

## LES BACTÉRIES CÂBLÉES OBTIENNENT DE L'ÉNERGIE GRÂCE À UN TRAVAIL D'ÉQUIPE !

Nicole M. J. Geerlings <sup>1,2\*</sup>, Jack J. Middelburg <sup>1</sup>, Lubos Polerecky <sup>1</sup> et Filip J. R. Meysman <sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Géosciences, Université d'Utrecht, Utrecht, Pays-Bas

<sup>2</sup>Division d'Écologie microbienne, Centre de Microbiologie et des Sciences de l'environnement, Faculté des Sciences du Vivant, Université de Vienne, Vienne, Autriche

<sup>3</sup>Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université d'Anvers, Anvers, Belgique

<sup>4</sup>Département de Biotechnologie, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Technologie de Delft, Delft, Pays-Bas

**MÉTABOLISME.** Tous les processus chimiques nécessaires à un organisme pour rester en vie, dont la conversion d'aliments en énergie essentielle pour les fonctions cellulaires.

Les bactéries câblées sont très différentes de la plupart des autres bactéries. Elles forment des structures pluricellulaires, filaments de dizaines de milliers de cellules connectées par une fibre pouvant atteindre plusieurs centimètres. Ce qui les rend si particulières, c'est la façon dont elles obtiennent l'énergie dont elles ont besoin pour se développer : elles travaillent ensemble pour produire de l'électricité ! Dans cet article, nous décrivons ces bactéries fascinantes et les résultats de notre recherche récente qui montrent comment fonctionne ce travail d'équipe.

### NOUS TIRONS TOUS NOTRE ÉNERGIE D'ÉLECTRONS

Les animaux ont besoin de se nourrir et de respirer du di-oxygène (O<sub>2</sub>) pour maintenir l'activité de leur **métabolisme** et rester en vie. Dans ton corps, une partie des aliments que tu consommes est transformée en glucose, un sucre particulier qui fournit de l'énergie à tes cellules. Cette transformation énergétique a lieu à l'intérieur des cellules, grâce à des petites centrales électriques appelées mitochondries. Il y en a des millions de millions dans ton corps. Dans les mitochondries, les

**MOLÉCULE.** La plus petite unité d'une substance ayant toutes les propriétés de cette substance. Par exemple, toutes les molécules de glucose ont les mêmes propriétés.

**ÉLECTRON.** Particule élémentaire qui possède une charge électrique négative. C'est, avec les neutrons et les protons, un des composants d'un atome

**ÉLECTRICITÉ.** Forme d'énergie correspondant au mouvement d'électrons. Les électrons en se déplaçant, transportent leur énergie d'un endroit à un autre.

**SÉDIMENTS.** Matériel solide naturel déposé au fond des lacs et des océans.

**molécules** de glucose libèrent des **électrons** qui finissent par être transférés à des molécules d'oxygène. Ce processus te fournit l'énergie dont tu as besoin pour respirer, réfléchir, courir, sauter et faire toutes les activités que tu aimes.

À l'intérieur de toutes les cellules vivantes, les électrons sont transférés d'une molécule qui donne des électrons (comme le glucose) à une autre molécule qui en reçoit (comme le di-oxygène). L'**électricité** correspondant à un mouvement d'électrons, on pourrait dire que les cellules produisent de l'électricité (**Figure 1**). Mais, dans la majorité des cellules, ce mouvement d'électron se fait à une toute petite échelle, moins d'un milliardième de millimètre.

