

## **Chunks du Document 'Synthèse sur les Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes (PGPR)'**

Ce document a été découpé en segments logiques pour faciliter l'indexation et la récupération d'informations par un système RAG.

### **Chunk 1: Introduction aux PGPR et leur Rôle**

Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes, plus connues sous l'acronyme PGPR (de l'anglais Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), représentent un groupe hétérogène de bactéries du sol qui ont suscité un intérêt scientifique et agronomique considérable au cours des dernières décennies. Ces micro-organismes, qui colonisent activement la rhizosphère (la zone du sol directement influencée par les racines des plantes), établissent des relations bénéfiques avec leur hôte, améliorant sa croissance, sa santé et son rendement. Leur utilisation en tant que biofertilisants et agents de biocontrôle est une alternative prometteuse et écologique aux engrais et pesticides de synthèse, s'inscrivant ainsi dans une démarche d'agriculture durable.

### **Chunk 2: Définition et Habitat des PGPR dans la Rhizosphère**

Le terme PGPR a été introduit à la fin des années 1970 par Joseph W. Kloepper et Milton N. Schroth pour décrire les bactéries du sol qui, une fois inoculées sur des semences, colonisent les racines et stimulent la croissance des plantes. Une bactérie rhizosphérique n'est considérée comme une PGPR que si son inoculation a un impact positif avéré sur la plante.

Ces bactéries prospèrent dans la rhizosphère, un écosystème unique et riche en nutriments. Les plantes sécrètent par leurs racines entre 5% et 30% de leurs produits de photosynthèse sous forme d'exsudats (sucres, acides aminés, etc.), qui servent de source nutritive pour les micro-organismes. Cette interaction crée une densité bactérienne dans la rhizosphère qui peut être de 10 à 1000 fois supérieure à celle du sol environnant. Cependant, on estime que seulement 2 à 5% de ces bactéries rhizosphériques possèdent des propriétés promotrices de croissance.

### **Chunk 3: Diversité Taxonomique des PGPR**

Les traits bénéfiques des PGPR sont répartis dans un large éventail de genres bactériens. Cette diversité reflète la multitude de stratégies d'interaction avec les plantes. Parmi les genres les plus étudiés et utilisés, on trouve :

- *Pseudomonas* (ex: *P. fluorescens*, *P. putida*)
- *Bacillus* (ex: *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*)

- *Azospirillum* (ex: *A. brasilense*, *A. lipoferum*)
- *Azotobacter*
- Les rhizobia symbiotiques (ex: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Allorhizobium*)
- *Enterobacter*
- *Klebsiella*
- *Serratia*
- *Burkholderia*
- *Arthrobacter*
- *Paenibacillus*

#### **Chunk 4: Mécanismes d'Action des PGPR - Introduction**

Les effets bénéfiques des PGPR sur les plantes sont le résultat de mécanismes d'action variés, traditionnellement classés en deux catégories: directs et indirects.

#### **Chunk 5: Mécanismes Directs - Fixation de l'Azote Atmosphérique**

Ces mécanismes impliquent la fourniture directe de composés essentiels à la plante ou la facilitation de leur absorption. Fixation de l'azote atmosphérique: Certaines PGPR peuvent convertir l'azote gazeux ( $N_2$ ), inaccessible aux plantes, en ammoniac ( $NH_3$ ), une forme assimilable. Ce processus est crucial pour la nutrition azotée des plantes et représente environ 65% de l'apport en azote aux cultures à l'échelle mondiale. Des genres comme *Azospirillum*, *Azotobacter* et les rhizobia symbiotiques (*Rhizobium*, etc.) sont des fixateurs d'azote reconnus.

#### **Chunk 6: Mécanismes Directs - Solubilisation des Minéraux**

Solubilisation des minéraux: Une grande partie du phosphore (P) et d'autres minéraux du sol est sous une forme insoluble. Les PGPR, notamment des genres *Pseudomonas* et *Bacillus*, produisent des acides organiques (comme l'acide gluconique) et des enzymes (phosphatases) qui solubilisent ces minéraux, les rendant disponibles pour la plante. La production d'acide gluconique par *Pseudomonas* est un mécanisme de solubilisation du phosphate bien documenté.

#### **Chunk 7: Mécanismes Directs - Production de Phytohormones (Auxines)**

Production de phytohormones: De nombreuses PGPR synthétisent des hormones végétales qui modulent le développement de la plante. Auxines (ex: acide indole-3-acétique, AIA): Produites par environ 80% des bactéries de la rhizosphère, les auxines stimulent principalement le développement du système racinaire (racines latérales, poils absorbants), améliorant ainsi l'absorption de l'eau et des nutriments.

*Azospirillum brasilense* est un producteur d'AIA bien connu, dont la biosynthèse dépend majoritairement du gène *ipdC*.

