .....	9
2. Exemple d'un protocole sur milieu liquide.....	10
3. Lecture critique .....	10
4. Besoins nutritionnels des PSB en carbone et en azote.....	11
4.1. Carbone.....	11
4.2. Azote.....	11

### **Chapitre III. Avancées et perspectives**

1. Avancées .....	12
2. Perspectives.....	15
Conclusion .....	17
Références bibliographiques	
Résumé	
Abstract	
الملخص	

# **Introduction**

## Introduction

Les notions d'industrialisation et de révolution verte correspondent à l'intensification des industries et des activités agricoles en réponse à l'augmentation de la population mondiale. Elles ont conduit à une augmentation de la qualité et de la quantité des produits destinés à satisfaire les besoins humains, mais aussi à de graves problèmes environnementaux. Dans ce contexte, l'utilisation intensive des produits chimiques (phosphate, azote, potassium etc.) comme engrais pour augmenter la productivité agricole a perturbé l'équilibre écologique du sol et a augmenté sa toxicité, obligeant les scientifiques et les agriculteurs à aller vers la recherche de stratégies alternatives pour améliorer la productivité sans endommager l'environnement (**Sharma et al., 2007**).

En agriculture, le Phosphate (P) est un macronutriment essentiel pour la croissance végétale. Il participe à tous les processus métaboliques des plantes, y compris la photosynthèse, le transfert d'énergie, la transduction du signal, la biosynthèse macromoléculaire et la respiration. Sa disponibilité dans le sol est considérée comme un facteur limitant la croissance des plantes. Ainsi, une grande partie du P est insoluble et est indisponible pour l'absorption racinaire directe en raison de sa fixation sous forme de phosphates insolubles de fer, d'aluminium et de calcium dans le sol (**You et al., 2020 ; Kalayu et al., 2019**).

L'ajout d'engrais chimiques phosphatés au sol de façon continue contribue à l'augmentation de sa toxicité. En fait, une grande partie du phosphate est convertie en formes insolubles et s'accumule sans intérêt. Une autre partie de ce phosphate peut se propager dans les eaux souterraines ou entraînée par les ruisseaux d'eau vers les environnements aquatiques et causant, dans certains cas, un danger pour la vie humaine (**Sharma et al., 2007**).

Depuis quelques années et en raison de leurs mécanismes d'action, considérés comme amis à l'environnement, l'utilisation des microorganismes comme agents biofertilisants occupe, de plus en plus, une place importante en agriculture moderne. Ces groupes de bactéries sont communément appelées Bactéries Promotrices de la croissance des plantes ou PGPR (de l'anglais : *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) (**Sharma et al., 2007**). Les bactéries solubilisatrices du phosphate

(BSP) constituent un groupe de PGPR ayant la capacité de convertir les formes de phosphates insolubles en formes assimilables par les plantes (**Wu *et al.*, 2019**).

Ce travail représente une synthèse bibliographique de la diversité actuelle des bactéries solubilisatrices du phosphate, de leurs activités biologiques dans le sol et des avancées récentes réalisés aux laboratoires et sur champ à propos de l'utilisation de ces microorganismes comme substituants aux engrais chimiques phosphatés.

**Chapitre I**  
**Les bactéries**  
**solubilisatrices du**  
**phosphate**

## 1. Le phosphate dans le sol

Le phosphate (P), sous toutes ses formes, est le cinquième élément composant la matière vivante. L'atome de P est toujours associé à des atomes d'oxygène pour former le groupement phosphate  $\text{PO}_4^{3-}$ . La formation d'une liaison anhydride d'acide entre deux groupements phosphate (ex. ATP) riche en énergie lui confère un rôle central dans le stockage de l'énergie cellulaire. Le groupement phosphate est également inclus dans la composition de différentes molécules comme les acides nucléiques (ADN, ARN), les enzymes, les phosphoprotéines, les phospholipides etc. Le phosphate joue donc un rôle structurel et métabolique fondamental pour la vie sur terre (**Plassard *et al.*, 2015**).

Le phosphate est le deuxième nutriment le plus important pour les plantes après l'azote (**Rfaki *et al.*, 2019**). Il existe dans le sol sous forme inorganique (sels minéraux) ou incorporée dans des composés organiques (**Kim *et al.*, 2003**). Dans le sol, le P est principalement présent sous forme insoluble liée au calcium (**Gull *et al.*, 2004**). Bien que sa concentration varie d'un sol à l'autre, la teneur moyenne en P dans un sol est près de 0,05% (**Chen *et Liu*, 2019**).

En agriculture, l'indisponibilité du phosphate dans de nombreux sols a été reconnue comme un facteur limitant majeur de la croissance des plantes et donc, du rendement agricole. Le recours à l'application de formes solubles de phosphate sous forme d'engrais phosphatés a longtemps été considéré comme solution à ce problème. Cependant, les engrais phosphatés sont rapidement immobilisés (fixés) et deviennent insolubles et inassimilables par les plantes en raison de leur complexification avec d'autres éléments tels que l'aluminium et le fer. De plus, les engrais phosphatés proviennent de la roche phosphatée ; une ressource non renouvelable et dont les réserves mondiales pourraient être épuisées dans 50 à 100 ans (**Oteino *et al.*, 2015**).

## 2. Cycle du phosphate dans le sol

Dans le sol, le phosphate est présent sous différentes formes interagissant sous divers mécanismes. (1) adsorption [déplacement des ions phosphatés ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) d'une solution aux particules du sol]. (2) désorption [libération du phosphate de la phase solide à la phase liquide du sol] ; (3) précipitation (réaction du P avec les ions positifs provoque la précipitation) ; (4) dissolution (dissolution du P précipité) ; (5) la minéralisation et (6) l'immobilisation (**Figure1**) (**Chibani, 2017**).

En générale, le phosphate du sol se trouve associé à des cations, à des oxydes ou des hydroxydes métalliques. Certains se retrouveront rapidement en solution, d'autres migreront plus lentement de la phase solide vers la solution et d'autres ne se solubiliseront qu'avec l'activité d'organismes vivants. L'approvisionnement des plantes en ions phosphate est soumis aux phénomènes de désorption et de solubilisation du phosphate inorganique ainsi que la minéralisation du phosphate organique. Le phosphate organique du sol ne peut être disponible pour les plantes qu'après décomposition et minéralisation par les microorganismes (Méchali et Kherrat, 2016).

