

LE MONDE FASCINANT DE LA COMMUNICATION SOUTERRAINE

Cristiana Ariotti¹, Elena Giuliano¹, Paolina Garbeva² et Gianpiero Viganì^{1,2*}

¹ Laboratoire de Physiologie végétale, Département des Sciences de la Vie et de la Biologie des systèmes, Université de Turin, Turin, Italie

² Département d'Écologie microbienne, Institut Néerlandais d'écologie (NIOO-KNAW), Wageningen, Pays Bas

Imagine que tu es un microbe dans le sol, comment communiquerais-tu quelque chose à tes voisins? Eh bien, parler anglais, français ou italien ne te serait pas utile sous terre. Au lieu de cela, tu devras utiliser des molécules à la place de mots! Les microbes du sol comme les bactéries et certains champignons communiquent entre eux et avec d'autres organismes en produisant différents types de molécules. Ces molécules peuvent être volatiles, ce qui signifie qu'elles sont comme des gaz. Elles peuvent voyager facilement à travers de petites poches d'air dans le sol et même voyager très loin. C'est comme la communication à distance. D'autres molécules sont solubles dans l'eau, permettant la communication entre les organismes proches les uns des autres. Les organismes qui reçoivent ces signaux de communication peuvent réagir de différentes manières, par exemple en se développant plus rapidement ou en produisant d'autres molécules en réponse. Dans cet article, nous explorons le monde passionnant et mystérieux de la communication chimique souterraine et son rôle dans les interactions entre les microbes et les plantes.

LA VIE DANS LE SOL

Le sol est un des **écosystèmes** les plus fascinants et les plus complexes de la planète. Ce n'est pas seulement la surface de notre planète dans laquelle s'enracinent les plantes, mais c'est aussi un monde spectaculaire et caché où vivent de nombreux types d'organismes. Le sol est composé

écosystème est constitué de la communauté d'organismes vivant dans une certaine zone, et des composants non-vivants de leur environnement (climat, paysage)

RHIZOSPHERE. La portion de sol située à moins de 2mm des racines d'une plante où les plantes et les microbes peuvent communiquer grâce à des molécules.

COMMUNICATION CHIMIQUE.

Communication qui se produit entre deux ou plusieurs organismes différents (plantes, animaux et microbes) en utilisant des molécules.

SOLUBLE. Substance qui se dissout dans l'eau, comme le sel et le sucre.

VOLATILE. Substance qui s'évapore facilement, tel un gaz, l'odeur d'une fleur.

de morceaux irréguliers de roches, de petits poches d'air et de matière organique (plantes et animaux morts). Cet environnement est un endroit merveilleux pour les microbes (ces organismes minuscules, invisibles à l'œil nu), les insectes et les plantes. Peux-tu croire que le sol est si plein de vie ? Selon les caractéristiques du sol (taille des roches, types d'aliments, quantité d'eau, etc.), différents organismes peuvent y vivre. Ces organismes construisent une communauté spécifique, qui est un ensemble unique d'organismes différents vivant ensemble.

Connais-tu les microbes du sol ? Ce sont de très petits organismes qui vivent attachés aux particules du sol ou à d'autres êtres vivants. Il y a des champignons qui ont une forme similaire à des racines très minces, de sorte qu'ils peuvent toucher et échanger des informations avec leurs voisins. Il existe également des bactéries, qui sont des organismes constitués d'une seule cellule que tu ne peux généralement voir qu'à l'aide d'un microscope. Si ces organismes vivent dans la **rhizosphère** (la partie du sol entourant les racines des plantes), ils sont appelés microbes de la rhizosphère. Ils peuvent également vivre à la surface ou à l'intérieur des racines [1]. Dans la rhizosphère, tu peux trouver des microbes bénéfiques (bons), qui aident les plantes à survivre et à grandir, ou des microbes nuisibles (mauvais), qui attaquent les plantes et les rendent malades.

COMMENT LES MICROBES ET LES PLANTES DU SOL COMMUNIQUENT-ILS ?