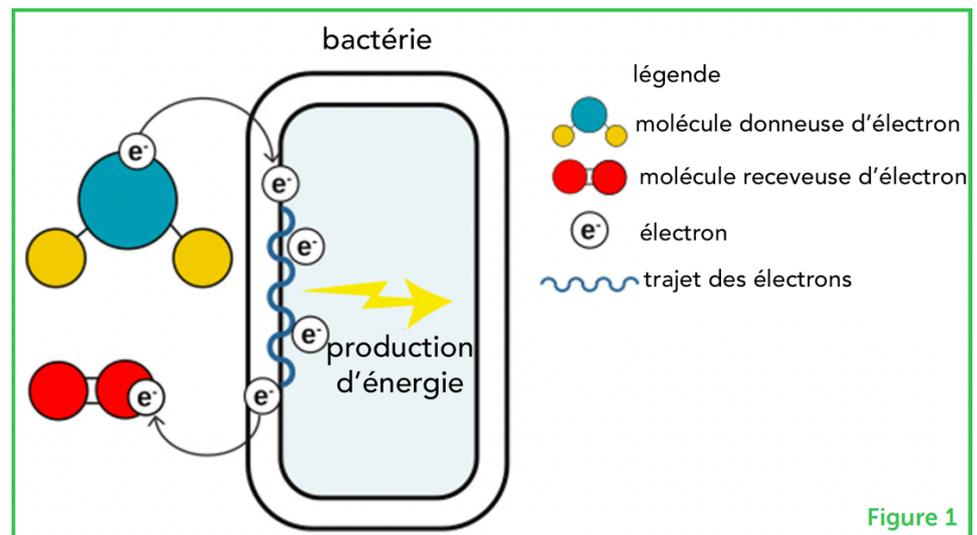


Figure 1

**Figure 1.** Dans la plupart des cellules, les électrons sont récupérés d'une molécule donneuse d'électrons, transportés dans la cellule, de molécule à molécule, sur une très faible distance puis finalement transmis à une molécule « finale ». C'est ainsi que chaque cellule produit l'énergie dont elle a besoin.

Les biologistes ont longtemps pensé que chaque cellule vivante se chargeait de subvenir à ses propres besoins énergétiques. Ils pensaient également que les électrons ne pouvaient parcourir que de très faibles distances dans les cellules [1]. Ces idées ont été remises en question en 2012, avec la découverte des bactéries câblées et de leur étrange métabolisme.

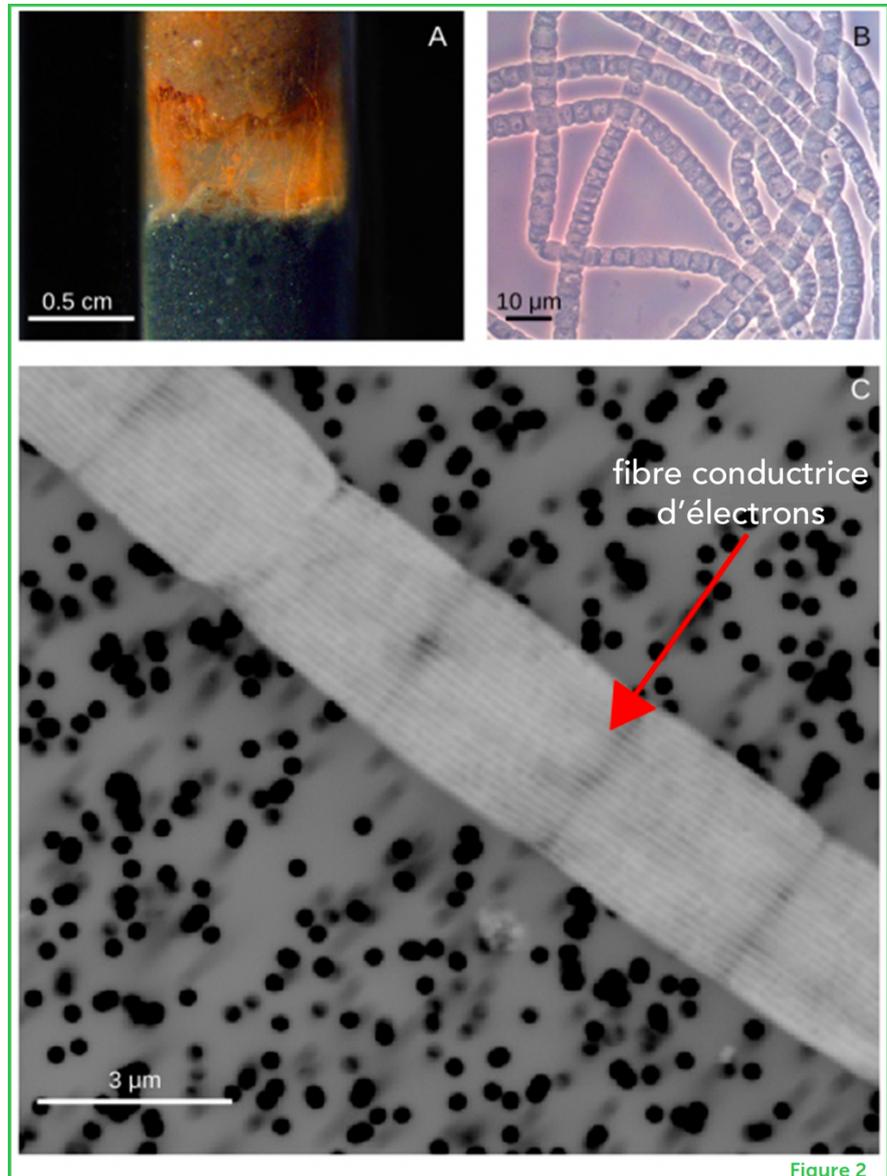
### QUI SONT LES BACTÉRIES CÂBLÉES ?