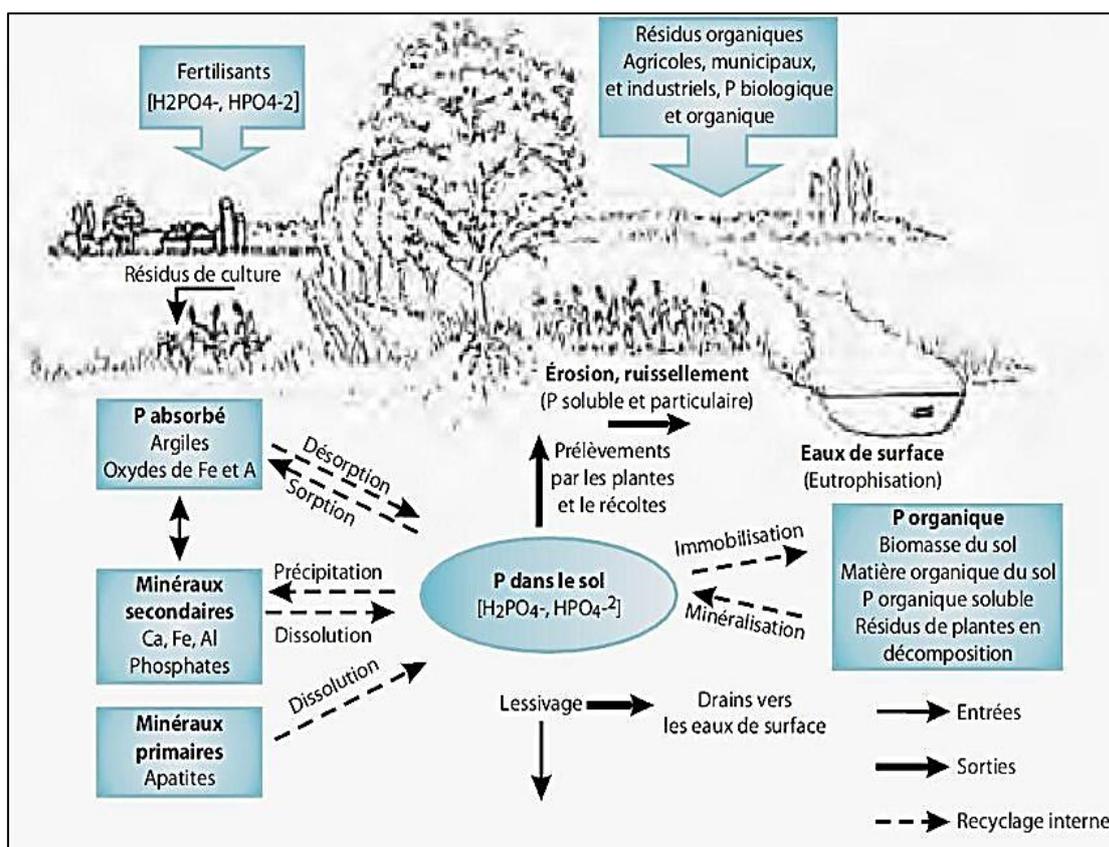


Figure 01. Cycle du phosphore dans le sol (Ghanimi, 2014).

### 3. Les bactéries solubilisatrices du phosphate

Les microorganismes, particulièrement les bactéries, jouent un rôle central dans le cycle naturel du phosphate à travers la conversion des composés phosphatés insolubles en formes solubles dans le sol (Khan *et al.*, 2009 ; Behera *et al.*, 2014).

Les bactéries solubilisatrices du phosphate (BSP) ont la capacité d'augmenter la quantité du P disponible pour la plante grâce à la production des acides organiques dans le sol (Abd El-Azeem *et al.*, 2007). La diversité des BSP dans un sol dépend fortement de

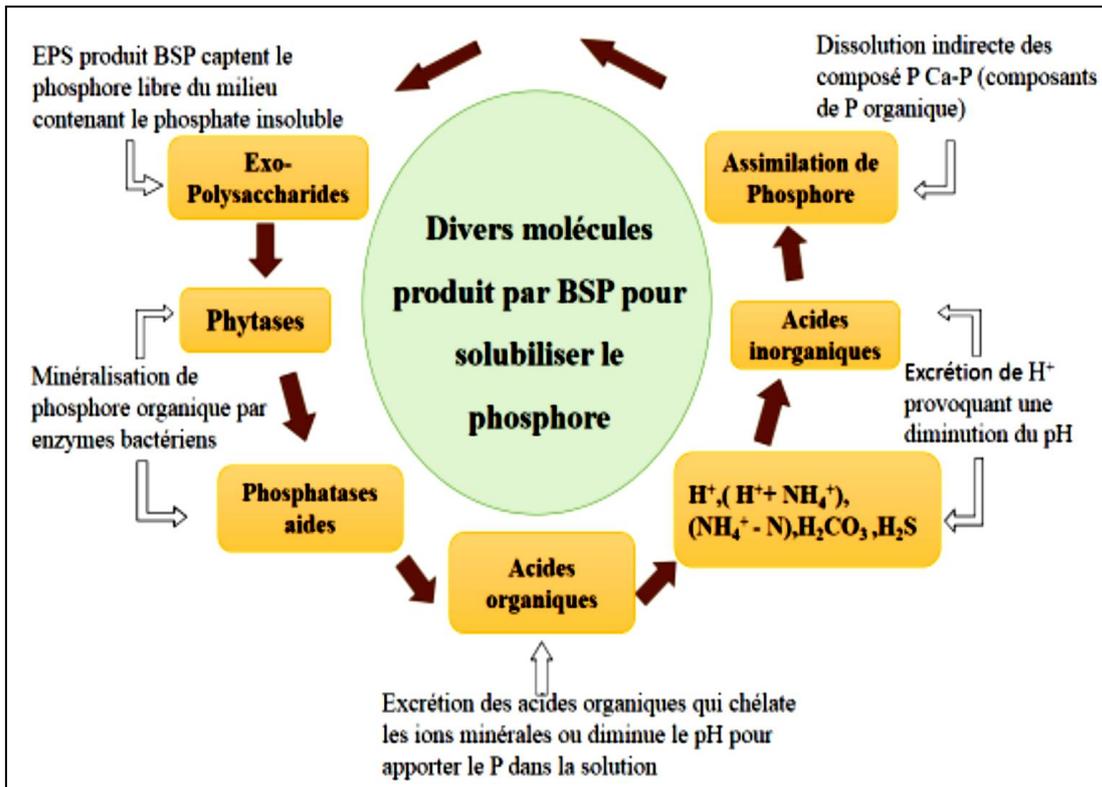
ses propriétés physicochimiques. Elle dépend également des caractères culturels des espèces en question et de leurs aptitudes à concurrencer le reste de la flore tellurique dans un environnement donné. L'affinité métabolique d'un BSP vis-à-vis des exsudats racinaires d'une plante est, elle aussi, un facteur déterminant de sa capacité de survie dans la zone rhizosphérique de cette dernière (**Khan et al., 2009**).