Ce qui est particulièrement excitant, c'est la capacité des microbes du sol à communiquer non seulement entre eux mais aussi avec d'autres organismes, comme des plantes et des animaux. La communication entre les microbes et les plantes a été étudiée par de nombreux scientifiques. Cette communication a lieu à proximité des racines des plantes, dans une zone du sol appelée rhizosphère. Elle est basée sur l'utilisation de molécules à la place de mots, et c'est ce qu'on appelle la **communication chimique**. Tu peux imaginer une molécule comme un groupe de nombreuses petites boules (les atomes) connectées les unes aux autres. Ces atomes sont des espèces chimiques importantes, comme le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N), qui s'assemblent (comme un puzzle) pour former des molécules comme l'eau (H₂O) ou le dioxyde de carbone (CO₂). La combinaison spécifique d'atomes crée des molécules qui ont des propriétés différentes.

Les microbes du sol peuvent produire de nombreux types de molécules, qui peuvent être divisées en deux catégories principales : les molécules **solubles** et les molécules **volatiles**. Les molécules solubles se dissolvent dans l'eau, comme un morceau de sucre dans le thé, et elles peuvent être transportées par l'eau dans le sol. Elles sont utilisées pour communiquer avec les plantes qui poussent près des microbes. Les molécules volatiles, également appelées **composés organiques volatils (COV)**, sont utilisées pour communiquer sur de longues distances (**Figure 1**). Ces composés volatils sont des gaz qui se déplacent facilement à travers l'air du sol. Les racines des plantes peuvent détecter ces gaz, comme ton nez peut sentir une fleur ou du pain fraîchement cuit [1]. La communication chimique ne se produit pas seulement dans une direction (des microbes aux plantes), mais dans les deux directions – les plantes

COMPOSÉ ORGANIQUE VOLATIL (COV). Les composés organiques volatils sont produits par différents organismes, comme les plantes et les microbes, et leur permet de communiquer entre eux à distance.

produisent également des molécules qui peuvent être détectées et interprétées par les microbes.

QUELS SONT LES EFFETS DES MOLÉCULES DE COMMUNICATION ?

Voici quelques exemples de ce qui se passe entre les microbes et les plantes lorsqu'ils commencent à communiquer.

Les plantes et les microbes s'entraident pour obtenir de la nourriture

De nombreux microbes du sol peuvent aider les plantes à pousser, car les microbes peuvent augmenter la quantité de certains nutriments nécessaires aux plantes. Par exemple, une bactérie appelée *Rhizobium* peut transformer l'azote de l'air (N_2) en une molécule différente : l'ammoniac (NH_3). Cette transformation est appelée fixation de l'azote et elle se produit dans le sol. La fixation de l'azote est vraiment importante pour les plantes car elles ont besoin d'azote pour se développer. En transformant N_2 en NH_3 , *Rhizobium* aide les plantes à pousser et les rend plus fortes sans que les agriculteurs aient besoin d'ajouter des engrais azotés !

Figure 1. Interactions entre plantes et microbes dans la rhizosphère. L'image montre trois types d'interactions: (A) les interactions entre les plantes et les microbes vivant à la surface des racines ou près des racines, par l'intermédiaire de molécules solubles. (B) les interactions entre les plantes et les microbes vivant loin des racines, à l'aide de molécules volatiles. (C) les interactions avec les microbes vivant à l'intérieur des racines, directement en contact avec les cellules racinaires. Ces interactions ont lieu dans le sol, qui est composé de roches, de poches d'air et de matière organique.