### **Chunk 8: Mécanismes Directs - Production de Phytohormones (Gibbérellines et Cytokinines)**

Gibbérellines et Cytokinines: Ces hormones stimulent la germination, l'élongation des tiges et la division cellulaire. Des bactéries comme *Bacillus pumilus* produisent des gibbérellines, tandis que *Enterobacter cloacae* produit des cytokinines.

### **Chunk 9: Mécanismes Directs - Production d'ACC Désaminase**

Production d'ACC désaminase: En conditions de stress (sécheresse, salinité), les plantes produisent de l'éthylène, une hormone qui peut inhiber la croissance. Certaines PGPR produisent l'enzyme 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase, qui dégrade le précurseur de l'éthylène, atténuant ainsi les effets négatifs du stress sur la plante.

### **Chunk 10: Mécanismes Indirects - Introduction et Production de Sidérophores**

Mécanismes Indirects: Protection de la Plante. Ces mécanismes améliorent la santé de la plante en la protégeant contre les agents pathogènes (biocontrôle). Production de sidérophores: Dans de nombreux sols, le fer est un élément limitant. Les PGPR produisent des sidérophores, des molécules qui chélatent le fer avec une très haute affinité, le rendant disponible pour la bactérie et la plante, tout en privant les micro-organismes pathogènes de cet élément essentiel. Les *Pseudomonas fluorescences* sont réputées pour produire des sidérophores comme la pyoverdine.

### **Chunk 11: Mécanismes Indirects - Antibiose**

Antibiose: De nombreuses PGPR produisent une large gamme de composés antimicrobiens qui inhibent ou tuent les phytopathogènes. Cela inclut des antibiotiques, du cyanure d'hydrogène (HCN) et des enzymes lytiques (chitinases, protéases) qui dégradent les parois cellulaires des champignons. Les souches de *Bacillus velezensis*, par exemple, possèdent des clusters de gènes pour la synthèse de nombreux lipopeptides antimicrobiens comme la surfactine et la fengycine.

### **Chunk 12: Mécanismes Indirects - Induction de la Résistance Systémique (ISR)**

Induction de la Résistance Systémique (ISR): La simple colonisation des racines par certaines PGPR peut déclencher un état d'alerte dans toute la plante, la rendant plus résistante à une large gamme de pathogènes. Ce mécanisme, médié par les voies de

signalisation de l'acide jasmonique et de l'éthylène, ne dépend pas d'une action directe sur le pathogène mais de l'activation des propres défenses de la plante. Les genres *Pseudomonas* et *Bacillus* sont particulièrement connus pour leur capacité à induire l'ISR.

### **Chunk 13: Mécanismes Indirects - Compétition pour les Nutriments et Niches**

Compétition pour les nutriments et les niches: En colonisant efficacement la rhizosphère, les PGPR entrent en compétition avec les pathogènes pour les nutriments et l'espace, limitant ainsi leur prolifération.

### **Chunk 14: Multifonctionnalité et Synergie des PGPR**

Multifonctionnalité et Synergie: Les souches de PGPR les plus efficaces sont souvent multifonctionnelles, c'est-à-dire qu'elles possèdent plusieurs mécanismes de promotion de la croissance. Par exemple, une souche de *Serratia fonticola* a démontré sa capacité à la fois à solubiliser le phosphate, à produire de l'ammoniac et à exercer une activité antifongique. De même, des souches de *Pantoea agglomerans* possèdent dans leur génome des gènes pour la solubilisation du phosphate, la production de phytohormones et de sidérophores. L'utilisation de consortiums microbiens, combinant plusieurs souches de PGPR, peut également avoir un effet synergique et améliorer les activités de promotion de la croissance.

### **Chunk 15: Conclusion du Rôle des PGPR**

Les PGPR sont des acteurs clés de la santé des sols et des plantes. Leur capacité à améliorer la nutrition, à stimuler la croissance et à protéger les plantes contre les stress biotiques et abiotiques via une panoplie de mécanismes en fait des outils biotechnologiques de premier plan pour l'agriculture de demain. La compréhension approfondie de leur diversité, de leurs mécanismes d'action et de leurs interactions avec les plantes est essentielle pour développer des inoculants microbiens efficaces et fiables, capables de réduire notre dépendance aux intrants chimiques et de promouvoir des systèmes agricoles plus résilients et durables.