Les BSP sont retrouvées dans tous les types de sol. Leur population est généralement faible dans les sols arides et semi-arides, probablement en raison de la faible teneur en matière organique et de la haute température durant une grande partie de l'année. La population des BSP est, par contre, plus élevée dans les sols soumis à des climats doux et humides qu'à des climats secs. Selon les conditions susmentionnées, la population des BSP peut atteindre 50% de la flore totale d'un sol. Par contre, les champignons solubilisateurs du phosphore (PSF : *Phosphate solubilizing fungi*) ne peuvent représenter que 0,1 à 0,5% de la flore totale d'un sol (**Satyaprakash et al., 2017**).

Parmi les PSB, celles appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Azospirillum* et *Enterobacter* sont les plus rencontrées dans les sols agricoles (**Kumar et al., 2016**).

### 3.1. Mécanismes d'action des BSP

Les principaux mécanismes de solubilisation microbienne du P dans le sol sont : (1) l'abaissement du pH du sol (acidification) par production d'acides organiques et la libération des protons ( $H^+$ ) et ; (2) minéralisation (biosynthèse de phytases et de phosphatase acide permettant de libérer le phosphate des molécules organiques) (**figure 2**) (**Satyaprakash et al., 2017 ; Behera et al., 2014**).



**Figure 02.** Solubilisation du phosphate par les BSP (Khan *et al.*, 2009).

### 3.1.1. Solubilisation du phosphate minéral

La solubilisation du phosphate minérale par les microorganismes se fait principalement par chélation des cations associés aux atomes de phosphate. Ces derniers sont souvent associés aux groupements hydroxyles/carboxyles des acides organiques d'origine microbienne (Behera *et al.*, 2014 ; Rfaki *et al.*, 2019).

#### a. Production d'acides organiques

Les acides organiques sont produits principalement par respiration oxydative ou par fermentation de sources de carbone organique dans le sol. Le type d'acide organique produit et sa quantité diffèrent selon le microorganisme producteur. Il a été constaté que les BSP produisent des acides comme l'acétate, le lactate, le malate, l'oxalate, le succinate, le citrate, le gluconate, le céto gluconate, etc. Certaines bactéries appartenant au genre *Bacillus*, à titre d'exemple, sont capables de produire des mélanges d'acide lactique, isovalérique, isobutyrique et facétique, jouant un rôle remarquable comme BSP dans le sol (Behera *et al.*, 2014 ; Satyaprakash *et al.*, 2017).

### *b. Production d'acides inorganiques*

La production des acides inorganiques tels que l'acide sulfurique, l'acide nitrique et les acides carboniques par les BSP peut également jouer un rôle dans la solubilisation du phosphate. Cependant, ces acides sont moins efficaces dans la libération d'orthophosphores que les acides organiques. Les acides inorganiques sont produits par l'oxydation de matières azotées ou de composés inorganiques de soufre (**Kumar *et al.*, 2016**).

### *c. Autres*

- **Libération de protons H<sup>+</sup>**

L'acidification du milieu par libération des proton H<sup>+</sup> est rapportée comme un mécanisme alternatif de solubilisation du phosphore inorganique. Les protons H<sup>+</sup> proviennent de l'assimilation bactérienne de l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), de la production respiratoire de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (acide carbonique) et de la libération d'anions d'acides organiques (**Prabhu *et al.*, 2019**).

- **Production des exopolysaccharides**

Les exopolysaccharides microbiens ont un effet indirect sur la solubilisation du phosphate. Elles sont en grande partie produits par des microorganismes en réponse au stress. Des études sur les exopolysaccharides microbiens ont révélé leur capacité à se lier aux métaux du sol, les empêchant ainsi de se coller aux atomes du phosphate (**Prabhu *et al.*, 2019**).

### **3.1.2. La minéralisation du phosphate organique**

La solubilisation du phosphate organique, également appelée minéralisation du phosphate organique, joue un rôle inévitable dans le cycle du phosphate dans un système agricole. Le phosphate organique (Po) peut constituer de 4 à 90% du P total d'un sol (**Khan *et al.*, 2009**). Les BSP minéralisent le Po du sol à travers : (1) la production de phosphatases ; (2) la libération d'anions organiques et ; (3) la production de sidérophores (**Khan *et al.*, 2009 ; Satyaprakash *et al.*, 2017**).

La dégradabilité des composés organiques phosphatés dépend principalement des propriétés chimiques et biochimiques de leurs molécules. A titre d'exemple, les acides nucléiques, les phospholipides et les phosphates liés aux sucres se décomposent

facilement. Cependant, l'acide phytique, les polyphosphores et les phosphonates se décomposent plus lentement (**Rodriguez et Fraga, 1999**).

La minéralisation du Po dans le sol est effectuée par l'action de nombreuses enzymes microbiennes comme la phosphatase (phosphohydrolase), la phytase, la phosphonatase et C-P lyase (**Prabhu et al., 2019**). Les phosphatases convertissent le phosphate organique de haut poids moléculaire en composés de faible poids moléculaire par hydrolyse des liaisons esters, conduisant à la libération des ions de phosphate. Les phytases hydrolysent l'acide phytique ou les composés myo-inositolphosphate. La phosphonatase et la C-P lyase hydrolysent les liaisons esters des phosphonates et convertissent les phosphonates en hydrocarbures et en ions phosphates assimilables. (**Behera et al., 2014 ; Prabhu et al., 2019**).

Dans l'environnement, il paraît que l'activité solubilisatrice principale correspond à celle des phosphatases acides et des phytases en raison de la prédominance de leurs substrats dans le sol (**Behera et al., 2014**).

*a. Phosphatases (phosphohydrolase)*

De nombreux microorganismes ont développé une enzyme pouvant libérer du phosphate inorganique à partir d'organophosphores complexes. Ces enzymes sont appelées phosphatase et, en fonction de leur pH optimal, sont classées comme phosphatases alcalines (pH > 7) ou acides (pH < 6). Ces enzymes hydrolysent différents systèmes de phosphate, y compris ceux des alcools primaires, secondaires, cycliques et de sucres ainsi que les phénols et les amines (**Behera et al., 2014**).