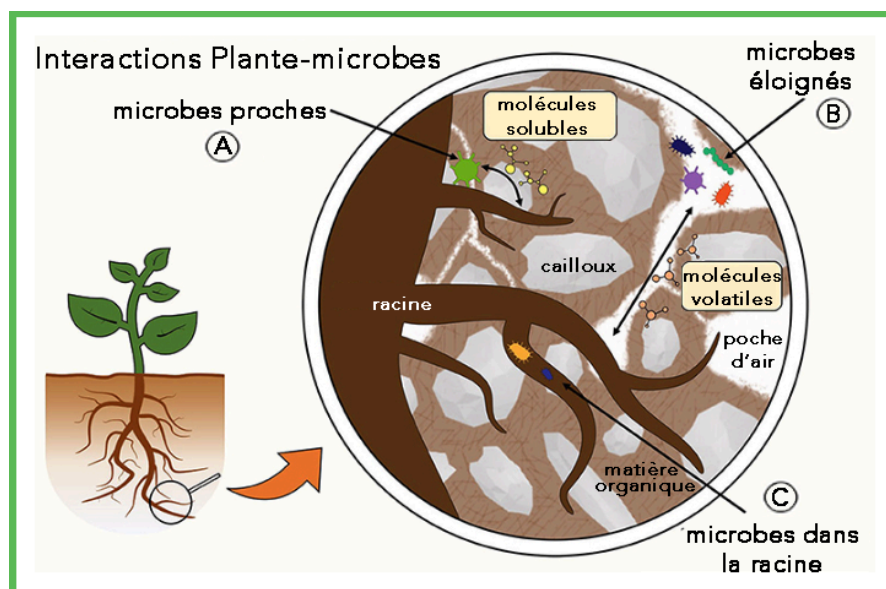
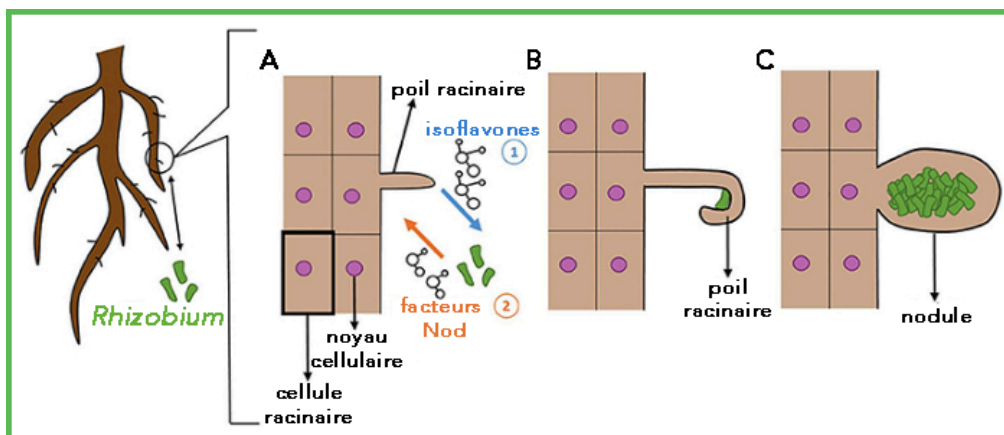


Figure 2. Effets des interactions plante-*Rhizobium* sur la structure de la racine. (A) Structure racinaire normale et début de la communication chimique. Tout d'abord, la plante

Rhizobium communique avec un groupe spécifique de plantes, appelées légumineuses et dont font partie les haricots et les pois. Mais comment fonctionne ce dialogue ? Tout d'abord, la plante libère des molécules appelées isoflavones dans la rhizosphère, qui attirent le *Rhizobium*. Les bactéries détectent ces molécules et se dirigent vers les plantes qui les émettent. Au cours de son déplacement vers la plante, le *Rhizobium* commence à produire d'autres molécules, connues sous le nom de facteurs Nod (pour facteurs de nodulation), qui provoquent la déformation de la racine de la plante et la formation de structures, sortes de bosses bien visibles, appelées nodules racinaires. Ces nodules accueillent les bactéries *Rhizobium*. En échange d'un lieu de vie et de nourriture (sucre) fournis par la plante, le *Rhizobium* procure à la plante beaucoup de NH_3 (Figure 2). En conséquence, les plantes qui permettent à *Rhizobium* de vivre avec elles poussent beaucoup mieux. Pour la plante et le *Rhizobium*, vivre ensemble est un avantage, car les deux organismes

produit des isoflavones (1), puis *Rhizobium* répond en produisant des facteurs de nodulation (2). (B) Le *Rhizobium* va vers la racine et se colle à un poil racinaire, qui change ensuite de forme pour enserrer les bactéries afin qu'elles puissent rentrer dans la racine. (C) Formation du nodule racinaire, qui est l'espace où les bactéries se multiplient et où le sucre et l'azote sont échangés.

ont plus de nourriture à manger que lorsqu'ils vivent seuls, et donc ils peuvent mieux se développer [2]. On dit qu'ils ont une relation symbiotique.



ÉCOSYSTÈME. Un écosystème est constitué de la communauté d'organismes vivant dans une certaine zone, et des composants non-vivants de leur environnement (climat, paysage).