Les bactéries vivent partout sur Terre, dans l'air, les sols, les rivières, les lacs, les océans, le plancher océanique et même à l'intérieur et à la surface des êtres vivants, dont les humains. Les bactéries câblées sont des organismes uniques qui vivent dans les **sédiments** au fond des lacs et des océans. Elles sont différentes des autres bactéries de trois façons :

**Les bactéries câblées forment des filaments pluricellulaires très longs**  
Alors que les bactéries sont des organismes généralement constitués d'une seule cellule, les bactéries câblées forment de longues chaînes

**FILAMENT.** Longue chaîne de cellules attachées les unes aux autres formant ainsi une structure pluricellulaire.

appelées **filaments**, constituées de plusieurs milliers de cellules connectées les unes aux autres et travaillant ensemble. De ce point de vue, elles sont pluricellulaires. Un filament de bactéries câblées peut atteindre plusieurs centimètres de long, ce qui est énorme pour une structure bactérienne. Mais la largeur d'un filament correspond à celle d'une bactérie, entre 1 et 5  $\mu\text{m}$  ( $\mu\text{m}$  : micromètre soit mille fois plus petit qu'un millimètre) ; il est donc nécessaire d'utiliser un microscope pour voir ces filaments (**Figures 2A–C**).



**Figure 2.** (A) Faisceaux de filaments de bactéries câblées prélevés dans des sédiments. (B) Image prise au microscope optique montrant un faisceau de filaments de bactéries câblées, séparés les uns des autres. (C) Image prise au microscope électronique montrant les fibres conductrices d'électrons (flèche rouge) dans un filament de bactéries câblées. Crédit images : Nils Risgaard-Petersen et Lars Peter Nielsen (A) et Silvia Hildalgo-Martinez (B).

### Les bactéries câblées transportent des électrons sur de longues distances

Lorsque nous utilisons un microscope optique, comme celui dont tu disposes peut-être pour tes études, les bactéries câblées ressemblent à

## MICROSCOPE

**ÉLECTRONIQUE.** Un microscope qui utilise un faisceau d'électrons pour observer de très petits objets.

**RÉSOLUTION.** En microscopie, le terme résolution décrit la capacité d'un microscope pour agrandir et observer les détails d'un objet.

\* **Note de la traductrice :** Les fibres des bactéries câblées sont composées d'un cœur de protéines conductrices d'électrons entouré d'une coque de protéines isolantes ([10.1073/pnas.1916244117](https://doi.org/10.1073/pnas.1916244117)).

## SULFURE D'HYDROGÈNE.

Molécule riche en énergie utilisée comme source d'énergie par les bactéries câblées. Le sulfure d'hydrogène peut transmettre ses électrons aux fibres conductrices