*b. Phytase*

Le phytate est le principal composant des formes organiques du P dans le sol. La capacité des plantes à obtenir du phosphate directement à partir du phytate est très limitée. Par conséquent, les microorganismes sont en fait un facteur clé dans la régulation de la minéralisation du phytate dans le sol et sa présence dans la rhizosphère peut compenser l'incapacité des plantes à assimiler le phytate. Les phytases, un groupe spécifique d'enzymes de libération de P capables de cliver les liaisons C-P des organophosphonates (**Behera et al., 2014 ; Suhana et al., 2019**).

# **Chapitre II**

## **Procédures d'isolement et de sélection des BSP**

L'isolement des BSP se fait généralement sur milieux solides en utilisant une seule source de phosphate insoluble. L'idée est de mettre en évidence la présence d'une zone de dégradation des graines du phosphate, homogènement réparties sur une boîte de Pétri, autour des colonies (**Gupta et al., 1994 ; Behera et al., 2014**). Les milieux de culture les plus utilisés sont : (1) le milieu Pikovskaya PVK (**tableau 01**) ; (2) la gélose Sperber et ; (3) la gélose NBRIP (*National Botanical Research Institute Phosphate*) (**tableau 02**) (**Gupta et al., 1994 ; Prabhu et al., 2019 ; Hii et al., 2020 ; Triharyanto et al., 2020**).

**Tableau 01.** Composition du milieu PVK Pour un volume de 1L (**Pikovskaya, 1948**).

Composant	Quantité
Ca <sub>3</sub> HPO <sub>4</sub>	0.7 g
Glucose	10 g
NaCl	0.2 g
KCl	0.295 g
FeCl <sub>3</sub>	0.003 g
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0.373 g
MgSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	0.41 g
Extrait de levures	3 g
Agar	20 g
pH	6.8 à 7

**Tableau 02.** Composition du milieu NBRIP pour un volume de 1L (**Nautiyal, 1999**).

Composant milieu	Quantité
Glucose	10 g
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	5 g
MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	5 g
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	0.25 g
KCl	0.2 g
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.1 g

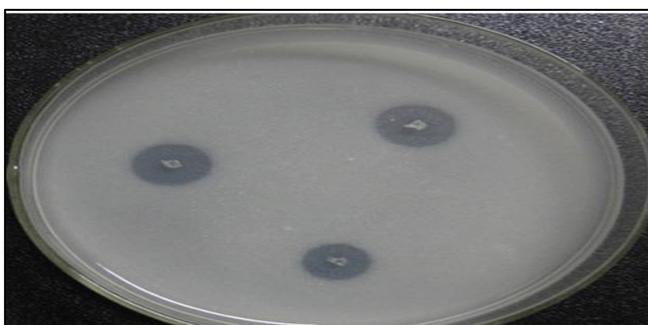
### 1. Exemple d'un protocole d'isolement sur milieu solide

A partir d'une culture bactérienne jeune, ensemercer une goutte de 5 µL de chaque isolat sur le milieu Pikovskaya préalablement couler sur des boites de Pétri (contenant du

phosphate tricalcique [ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ] : une forme de phosphate insoluble). Incuber les boîtes de Pétri à  $28^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 12 jours. Répéter trois fois pour chaque isolat et incuber à  $28^\circ\text{C}$  pendant 12 jours (Ndiaye *et al.*, 2020).

La capacité des souches bactériennes à solubiliser le phosphate se traduit par l'apparition d'un halo clair autour de la colonie (Hii *et al.*, 2020). En fin, un indice de solubilisation (IS en mm) est déterminé selon la formule suivante (Ndiaye *et al.*, 2020):

$$\text{IS} = \frac{\text{Diamètre de la colonie} + \text{diamètre du halo clair}}{\text{Diamètre de la colonie}}$$



**Figure 03.** Halo transparent autour des colonies (Chen et Liu, 2019).

## 2. Exemple d'un protocole sur milieu liquide

La quantification est basée sur une méthode colorimétrique utilisant le bleu de phospho-molybdate comme révélateur. Des cultures bactériennes fraîches sont cultivées sous agitation dans du bouillon PVK (100 mL) : 12 jours ; 200 tr/min ;  $24^\circ\text{C}$ . Les surnageants sont décantés et filtrés, puis le pH de chaque échantillon est mesuré après addition de quelques gouttes du colorant susmentionné. Le P disponible est déterminé par spectrophotométrie à 882 nm en utilisant une solution standard de phosphate (Gull *et al.*, 2004).

## 3. Lecture critique

Selon Gupta *et al.*, (1994) et les travaux précédents de Pikovskaya (1948), il apparaît clairement qu'il n'y a pas de corrélation entre la formation du halo autour d'une colonie et la quantité du phosphate inorganique solubilisé. Ces auteurs ont également rapporté que plusieurs isolats qui ne présentaient aucune zone claire autour de leurs colonies peuvent solubiliser le P inorganique en milieu liquide. Un milieu liquide est donc

souvent plus révélateur du potentiel microbien en matière de solubilisation du phosphate qu'un milieu solide. Cependant, les milieux solides présentent l'avantage du fait qu'ils peuvent être utilisés pour isoler, directement à partir des échantillons du sol, des microorganismes solubilisateurs du phosphate.

Il est important de noter que la période d'incubation minimal sur milieu solide permettant d'avoir des colonies sur les différents milieux varient considérablement selon la composition de ces derniers (ex. : 24-96 h sur Pikovskaya utilisé par **Pikovskaya (1948)** et 7 jours sur Pikovskaya utilisé par **Gupta et al., (1994)**). Le choix d'un milieu de culture convenable pour l'isolement et la sélection des BSP doit donc tenir compte des propriétés physicochimiques de l'échantillon à partir duquel les bactéries seront isolées. Ce choix permettra d'augmenter les chances de rencontre, en culture, avec la plupart des composants de la population microbienne solubilisatrice du phosphate dans l'échantillon d'isolement.

#### **4. Besoins nutritionnels des PSB en carbone et en azote**

Il est clair que les fonctions métaboliques des microorganismes varient en fonction de leurs enivements. Dans cette partie, nous précisons l'effet du carbone et de l'azote sur l'efficacité l'aptitude des BSP à solubiliser le phosphate.

##### **4.1. Carbone**

Dans une étude réalisée par **Fasim et al., (2002)**, il a été constaté que la solubilisation du phosphate atteint son maximum en présence du glucose comme source de carbone. La libération du phosphate augmente avec l'augmentation des concentrations de glucose, ce qui peut être attribué à la grande disponibilité de la source d'énergie pour la croissance des souches et la production des acides (**Yadav et Singh, 1991**). Elle peut également être attribuée aux voies métaboliques, relativement simples, liées la dégradation du glucose.