FACTEUR BIOTIQUE. Composant vivant d'un écosystème, comme les plantes, les animaux et les microbes.

FACTEUR ABIOTIQUE. Composant non vivant d'un écosystème, comme les roches, la lumière du soleil et l'eau.

Les microbes peuvent aider à protéger les plantes contre les agents pathogènes et les ravageurs de cultures

Dans un **écosystème**, on appelle **facteurs biotiques** les êtres vivants de cet environnement, comme les plantes, les animaux et les microbes (Figure 3). Le stress biotique est un stress ressenti par un organisme, comme une plante endommagée par des facteurs biotiques tels que des microbes responsables de maladies, appelés agents pathogènes, ou des insectes nuisibles, appelés ravageurs de cultures. Les microbes bénéfiques, eux, peuvent aider les plantes à lutter contre les agents pathogènes et les ravageurs de deux manières. Tout d'abord, les microbes peuvent repousser l'ennemi ou le tuer. Par exemple, certains microbes produisent des COV qui arrêtent la croissance d'un agent pathogène ou l'attaque d'un ravageur sur la plante. La deuxième façon dont les bons microbes peuvent aider les plantes à combattre les agents pathogènes est de préparer la plante à se battre en augmentant ses défenses. Tes parents te conseillent peut-être, pendant l'hiver, de

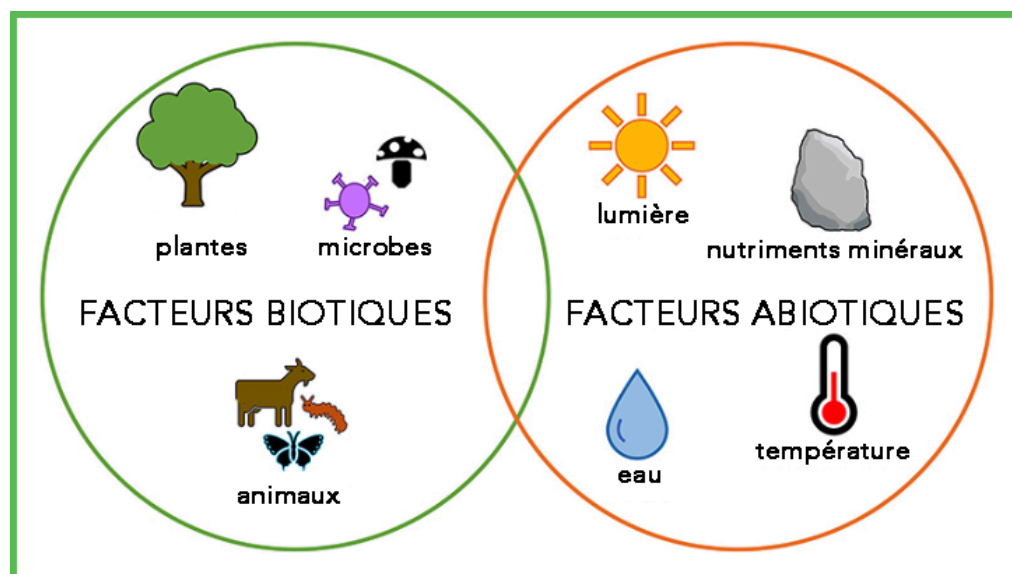
manger des oranges parce qu'elles contiennent une molécule importante, la vitamine C, qui est capable d'augmenter tes défenses immunitaires et ainsi mieux te protéger contre les maladies. C'est un peu le même mécanisme pour les microbes et les plantes ! Par exemple, des molécules produites par la bactérie *Pseudomonas fluorescens* permettent aux plantes de mieux résister à l'attaque de pathogènes [3].