un câble (**Figure 2B**). Mais si on utilise un **microscope électronique**, qui a une bien meilleure **résolution**, on peut observer des fibres parallèles les unes aux autres s'étirant le long de chaque filament et connectant les bactéries les unes aux autres (**Figure 2C**) [1, 2]. Ces fibres servent de fil électrique, transportant des électrons entre les cellules du filament [3]. Comme les filaments de bactéries câblées peuvent faire plusieurs centimètres de long, ces bactéries sont donc capables de transporter des électrons sur une distance qui fait plus de 10 millions de fois celle d'une bactérie [2]. Ce sont les championnes du monde microbien pour le transport d'électrons ! Nous avons su plus tard\* de quoi sont faites les fibres transporteuses d'électrons. Mais nous avons bien réalisé que ces fibres transportent des électrons de façon très rapide et très efficace, comme un fil de cuivre. Ces propriétés ont attiré l'attention des scientifiques et les bactéries câblées sont désormais l'objet de nombreuses études. Qui sait ? dans le futur, nous pourrions utiliser les bactéries câblées pour fabriquer des appareils électroniques respectueux de l'environnement [3].

### Les bactéries câblées travaillent en équipe

Chez la plupart des êtres vivants, le transport d'électrons s'effectue dans une seule cellule et non à travers plusieurs cellules. De cette façon, chaque cellule est responsable de produire l'énergie dont elle a besoin pour survivre et se développer, même chez les organismes pluricellulaires. Quelle surprise pour les biologistes de réaliser que les bactéries câblées doivent travailler en équipe pour produire leur énergie ! Comme nous, les bactéries câblées ont besoin de di-oxygène. Par contre, elles ne consomment pas les mêmes aliments. Plutôt que d'utiliser du glucose comme source d'énergie, elles utilisent une molécule appelée **sulfure d'hydrogène**. Dans les sédiments où vivent ces bactéries, le sulfure d'hydrogène et le di-oxygène ne sont pas localisés au même endroit. Le sulfure d'hydrogène est enfoui dans le sédiment loin du di-oxygène qui n'est présent qu'à la surface du sédiment (quelques centimètres). Les bactéries câblées récupèrent des électrons du sulfure d'hydrogène. Ces électrons sont transférés aux fibres conductrices qui les mènent jusqu'aux cellules bactériennes au contact du di-oxygène, à la surface du sédiment. Dans ces cellules, les électrons sont transférés au di-oxygène (**Figure 3**).

### UN MODE DE PRODUCTION D'ÉNERGIE UNIQUE

La particularité des bactéries câblées est que les cellules d'un filament sont obligées de travailler en équipe pour produire l'énergie dont elles ont besoin [2]. Un tel travail d'équipe d'« électriciens » n'a jamais été observé auparavant, même chez des organisme pluricellulaires. Il donne un avantage aux bactéries câblées car il leur permet de vivre dans un environnement où les ressources sont éloignées dans l'espace [1, 2]. Les bactéries câblées peuvent ainsi occuper de nombreux habitats sur Terre,

et, lorsqu'elles sont présentes, elles y sont en très grande quantité. Il peut y avoir jusqu'à 20 000 km de filaments de bactéries câblées par mètre carré de sédiment [1]. Mais, même si les bactéries d'un filament travaillent en équipe, l'énergie produite n'est pas répartie entre elles de façon égale. De manière surprenante, seules les cellules qui captent les électrons du sulfure d'hydrogène peuvent croître, alors que les cellules qui transfèrent les électrons au di-oxygène ne le peuvent pas. L'essentiel de l'énergie est produit lorsque les électrons sont captés du sulfure d'hydrogène. Lorsque les électrons sont transférés au di-oxygène, ils ont perdu beaucoup de leur énergie (Figure 3).