##### **4.2. Azote**

**Kumar et al., (2014)**, ont observé que les sources d'azote inorganiques solubilisent mieux le  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  par rapport aux sources d'azote organiques. D'autre études ont montré une meilleure solubilisation des phosphates en présence de sulfate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (**Dave et Patel, 2003**).

# **Chapitre III**

## **Avancées et perspectives**

## 1. Avancées

Les bactéries solubilisatrices du phosphate peuvent augmenter la disponibilité du phosphate (P) dans le sol et améliorer la croissance, le rendement et la teneur en phosphate des cultures agricoles (Aye *et al.*, 2021). Récemment, de nombreux travaux ont été faits à la recherche de nouvelles souches efficaces comme engrais naturels substituant les engrais chimiques phosphatés ou réduisant leur apport dans les terrains agricoles. Ci-dessous, des travaux scientifiques récents, consacrés à l'isolement, la sélection et l'utilisation des BSP sont résumés.

Qarni *et al.* (2021) ont isolé, identifié et étudié l'effet de quelques bactéries solubilisatrices du phosphate sur la promotion de la croissance des plantes et leur potentiel comme bio-engrais en agriculture durable. L'isolement a été réalisé à partir des mines destinées à l'extraction du phosphate (phosphate de roches : mines de l'hydroxyapatite). L'équipe a également étudié la capacité des bactéries isolées à dégrader le phosphate tricalcique, à produire de l'ACC désaminase et de l'acide indole acétique. Les bactéries sélectionnées ont été moléculairement identifiées (ARN 16s). Elles appartiennent aux espèces : *Staphylococcus sp.*, *Bacillus firmus*, *Bacillus safensis* et *Bacillus licheniformis*.

Les bactéries sélectionnées ont été testées (en combinaison avec trois types d'engrais : Phosphate rocheux, composte, phosphate de diammonium) pour leur capacité à améliorer la croissance des plantes de maïs. Les résultats montrent que les bactéries susmentionnées ont permis d'augmenter la concentration du phosphate assimilable dans le sol utilisé et ont promu la croissance des plantes inoculées. Comme conclusion, les sols riches en phosphate peuvent constituer une source potentielle de BSP. Ces derniers peuvent être utilisés afin de réduire la fréquence du recours aux engrais chimiques et leurs concentrations dans les terrains agricoles Qarni *et al.* (2021).

Récemment, Game *et al.* (2020) ont réalisé un travail sur champ dans lequel ils ont étudié l'effet biofertilisant de quelques BSP, seules ou en combinaison avec le PGPR *Azotobacter* et des bactéries mobilisant la potasse (KMB : *Potassium Mobilizing Bacteria*), en présence de différentes doses d'engrais inorganiques sur le rendement du blé NIAW 301 (variété : Trimbak). Comme résultat principal, le consortium (*Azotobacter* + BSP + KMB) a permis d'augmenter significativement le rendement du blé testé par rapport à celui de la parcelle témoin. Comparé aux autres traitements, l'utilisation d'une dose complète

d'engrais inorganiques en présence du consortium susmentionné a permis de donner le meilleur rendement parmi les traitements utilisés.

Selon les mêmes auteurs, l'augmentation obtenue du rendement du blé avec le traitement (consortium + engrais) est due au fait que l'inoculation des graines par les biofertilisants a augmenté le taux de fixation de l'azote, de solubilisation du phosphate, de mobilisation de la potasse et d'autres substances favorisant la croissance des plantes, améliorant ainsi la disponibilité des nutriments pour les plantes **Game et al. (2020)**.

**Chen et al. (2021)** ont réalisé une étude dans laquelle 7 bactéries endophytes solubilisatrices le phosphate ont été isolés à partir des racines du sapin de Chine, Les BSP sélectionnées ont été identifiées comme appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Paraburkholderia*, *Novosphingobium* et *Ochrobactrum*.

L'utilisation des bactéries sélectionnées comme biofertilisants a permis d'augmenter significativement les paramètres végétaux (biomasse des feuilles et des racines, contenu en NPK etc.) du sapin de Chine comparé aux plantules non inoculées. Elles ont également amélioré l'activité uréasique du sol utilisé son contenu en phosphatase acide, et sa teneur en nutriments. Selon **Chen et al.**, l'utilisation des BSP sélectionnés a permis d'augmenter le rendement du sapin de chine et elles peuvent donc être utilisées comme agents biologiques substituants aux engrais chimiques afin de réduire la pollution de l'environnement **Chen et al. (2021)**.

**Chungopast et al., (2021)** ont étudié l'efficacité des bactéries solubilisatrices du phosphate pour l'amélioration du rendement de la culture de la canne à sucre. L'objectif en est de déterminer l'effet de certains BSP sur la disponibilité du phosphate assimilable dans un sol et, en conséquence, leur impact sur une culture de canne à sucre (cv. Lampang) en pots contenant les sols inoculés. Les bactéries en question ont été isolées sur le milieu Pikovskaya et les concentrations du phosphate assimilable dans les échantillons du sol ont été déterminées à partir de l'eau lessivée.

Les résultats montrent que l'utilisation des BSP à un taux de 64 g.kg<sup>-1</sup> de phosphate dans les sols a permis de donner les concentrations de leur phosphate assimilable les plus élevées (30,00 mg. L<sup>-1</sup>) après 90 jour de l'inoculation. L'augmentation de la charge microbienne en BSP en présence des engrais chimiques a permis de donner un meilleur rendement, tout en réduisant la concentration des engrais utilisés. Selon **Chungopast et al.**,

(2021), l'utilisation des BSP peut permettre de lutter contre la fixation du phosphate dans les sols et d'améliorer, en même temps, le rendement des plantes inoculées. L'utilisation de telles stratégies pourra, sans doute, permettre de réduire le recours répétitif aux engrais chimiques et la réduction de leurs taux d'accumulation dans les terrains agricoles.

Dans le travail de **Song et al. (2021)**, l'effet de l'inoculation du sol par des BSP sur la diversité de sa communauté microbienne et sur la croissance de la plante *Ulmus chenmoui* (l'orme de Chenmou) en Chine a été étudiée. Pour ce faire, des expériences sous serre et en champ ont été réalisées. Les quatre BSP testées ont été identifiées comme suit : UC-1 (*Pseudomonas* sp.), UC-M (*Klebsiella* sp.), UC-J (*Burkholderia* sp.) et UC-3 (*Chryseobacterium* sp.).