Les microbes peuvent aider les plantes à survivre dans des environnements difficiles

Dans un écosystème, on appelle **facteurs abiotiques** ce qui n'est pas d'origine biotique (vivante), comme par exemple la lumière du soleil, la température ou l'eau (Figure 3). Le stress abiotique est l'effet négatif de tels facteurs sur un organisme vivant. Des exemples de stress abiotiques qui affaiblissent les plantes sont la faible disponibilité en eau et les niveaux élevés de sel. Les bons microbes peuvent aider les plantes à vivre dans ces environnements difficiles pour leur survie. Par exemple, la bactérie *Pseudomonas chlororaphis* O6 permet à certaines plantes de survivre lorsqu'il n'y a pas assez d'eau [4]. D'autres microbes, comme la bactérie *Bacillus subtilis*, aident les plantes à survivre dans un sol à forte

Figure 3. Principaux facteurs biotiques et abiotiques d'un environnement terrestre. Ces facteurs ont un impact sur la croissance des plantes et peuvent influencer la communication chimique entre les plantes et les microbes dans le sol. L'icône du champignon vient de Flaticon.com.

concentration de sel, en réduisant la quantité de sel qui pénètre dans les racines de la plante [5].



POURQUOI EST-CE IMPORTANT DE COMPRENDRE LA COMMUNICATION CHIMIQUE ?

La communication chimique entre les microbes et d'autres organismes évolue depuis des millions d'années. Il y a quatre cent cinquante millions d'années, les plantes, aquatiques jusque là, ont commencé à coloniser le milieu terrestre. Les scientifiques pensent que les champignons du sol ont aidé les plantes dans ce changement de milieu de vie, en particulier pour l'utilisation de nutriments essentiels à leur survie dans ce nouveau milieu [6]. Ainsi, pendant des millions d'années, la communication chimique entre les organismes du sol a été importante pour le bien-être et la croissance des plantes. Dans cet article, nous avons expliqué comment les interactions entre les plantes et les microbes peuvent donner aux plantes plus de certains nutriments, comme l'azote, ou les aider à lutter contre les agents pathogènes ou à vivre dans des conditions difficiles. Malheureusement, ces interactions sont en danger ! L'utilisation élevée d'antibiotiques, de pesticides et d'engrais dans l'agriculture peut modifier le sol et, ainsi modifier la communauté des êtres vivants de ce sol, entraînant la mort de certains organismes et en augmentant la croissance d'autres. Les changements dans la communauté microbienne peuvent avoir des effets catastrophiques sur les plantes ; par exemple, les nouveaux microbes qui se développent pourraient être des agents pathogènes !

La population humaine continue de croître ; il faut la nourrir et nourrir aussi les animaux qu'elle élève ; pour cela, de nouvelles méthodes doivent être trouvées qui permettent d'améliorer la croissance des plantes et d'augmenter la production alimentaire [2]. Les microbes sont de plus en plus utilisés dans ce but, comme aides naturelles. L'étude de la communication entre microbes et plantes est nécessaire pour comprendre quels microbes peuvent être utilisés pour aider les plantes à pousser. Nous devons faire très attention à choisir les bons microbes ! Par exemple, tu pourrais penser que l'utilisation du champignon *Fusarium culmorum* est une bonne idée, car il aide certaines plantes à pousser dans des zones difficiles riches en sel. Mais *Fusarium culmorum* est

néfaste pour le maïs – c'est un agent pathogène ! Pour ces raisons, les chercheurs veulent comprendre autant que possible la communication chimique, accroître nos connaissances sur les écosystèmes du sol, comprendre comment les organismes interagissent dans ces écosystèmes et nous aider à utiliser les interactions plantes-microbes pour améliorer la croissance des plantes alimentaires tout en protégeant les écosystèmes du sol.

RÉFÉRENCES

1. Van Dam, N. M., Weinhold, A., and Garbeva, P. 2016. Calling in the dark: the role of volatiles for communication in the rhizosphere. *ISME J.* 12:1252–62. doi: 10.1007/978-3-319-33498-1_8
2. Tomer, S., Suyal, D. C., and Goel, R. 2016. "Biofertilizers: a timely approach for sustainable agriculture," in *Plant-Microbe Interaction: An Approach to Sustainable Agriculture*, eds D. Choudhary, A. Varma, and N. Tuteja (Singapore: Springer). p. 375–95. doi: 10.1007/978-981-10-2854-0_17
3. Van Wees, S. C. M., Van der Ent, S., and Pieterse, C. M. J. 2008. Plant immune responses triggered by beneficial microbes. *Curr. Opin. Plant Biol.* 11:443–8. doi: 10.1016/j.pbi.2008.05.005
4. Garbeva, P., and Weiskopf, L. 2020. Airborne medicine: bacterial volatiles and their influence on plant health. *New Phytol.* 226:32–43. doi: 10.1111/nph.16282
5. Zhang H, Kim MS, Sun Y, Dowd SE, Shi H, Paré PW. Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. *Mol Plant-Microbe Interact* 2008b; 21:737 – 744. doi: 10.1094/MPMI-21-6-0737
6. Field, K. J., Pressel, S., Duckett, J. G., Rimington, W. R., and Bidartondo, M. I. 2015. Symbiotic options for the conquest of land. *Trends Ecol. Evol.* 30:477–86. doi: 10.1016/j.tree.2015.05.007