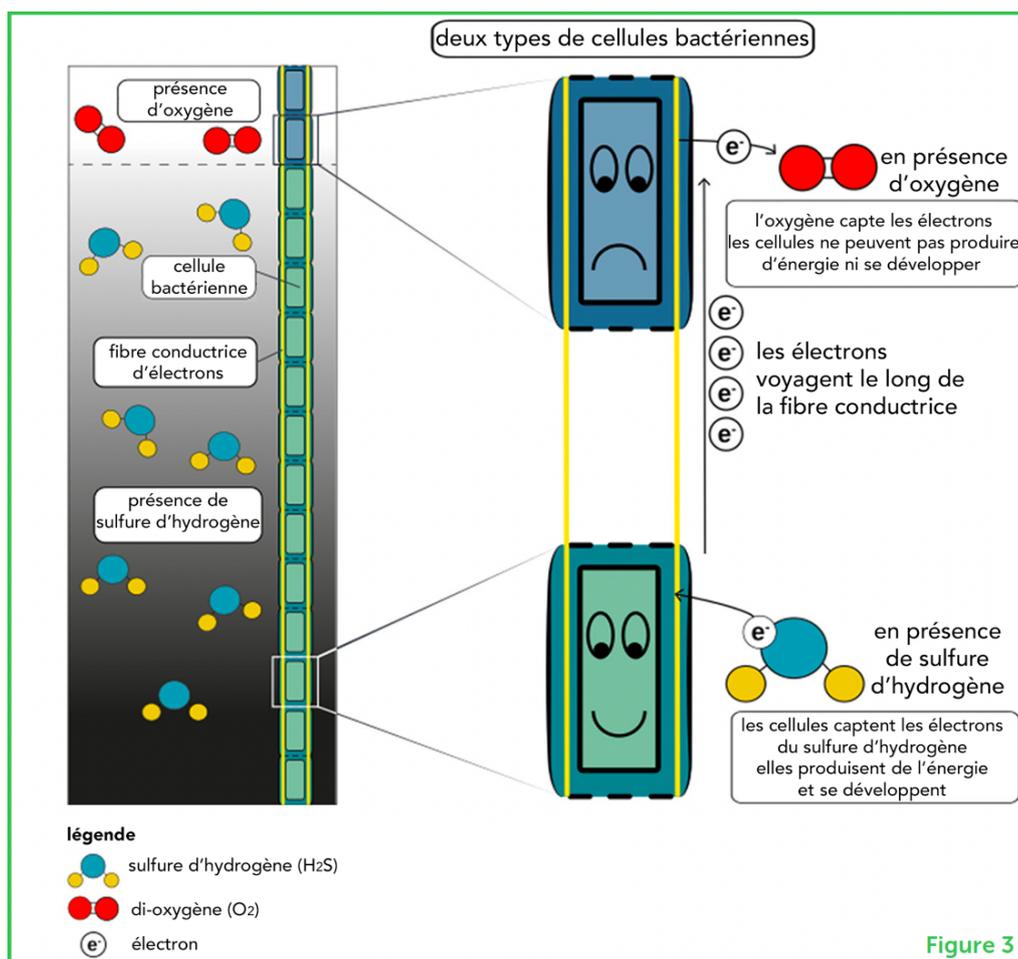


Figure 3

**Figure 3.** Les filaments de bactéries câblées sont positionnés dans le sédiment de telle façon que 90% des cellules ont accès au sulfure d'hydrogène. Ces cellules captent les électrons du sulfure d'hydrogène et les transfèrent à une fibre conductrice. Les cellules restantes ont accès au di-oxygène et lui transmettent les électrons. Ainsi les bactéries travaillent en équipe pour obtenir de l'énergie. Mais l'énergie produite n'est pas répartie de façon égale parmi les cellules : celles qui transfèrent les électrons au di-oxygène n'ont pas assez d'énergie pour croître. Bactéries et molécules –  $H_2S$  et  $O_2$  – ne sont pas représentées à l'échelle.

Des cellules qui ne peuvent pas produire suffisamment d'énergie finissent par mourir. Mais il faut toujours des cellules, en contact avec le di-oxygène, qui lui transfèrent des électrons, sinon les cellules du reste du filament ne pourront pas capter les électrons du sulfure d'hydrogène et, en conséquence, aucune cellule du filament n'aura d'énergie. La réaction avec le di-oxygène est indispensable pour que le filament

survive et croisse. L'activité des cellules qui utilisent le di-oxygène peut être considéré comme un service communautaire pour le filament.

### FUTURS AXES DE RECHERCHE

À l'heure actuelle, nous ignorons encore beaucoup de choses concernant les bactéries câblées. Les cellules qui utilisent le di-oxygène se sacrifient-elles pour la communauté ? En ne récupérant pas assez d'énergie, elles vont finir par mourir... Une autre possibilité, c'est que ces cellules ne restent que pour un temps limité au contact du di-oxygène et que d'autres bactéries du filament prennent la suite. Leur service communautaire ne serait que temporaire. Dans tous les cas, comme le concept de « travail d'équipe d'électriciens », le concept de « service communautaire » d'une structure pluricellulaire est une nouvelle découverte en biologie et demande la poursuite de travaux de recherches pour être mieux compris. Un jour peut-être, ce sera toi qui feras une découverte excitante en étudiant les bactéries câblées ou trouveras comment les utiliser pour fabriquer des appareils électroniques respectueux de l'environnement !