Après séquençage multiple, il a été constaté que les bactéries inoculées ne demeurent pas longtemps les souches dominantes dans la rhizosphère d'*U. chenmoui*. Cependant, les BSP utilisées altèrent significativement la composition de la communauté bactérienne du sol inoculé. La présence des BSP diminue l'abondance relative des bactéries du taxon *Chloroflexi*, alors que d'autres bactéries comme celles appartenant aux taxons *Proteobacteria* et *Bacteroidetes* ont augmentés de nombre. Les résultats montrent également que l'application des BSP améliore la croissance de la plante étudiée, tout en modulant la flore microbienne rhizosphérique de cette dernière. Les résultats de cette étude montrent clairement le rôle « indirect » que peuvent jouer certains biofertilisants en modulant la population microbienne de la rhizosphère des plantes, favorisant les groupes bactériens connus pour leur rôle stimulateur de la croissance des plantes **Song et al. (2021)**.

Afin d'étudier l'effet des BSP sur la disponibilité du phosphate dans le sol et la croissance et le rendement de la canne à sucre, une expérience a été menée par **Aye et al. (2021)**. Dans cette expérience, deux souches bactérienne, solubilisatrices du phosphate : (1) *Kosakonia radicincitans* (BSP1) et ; (2) *Bacillus subtilis* (BSP2) ont été appliqués avec ou en absence de deux engrais phosphatés : (1) le phosphate de diammonium (DAP) et ; (2) le phosphate naturel de roche (RP).

L'application des BSP en absence et en présence d'engrais phosphatés a amélioré le rendement des plantes testées de 17,03 et de 38,42%, respectivement. Il a été également constaté que l'application de la souche PSB2 en parallèle au DAP a significativement

augmenté la teneur en phosphore disponible dans le sol et le rendement de la canne à sucre. La population des PSB et les teneurs en phosphate assimilable étaient plus élevées dans les traitements contenant les engrais RP et DAP par rapport au témoin, suggérant le rôle des BSP dans le maintien de la fraction assimilable du phosphate ajouté à travers les engrais chimiques, mais aussi dans la solubilisation des fractions non assimilables du phosphate déjà présent dans le sol **Aye et al. (2021)**..

Dans une autre étude, **Hussain et al. (2021)** ont sélectionné des BSP afin de les utiliser comme promoteurs de la croissance des céréales et l'absorption du P dans les sols calcaires alcalins. Les souches isolées ont été utilisées à la fois en présence et en absence de lombricompost (Engrais issu de la transformation de matières organiques par certains vers de terre).

Les résultats ont révélé que des souches sélectionnées de BSP augmentaient significativement la hauteur des plantes et la biomasse sèche de leurs racines. Les concentrations en P dans les tissus des plantes étaient significativement plus élevées dans les pots inoculés par les BSP en présence du lombricompost par rapport au reste des traitements. Les résultats suggèrent que l'utilisation des BSP comme fertilisants biologiques peut améliorer la nutrition des plantes et la production totale des céréales **Hussain et al. (2021)**.

Récemment, d'autres travaux se sont intéressés à l'utilisation des BSP comme substituants aux engrais chimiques dans le but d'améliorer le rendement et la croissance des plantes (**Biswas et Shivaprakash, 2021 ; Hassan et al., 2021**)

## 2. Perspectives

Les BSP, quelques soient leurs mécanismes d'action, doivent être capables de survivre et de coloniser le sol rhizosphérique. Malheureusement, l'interaction BSP-plantes peut être instable dans l'espace-temps de son application et cet aspect est souvent mal étudié.

Les bons résultats obtenus *in vitro* ou sous serre ne peuvent pas toujours être reproduits de manière fiable dans des conditions sur champ. La variabilité des performances du BSP peut être due à divers facteurs environnementaux qui peuvent affecter leur croissance et leur effet sur la plante. Les effets de ces facteurs

environnementaux tels que le climat, les conditions météorologiques, les caractéristiques du sol et la composition et l'activité de la flore microbienne indigène doivent donc être étudiés à long terme.

Pour obtenir une croissance optimale des deux partenaires, l'interaction BSP-plants doit être favorisée. Pour cela, il est important de comprendre les signaux moléculaires clés de ces interactions dans leur complexité. Cependant, à nos jours, les modalités fines de ces phénomènes ne sont pas entièrement élucidées.

Il serait intéressant d'approfondir les données scientifiques sur les BSP, leurs mécanismes d'action, mais aussi leurs effets à long terme sur l'environnement et la plante inoculée. Également, l'étude de la sécurité des BSP sur la santé humaine doit être incluse dans les travaux de screening au futur.

L'accumulation des données sur les mécanismes clés de l'interaction plante-BSP et les avancements biotechnologiques en matière de stockage, transport et livraison de ces bactéries permettront probablement au futur de faire prospérer ce champ d'activité, de plus en plus imposante.

# **Conclusion**

## Conclusion

Le phosphate est l'un des nutriments les plus importants pour le métabolisme des plantes. L'agriculture moderne, fatiguée de l'utilisation excessive des engrais phosphatés de nature chimiques, fait de plus en plus recours aux bactéries solubilisatrices du phosphate (BSP). Les BSP jouent un rôle très important dans les cycles biogéochimiques des éléments de base de la photosynthèse tels que le carbone, l'azote et le phosphate. Les BSP produisent des enzymes et des acides organiques étroitement liés aux mécanismes de solubilisation des phosphates organiques et/ou inorganiques dans le sol, participant à l'augmentation des concentrations du phosphate assimilable par les plantes. L'avantage de ces microorganismes biofertilisants c'est leur aptitude durable, mais aussi leur sécurité à long terme pour l'homme et l'environnement.

Ce mémoire constituera une référence à l'ensemble de la communauté scientifique qui s'intéresse aux bactéries solubilisatrices du phosphate. Il permettra également aux chercheurs d'avoir accès aux dernières avancées scientifiques sur les PSB. Cependant, une meilleure compréhension des mécanismes d'action établis par les PGPR en générale et, les PSB en particulier, pour la promotion de la croissance des plantes est nécessaire pour une meilleure application de ces microorganismes sur terrain. En effet, d'autres efforts sont nécessaires afin de déterminer les molécules clés de signalisation bactérie-plante, la stabilité d'un inoculum dans un nouvel environnement et son effet à long terme sur la plante, la microflore, le sol et la santé humaine avant tout.