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par *Frontiers for Young Minds* (doi: 10.3389/frym.2020.547590 ; Ariotti C, Giuliano E, Garbeva P and Vigani G (2020) The Fascinating World of Belowground Communication. *Front. Young Minds* 8:547590).

TRADUCTION : Jean-Marie Clément, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

MENTOR SCIENTIFIQUE : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

JEUNES EXAMINATEURS :

Louise et Pierre sont élèves au Collège International Eridan à Montpellier. C'est dans ce cadre qu'ils ont assumé leur rôle de jeunes éditeurs.

LOUISE, 12 ANS

Je m'appelle Louise, j'ai 12 ans. J'aime bien l'équitation, les animaux et la nature. J'aime voyager dans le monde et de découvrir des nouvelles cultures. Je suis bilingue en anglais et je parle un petit peu en espagnol.



J'ai beaucoup aimé de participer à ce projet, il m'a donné plus de confiance en soi ! Un grand merci pour tous les intervenants !

PIERRE, 13 ANS

Bonjour ! Je m'appelle Pierre et j'ai 13 ans. Je suis ravi de la venue des chercheurs de l'association « Jeunes Francophones et la Science » qui nous ont présenté le travail de l'édition scientifique et d'y avoir participé !

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 31 mars 2020 ; ACCEPTÉ le 1^{er} septembre 2020 ;
PUBLIÉ EN LIGNE le 20 octobre 2020.

ÉDITEUR : Rémy Beugnon, German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv), Allemagne

CITATION : Ariotti C, Giuliano E, Garbeva P and Vigani G (2020) The Fascinating World of Belowground Communication. Front. Young Minds 8:547590. doi: 10. 3389/frym.2020.547590

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT.

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2020 Ariotti, Giuliano, Garbeva et Vigani.

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNE EXAMINATEUR

SHASHIPREETHAM, 13 ANS

Bonjour, je m'appelle Shashi et je vais à l'école Penglais. J'aime jouer au football et au basketball. Mes matières préférées sont les mathématiques et l'informatique. J'étudie actuellement en 8^{ème} année. Je suis quatre fois détenteur de record du monde Guinness dans un jeu appelé Rocket League et mon nom est dans l'édition 2018 du Guinness World Record Gamers Edition.

AUTEURS

CHRISTIANA ARIOTTI

J'ai récemment obtenu un diplôme en biologie environnementale de l'Université de Turin. Je suis maintenant doctorante à l'Université de Turin où j'étudie la communication entre les plantes et les microbes du sol poussant dans des conditions de carence en fer. Dans mon temps libre, j'aime escalader des montagnes (j'habite près des Alpes!) et chanter dans des chorales.

ELENA GIULIANO

J'ai récemment obtenu mon diplôme en biologie environnementale de l'Université de Turin. Je voudrais postuler pour un doctorat en sciences

végétales. Je m'intéresse aux interactions plantes-microbes et à la protection des plantes contre les stress biotique et abiotique. J'aime partager des connaissances et des idées avec des gens de différentes cultures et j'aime lire et prendre des photos pendant mon temps libre.

PAOLINA GARBEVA

Je suis chef de groupe au département d'écologie microbienne de NIOO à Wageningen. L'objectif de mes recherches actuelles est de comprendre les mécanismes fondamentaux des interactions chimiques et de la communication microbiennes.

GIANPIERO VIGANI

Je suis chercheur à l'Université de Turin (Italie). L'objectif de ma recherche est de comprendre comment les plantes absorbent les nutriments et l'eau du sol et comment les interactions plantes-microbes sous terre se produisent. *gianpiero.vigani@unito.it