### REMERCIEMENTS

NG a bénéficié du soutien de l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique (NWO PhD grant 023.005.049). JM a bénéficié d'un soutien du Ministère de l'Éducation par l'intermédiaire du Centre Néerlandais des Sciences de la Terre. La plateforme NanoSIMS a été en partie financée par un grand projet d'investissement de l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique attribué à JM (175.010.2009.011). FM a bénéficié des soutiens financiers de l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique (VICI grant 016.VICI.170.072), de la Fondation Flanders pour la Recherche (FWO grant G038819N) et de l'Université d'Anvers (TopBOF program).

### ARTICLE SOURCE

Geerlings, N. M. J., Karman, C., Trashin, S., As, K. S., Kienhuis, M. V. M., Hidalgo-Martinez, S., et al. 2020. Division of labor and growth during electrical cooperation in multicellular cable bacteria. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 117:5478–85. doi: 10.1073/pnas.1916244117

### RÉFÉRENCES

1. Meysman, F. J. R. 2018. Cable bacteria take a new breath using long-distance electricity. *Trends Microbiol.* 26:411–22. doi: 10.1016/j.tim.2017.10.011
2. Pfeffer, C., Larsen, S., Song, J., Dong, M., Besenbacher, F., Meyer, R. L., et al. 2012. Filamentous bacteria transport electrons over centimeter distances. *Nature* 491:218–21. doi: 10.1038/nature11586
3. Meysman, F. J. R., Cornelissen, R., Trashin, S., Bonn , R., Martinez, S. H., van der Veen, J., et al. 2019. A highly conductive fiber network

enables centimeter-scale electron transport in multicellular cable bacteria. Nat. Commun. 10:1–8. doi: 10.1038/s41467-019-12115-7

## 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.2023.978226 ; Geerlings NMJ, Middelburg JJ, Polerecky L and Meysman FJR (2023) Cable Bacteria Get Energy Through Electrical Teamwork. Front. Young Minds 11:978226).

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

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

**MENTOR SCIENTIFIQUE :** Myriam Houmey, Association Jeunes Francophones et la Science

## JEUNE ÉDITEUR :

### YANIS, 17 ANS

Depuis ma tendre jeunesse, je me suis passionné pour toutes les formes de vie, à l'échelle macroscopique ou microscopique, rêvant de pouvoir créer mon propre recueil de microbes et de plantes. Même si cela n'a pas été possible, cela n'a pas diminué ma curiosité à vouloir toujours plus comprendre le monde qui m'entoure et ses bizarreries !

## ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

**SOU MIS** le 29 Janvier 2023 **ACCEPTÉ** le 13 Novembre 2023

**PUBLIÉ EN LIGNE** le 6 Décembre 2023.

**ÉDITEUR :** David Hiller, Yale University, United States

**MENTORS SCIENTIFIQUES:** Hadas Nahman-Averbuch et Jannell V. Bazarro

**CITATION :** Geerlings NMJ, Middelburg JJ, Polerecky L and Meysman FJR (2023) Cable Bacteria Get Energy Through Electrical Teamwork. Front. Young Minds 11:978226. doi: 10.3389/frym.2023.978226

## 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 © 2023 Geerlings, Middelburg, Polerecky and Meysman. 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.

## JEUNES ÉVALUATEURS

### DANIEL, 9 ANS

J'aime lire de longs livres à chapitres comme Harry Potter (pour l'instant, j'en suis au cinquième). J'aime les chiens et j'aimerais visiter Paris, Rome, Amsterdam, Venise et Manchester (j'aimerais visiter Manchester parce que Manchester United y joue et que c'est mon équipe préférée dans la première ligue de football).

### LIOR, 9 ANS

J'aime Harry Potter et j'ai terminé la série.