Les résultats susmentionnés dans ce document sur la dynamique de la solubilisation de phosphate et l'importance de l'utilisation des PSB telles que *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Kosakonia* etc. afin de surmonter l'un des problèmes majeurs de l'agriculture moderne se résume dans l'immense potentiel métabolique que possèdent ces bactéries. Ceci permettra probablement de passer vers une agriculture plus saine, basée sur une compréhension profonde des interactions plante-bactérie au niveau de la rhizosphère.

# **Références Bibliographiques**

## Références bibliographiques

- Abd el-azeem, S.A.M., Mehana, T.A & Shabayek, A.A. (2007).** Some plant growth promoting traits of rhizobacteria isolated from Suez Canal region, Egypt. African Crop Science Conference Proceedings Vol. 8. pp. 1517-1525.
- Aye Y.P.P., Pinjai, P., & Tawornpruek, S. (2021).** Effect of Phosphorus Solubilizing Bacteria on Soil Available Phosphorus and Growth and Yield of Sugarcane. Walailak Journal of Science and Technology ,18(12). <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.10754>.
- Behera, B. C., Singdevsachan, S. K., Mishra, R. R., Dutta, S. K., Thatoi, H. N. (2014).** Diversity, mechanism and biotechnology of phosphore solubilising microorganism in mangrove—A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(2), 97–110.
- Biswas, S., & Shivaprakash, M. K. (2021).** Effect of co-inoculation of potassium solubilizing, mobilizing and phosphorus solubilizing bacteria on growth, yield and nutrient uptake of radish (*Raphanus sativus* L). *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci*, 8(1), 108-113.
- Chen, J., Zhao, G., Wei1, Y., Dong, Y., Hou, L., & Jiao, R. (2021).** Isolation and screening of multifunctional phosphore solubilizing bacteria and its growth-promoting effect on Chinese fir seedlings. *Scientific Reports*, 11:9081
- Chen, Q., Liu, S. (2019).** Identification and Characterization of the Phosphore-Solubilizing Bacterium *Pantoea* sp. S32 in Reclamation Soil in Shanxi, China. *Frontiers in Microbiology*, 12p.
- Chibani, H. R. (2017).** Sélection et caractérisation des bactéries solubilisatrices du phosphore, isolées du sol salin dans l'ouest Algérien : effet sur la promotion de la croissance du blé (*Triticum sp.*), Doctoral dissertation, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis.169p.
- Chungopast, S., Thongjoo, C., Islam, A.K.M.M., & Yeasmin, S. (2021).** Efficiency of phosphore-solubilizing bacteria to address phosphorus fixation in

Takhli soil series: a case of sugarcane cultivation, Thailand. *Plant Soil* 460, 347–357 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04812-w>

- Dave, A., & Patel, H.H. (2003).** Impact of different carbon nitrogen sources on phosphore solubilization by *Pseudomonas fluorescens*. *Indian J Microbiol*, 43(1): 33-36.
- Fasim, F., Ahmed, N., Parsons, R., & Gadd, G. M. (2002).** Solubilization of zinc salts by a bacterium isolated from the air environment of a tannery. *FEMS Microbiology Letters*, 213(1), 1–6. doi:10.1111/j.1574-6968.2002.tb11277.x.
- Ghanimi, R. (2014).** Analyse agro-physiologique de la réaction de la symbiose fève-rhizobia sous déficit en phosphore. (Marrakech).
- Game, B.C., B. M. Ilhe, V. S. Pawar & Khandagale, P. P. (2020).** Effect of Azotobacter, Phosphore Solubilising Bacteria and Potash Mobilising Bacteria Inoculants on Productivity of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 9(3):8P.
- Goswami, S.P., Maurya, B.R., Dubey, A. N. & Singh, N. K. (2019).** Role of phosphorus solubilizing microorganisms and dissolution of insoluble phosphorus in soil. *International Journal of Chemical Studies*; 7(3): 3905-3913.
- Gull, M., Hafeez, F. Y., Saleem, M., & Malik, K. A. (2004).** Phosphorus uptake and growth promotion of chickpea by co-inoculation of mineral phosphore solubilising bacteria and a mixed rhizobial culture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(6), 623-628.
- Gupta, R., Singal, R., Shankar, A., Kuhad, R. C., & Saxena, R. K. (1994).** A modified plate assay for screening phosphore solubilizing microorganisms. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 40(3), 255–260.
- Hassan, N., Qadir, G., Hassan, F. U., Akmal, M., & Sultan, T. (2021).** Impact of phosphore solubilizing bacteria in combination with di-ammonium

phosphore on growth and development of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 1-13.

**Hii, Y. S., Yen San, C., Lau, S. W., & Danquah, M. K. (2020).** Isolation and characterisation of phosphore solubilizing microorganisms from peat. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 26, 101643. doi:10.1016/j.bcab.2020.101643.

**Hussain, S., Sharif, M., & Ahmad, W. (2021).** Selection of efficient phosphorus solubilizing bacteria strains and mycorrhiza for enhanced cereal growth, root microbe status and N and P uptake in alkaline calcareous soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1-10.

**Kalayu, G. (2019).** Phosphore Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as Biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, 2019, 1–7.

**Khan, A.A., Jilani, G., Akhtar, M.S., Naqvi, S.M. S., & Rasheed, M. (2009).** Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their Role in Crop Production. *J. AGRIC. BIOL. SCI.* 1(1):48-58.

**Khan, M. S., A. Zaidi., et M. Javed (2009).** Microbial Strategies for Crop Improvement. pp: 1-371. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp: 1-371.

**Kim, K.Y., Hwangbo, H., Park, R.D., Kim, Y.W., Rim, Y.S., Park, K.H., & Suh, J.S. (2003).** 2-Ketogluconic Acid Production and Phosphore Solubilization by *Enterobacter* intermedium. *Current Microbiology*, 47(2), 6p.

**Kumar, A., Baby, K, & Mallick, M. (2016).** phosphore solubilizing microbes: an effective and alternative approach as biofertilizers, *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, (8), 37-40.

**Kumar, M. G., & Ram, K. R. (2014).** Phosphore Solubilizing Rhizobia Isolated from *Vigna trilobata*. *American Journal of Microbiological Research*, 2(3):105-109.

**Méchali, R & Kherrat, S. (2016).** Optimisation de la solubilisation du phosphore par des rhizobactéries. Mémoire master en biologie : biotechnologie des

microorganismes. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie :  
Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem, 78 p.

**Nautiyal C.S. (1999).** An efficient microbiological growth medium for screening phosphore solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters* 170 : 265-270.

**Ndiaye, S. O., Diouf, A., Ndoye, F., Diop, I., Toure, O., Ndiaye, M., & Diop, T. A. (2020).** Isolement et caractérisation physiologique de rhizobactéries d'oignon cultivé dans la zone vallée Fleuve Sénégal. *Afrique SCIENCE*, 16(1), 300-306.