### **Chunk 16: Sources des Citations (Partie 1)**

1. Enhancing plant growth promoting rhizobacterial activities through consortium exposure: A review - PMC, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9972119/>
2. Integrated Genomic and Greenhouse Assessment of a Novel Plant Growth-Promoting Rhizobacterium for Tomato Plant - PMC, consulté le juillet 4,

- 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8042378/>
3. Full article: Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review, consulté le juillet 4, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2015.1127500>
  4. (PDF) Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria - ResearchGate, consulté le juillet 4, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/229138683\\_Plant-Growth-Promoting\\_Rhizobacteria](https://www.researchgate.net/publication/229138683_Plant-Growth-Promoting_Rhizobacteria)
  5. Regulatory mechanisms of plant rhizobacteria on plants to the adaptation of adverse agroclimatic variables - Frontiers, consulté le juillet 4, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2024.1377793/full>
  6. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of ..., consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6206271/>
  7. Multidisciplinary evaluation of plant growth promoting rhizobacteria on soil microbiome and strawberry quality - PMC, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9935790/>
  8. Rhizobacteria - Wikipedia, consulté le juillet 4, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Rhizobacteria>
  9. Characterization of plant growth-promoting rhizobacterial isolates associated with food plants in South Africa - PMC, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8448681/>

## **Chunk 17: Sources des Citations (Partie 2)**

10. Genomic and Metabolic Characterization of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Isolated from Nodules of Clovers Grown in Non-Farmed Soil, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10706249/>
11. A Look at Plant-Growth-Promoting Bacteria - MDPI, consulté le juillet 4, 2025, <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/8/1668>
12. Examples of plant growth stimulating phytohormones produced by PGPR - ResearchGate, consulté le juillet 4, 2025, [https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-plant-growth-stimulating-phytohormones-produced-by-PGPR\\_tbl1\\_225740587](https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-plant-growth-stimulating-phytohormones-produced-by-PGPR_tbl1_225740587)
13. en.wikipedia.org, consulté le juillet 4, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Rhizobacteria#:~:text=PGPR%20bacteria%20include%20Pseudomonas%20putida,Azorhizobium%2C%20Bradyrhizobium%2C%20and%20Rhizobium.>
14. pubmed.ncbi.nlm.nih.gov, consulté le juillet 4, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22805914/#:~:text=Plant%20growth%2Dpromoti>

[ng%20rhizobacteria%20\(PGPR\)%20are%20the%20rhizosphere%20bacteria.carboxylate%20deaminase%20\(ACC\)%2C%20quorum](https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1289466)

### Chunk 18: Sources des Citations (Partie 3)

15. Phosphate solubilizing *Pseudomonas* and *Bacillus* combined with rock phosphates promoting tomato growth and reducing bacterial canker disease - Frontiers, consulté le juillet 4, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2024.1289466/full>
16. Assessment of genetic and functional diversity of phosphate solubilizing fluorescent pseudomonads isolated from rhizospheric soil - PMC - PubMed Central, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2625360/>
17. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production - PMC, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10146397/>
18. Indole-3-acetic acid (IAA) protects *Azospirillum brasilense* from indole-induced stress, consulté le juillet 4, 2025, <https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.02384-24>
19. Growth and indole-3-acetic acid biosynthesis of *Azospirillum brasilense* Sp245 is environmentally controlled | FEMS Microbiology Letters | Oxford Academic, consulté le juillet 4, 2025, <https://academic.oup.com/femsle/article/246/1/125/545707>
20. Complete Genome Sequence of the Plant Growth-Promoting Bacterium *Hartmannibacter diazotrophicus* Strain E19T-PMC - PubMed Central, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6754898/>
21. The biosynthesis of pyoverdines - Microbial Cell, consulté le juillet 4, 2025, <https://microbialcell.com/researcharticles/the-biosynthesis-of-pyoverdines/>

### Chunk 19: Sources des Citations (Partie 4)

22. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents - PMC - PubMed Central, consulté le juillet 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3571425/>
23. (PDF) Draft Genome Sequence of Plant-Growth-Promoting..., consulté le juillet 4, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/259205661\\_Draft\\_Genome\\_Sequence\\_of\\_Plant-Growth-Promoting\\_Rhizobacterium\\_Serratia\\_fonticola\\_Strain\\_AU-AP2C\\_Isolated\\_from\\_the\\_Pea\\_Rhizosphere](https://www.researchgate.net/publication/259205661_Draft_Genome_Sequence_of_Plant-Growth-Promoting_Rhizobacterium_Serratia_fonticola_Strain_AU-AP2C_Isolated_from_the_Pea_Rhizosphere)
24. Complete genome analysis and antimicrobial mechanism of *Bacillus velezensis*

GX0002980 reveals its biocontrol potential against mango anthracnose disease | Microbiology Spectrum - ASM Journals, consulté le juillet 4, 2025, <https://journals.asm.org/doi/10.1128/spectrum.02685-24>

25. Comparative Genomic Analysis of *Bacillus velezensis* BRI3 Reveals Genes Potentially Associated with Efficient Antagonism of *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary - MDPI, consulté le juillet 4, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4425/15/12/1588>
26. Genome Sequence of the Plant Growth-Promoting Rhizobacterium ..., consulté le juillet 4, 2025, <https://journals.asm.org/doi/10.1128/mra.00828-19>