### SORA, 8 ANS

J'adore jouer au football américain, le regarder jouer ! Tout le football américain en l'occurrence ! J'ai vu les meilleurs moments de tous les matchs de football des Bulldogs depuis que je suis en vie. J'aime aussi faire du vélo, pratiquer la plupart des sports et jouer aux jeux vidéo. Mon jeu préféré est Zelda. Une fois, je suis allée au parc national de Yellowstone. C'était très beau et j'ai pu voir des bisons, des ours et un loup qui essayait de chasser des bisons ! Mon fast-food préféré est McDonalds !

## AUTEURS

### NICOLE M. J. GEERLINGS

Nicole Geerlings travaille actuellement comme post-doctorante à la division d'écologie microbienne (DoME) de l'Université de Vienne. Elle a travaillé comme doctorante à l'Université d'Utrecht, où elle a étudié la manière dont les bactéries câblées fonctionnent ensemble, et a également travaillé comme professeur de chimie dans une école secondaire. Elle s'intéresse beaucoup à la manière dont les bactéries travaillent ensemble et utilise des méthodes permettant de visualiser des cellules individuelles et leur activité. Outre la recherche, elle aime la nature, l'escalade et la lecture. \*nicole.geerlings@univie.ac.at

### JACK J. MIDDELBURG

Jack Middelburg est professeur de Sciences de la Terre à l'Université d'Utrecht, aux Pays-Bas. Il travaille aux interfaces de la chimie, de la géologie, de l'écologie, de la microbiologie, de la limnologie et de l'océanographie. Ses recherches sont guidées par la curiosité, ce qui signifie qu'il alterne les sujets en fonction de sa passion du moment. Il cherche à comprendre le fonctionnement des systèmes naturels et ses recherches couvrent des échelles spatiales et temporelles allant des observations micrométriques sur les communautés microbiennes au cycle mondial du carbone, des petits cours d'eau aux grands fonds marins, et des écosystèmes polaires aux écosystèmes tropicaux. Jack a

deux fils (vrais jumeaux) et deux adorables petits-fils. Il donne un cours de chimie pour les Sciences de la Terre en première année et un cours de maîtrise sur les cycles biogéochimiques.

### **LUBOS POLERECKY**

Lubos Polerecky est professeur adjoint à l'Université d'Utrecht, où il dirige la plateforme NanoSIMS. Il développe et applique des méthodes micro-analytiques pour étudier l'activité des microbes. Son objectif principal est de contribuer à la compréhension de la manière dont les microbes interagissent avec leur environnement et influencent le cycle des éléments sur Terre par des processus tels que la fixation photosynthétique et chimiosynthétique du carbone, la fixation de l'azote, la méthanotrophie, la dégradation de la matière organique, la dégradation des matières plastiques ou l'oxydation du fer. L'étude de l'assimilation du carbone et de l'azote par les bactéries câblées au niveau des cellules individuelles et des filaments est un exemple de ses projets de recherche.

### **FILIP J. R. MEYSMAN**

Filip Meysman est professeur au Département de Biologie de l'Université d'Anvers, où il dirige l'équipe de recherche GeoBiology et le centre d'excellence sur la technologie des systèmes microbiens. Son équipe de recherche est curieuse de savoir ce qui se passe dans les écosystèmes des fonds marins. C'est d'ailleurs ainsi qu'il a découvert la technologie des systèmes microbiens. C'est également dans ce cadre qu'il a rencontré pour la première fois les fascinantes bactéries câblées qui produisent de l'électricité à longue distance. En étudiant des sédiments malodorants et nauséabonds dans la mer du Nord, son équipe a observé de minuscules fils de quelques centimètres de long qui conduisaient des courants électriques à travers le plancher océanique. Cette découverte intrigante a changé sa carrière et l'a poussé à entreprendre un voyage scientifique pour découvrir comment fonctionne cette vie électrique incroyable. Au cours des dernières années, ces recherches ont permis d'acquérir une série de connaissances extraordinaires sur ces bactéries ([www.microbial-electricity.eu](http://www.microbial-electricity.eu)). Les bactéries câblées ont vraiment découvert les avantages de l'électricité bien avant Alessandro Volta !  
\*filip.meysman@uantwerpen.be