**Oteino, N., Lally, R. D., Kiwanuka, S., Lluyd, A., Ryan, D., Germaine, K. J., & Dowling, D. N. (2015).** Plant growth promotion induced by phosphore solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. *Frontiers in Microbiology*, (6), 9p.

**Pikovskaya, R. I. ,1948.** Mobilization of phosphores in soil in connection with the vital activities of some microbial species. *Mikrobiologia*. 17: 362 – 370.

**Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J., Herrmann L., Waithaisong K., Lesueur D., Blanchart E., Chapuis-Lardy L., & Hinsinger P. (2015).** Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol. *Innovations Agronomiques*. 43, 115-138.

**Prabhu, N., Borkar, S., & Garg, S. (2019).** Phosphore solubilization by microorganisms. *Advances in Biological Science Research*, 161–176.

**Qarni, A., Billah, M., Hussain, K., Shah, S.H., Ahmed, W., Alam, S., Sheikh, A.A., Jafri, L., Munir, A., Malik, K.M., & Khan, N. (2021).** Isolation and Characterization of Phosphore Solubilizing Microbes from Rock Phosphore Mines and Their Potential Effect for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 13, 2151. <https://doi.org/10.3390/su13042151>.

**Rfaki, A., Zennouhi, O., Aliyat, F. Z., Nassiri, L., Ibijbijen, J. (2019).** Isolation, Selection and Characterization of Root-Associated Rock Phosphore

Solubilizing Bacteria in Moroccan Wheat (*Triticum aestivum* L.).  
*Geomicrobiology Journal*, 1(12). 13p.

**Rodriguez, H., & Fraga, R. (1999).** Phosphore solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4-5), 21p.

**Satyaprakash, M., Nikitha, T., Reddi, E.U.B., Sadhana, B., Satya Vani, S. (2017).** A Review on Phosphorous and Phosphore Solubilising Bacteria and Their Role in Plant Nutrition. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 6(4): 2133-2144.

**Sharma, K., Dak, G., Agrawal, A., Bhatnagar, M. & Sharma, R. (2007).** Effect of phosphore solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seeds and seedling growth. *Journal of Herbal Medicine and Toxicology* 1(1) 61-63.

**Song, J., Min, L., Wu, J., He, Q., Chen, F., Wang, Y. (2021).** Response of the microbial community to phosphore-solubilizing bacterial inoculants on *Ulmus chenmoui* Cheng in Eastern China. *PLoS ONE* 16(2): e0247309. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247309>.

**Triharyanto, E., Syamsiyah, J., Nyoto, S., & Wardyani E.A.L. (2020).** Phosphore solubilizing bacteria application to lowland shallot varieties cultivated in highland. *Earth and Environmental Science* 423. doi:10.1088/1755-1315/423/1/012040.

**Wu, F., Li, J., Chen, Y., Zhang, L., Zhang, Y., Wang, S., Liang, J. (2019).** Effects of Phosphore Solubilizing Bacteria on the Growth, Photosynthesis, and Nutrient Uptake of *Camellia oleifera* Abel. *Forests*, 10(4), 348p.

**Yadav, K., Singh, T. (1991).** Phosphorus solubilization by microbial isolate from a Calcinuvent. *J. Indian Soe. Soil Sei*, 39 : 89-93.

**You, M., Fang, S., MacDonald, J., Xu, J., & Yuan, Z. C. (2020).** Isolation and characterization of *Burkholderia cenocepacia* CR318, a phosphore solubilizing bacterium promoting corn growth. *Microbiological Research*, 233, 126395.

# Résumé

## Résumé

Le phosphate (P) est un élément nutritif important pour les végétaux. Il n'est souvent pas disponible sous sa forme assimilable pour les plantes car il est rapidement converti à des formes insolubles et fixé par le fer (Fe) et l'aluminium (Al) dans les sols acides et par le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) dans sols calcaires. Les bactéries solubilisatrices du phosphate (BSP) transforment le phosphate insoluble et donc, inassimilable, en formes assimilable par les plantes grâce à leurs potentiels solubilisateurs et minéralisateur. Ces microorganismes peuvent donc être utiles comme biofertilisants substitutifs d'engrais chimiques à coûts élevés, à effets non durables et à caractères néfastes pour l'équilibre écologique. Ce travail représente une synthèse des travaux scientifique récents dans le domaine de la recherche et de l'utilisation des BSP.

**Mots-clés :** Engrais Biologiques, Agriculture, Fertilisation, Bactérie du sol.

## Abstract

Phosphate (P) is a vital element for plant nutrition. In soil, it is often not available under assimilable form to plants as it is quickly converted to insoluble forms and fixed by iron (Fe) and aluminum (Al) in acidic soils, and by calcium (Ca) and magnesium (Mg) in calcareous ones. The phosphate solubilizing bacteria (PSB) transform the insoluble and, therefore, unassimilable phosphate into easily assimilable forms through their solubilizing- and mineralizing potentials. These ecofriendly microorganisms can therefore be useful as substitutes to chemical fertilizers that are cost effective and harmful for both human health and ecological balance. Herein, we synthesize the most relevant scientific works in the of research field of PSB.

**Keywords:** Biological Fertilizers, Agriculture, Fertilization, Soil bacteria.

## المخلص

الفوسفات عنصر هام لتغذية النباتات في التربة، غالبا ما يتوفر في شكل غير قابل للاستيعاب عن طريق النباتات حيث يتم تحويله بسرعة إلى أشكال غير قابلة للذوبان ويثبت عن طريق الحديد والألمنيوم في التربة الحمضية وعن طريق الكالسيوم والمغنيسيوم في التربة الجيرية. تقوم البكتيريا المذوبة للفوسفات بتحويل المادة الغير قابلة للذوبان وبالتالي الفوسفات الغير قابل الاستيعاب إلى أشكال سهلة الاستيعاب عن طريق إمكانات الذوبان والتمعدن الخاصة بها. لذلك يمكن أن تكون هذه الكائنات الحية الدقيقة الصديقة للبيئة مفيدة كبديل للأسمدة الكيماوية التي تعتبر فعالة من حيث التكلفة وضارة لكل من صحة الإنسان والتوازن البيئي. هنا، نقوم بتجميع الأعمال العلمية الأكثر صلة في مجال البحث عن البكتيريا المذوبة للفوسفات.

**الكلمات المفتاحية:** الزراعة، التسميد، الأسمدة البيولوجية، بكتيريا التربة