

# Altération microbienne des minéraux

*Au croisement de plusieurs disciplines, la géomicrobiologie est une science jeune, mais essentielle pour l'environnement tant sur le plan de la recherche fondamentale, que sur un plan économique et social. Elle devrait constituer à l'avenir un outil solide en matière de gestion des sols et de qualité de l'eau.*

**Stéphane Uroz\*, Christophe Calvaruso\*\*, Marie-Pierre Turpault\*\*, Pascale Frey-Klett\***

L'étude des interactions entre les micro-organismes et les minéraux, ou géomicrobiologie, est une science récente, issue du dialogue entre les chercheurs de différents domaines, tels la microbiologie, l'écologie, la géologie, la géochimie, la minéralogie et l'hydrobiologie. Cette discipline résulte de la découverte récente de micro-organismes capables non seulement de coloniser les environnements les plus extrêmes, jusque-là considérés comme inaccessibles, mais aussi d'agir sur les cycles des éléments notamment en altérant les minéraux à la surface de la Terre. L'altération microbienne des minéraux joue un rôle essentiel dans l'environnement car elle participe à la libération des éléments nutritifs clés contenus dans ces minéraux, tels que le calcium, le magnésium, le potassium, le phosphore et le fer, indispensables à la vie de ces micro-organismes, mais aussi à celle des plantes et des animaux. C'est pourquoi comprendre les interactions micro-organismes/minéral, tout comme les mécanismes moléculaires impliqués dans l'altération biologique des minéraux, s'avère essentiel, aussi bien d'un point de vue fondamental, que pour la gestion économique et sociale de notre environnement. En effet, les connaissances acquises en géomicrobiologie devraient permettre de relever des challenges tels que la gestion durable de la fertilité des sols, la réhabilitation des sols industriels et urbains, le stockage des gaz, des déchets miniers et radioactifs dans les sols, ainsi que la gestion de la qualité de l'eau. L'accès à la séquence génomique de certains des micro-organismes impliqués dans les cycles des éléments minéraux (nutriments ou éléments toxiques) constitue un outil de choix pour cette recherche des mécanismes de l'altération microbienne des minéraux.

## Pourquoi s'intéresser à l'altération des minéraux ?

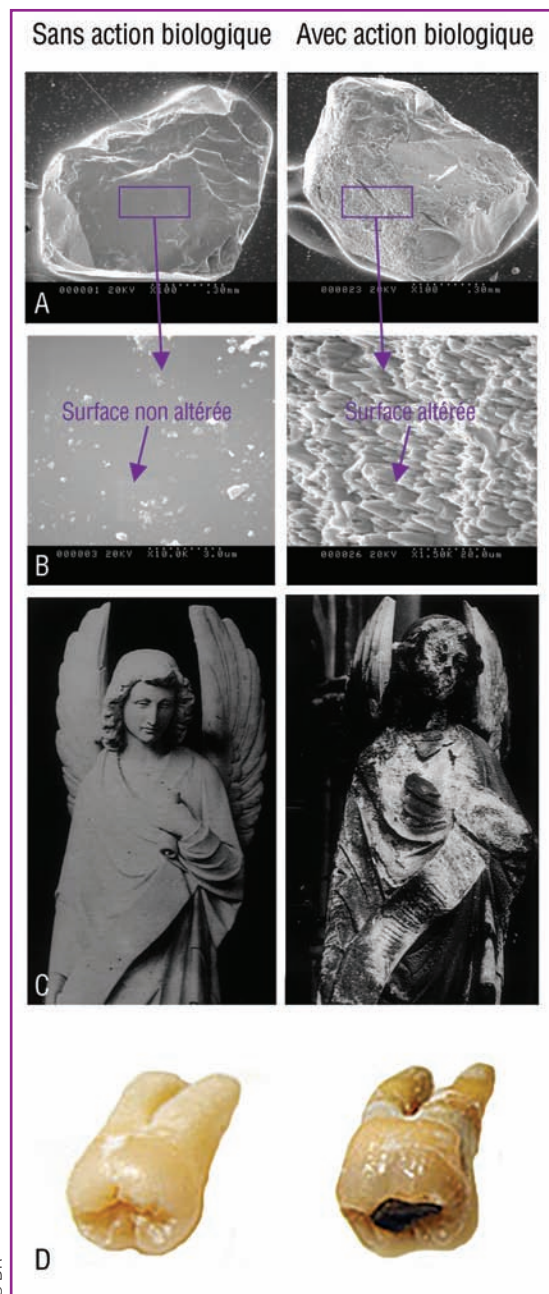
Les roches, notamment magmatiques et métamorphiques, ont été formées dans des conditions de hautes températures et de hautes pressions. Leur exposition aux conditions de surface, à l'eau de pluie, aux variations thermiques ainsi qu'à l'oxygène induit des réactions d'altération qui conduisent à la dissolution et à la cristallisation de nouveaux minéraux. Cette altération joue un rôle fondamental, car elle est à l'origine de la disponibilité des éléments minéraux bénéfiques ou toxiques pour les organismes vivants dans les milieux aquatiques ou terrestres. De plus, depuis des temps géologiques reculés, les minéraux de la Terre subissent un fractionnement important, d'origine géochimique et biologique, conduisant notamment à la formation des sédiments et des sols tels que nous les connaissons aujourd'hui. L'altération minérale et son impact considérable sur l'Homme et son environnement, n'est plus à démontrer, car elle influe sur l'évolution de nos paysages, la fertilité des sols ou encore sur la qualité de l'eau. Ce phénomène est aussi susceptible d'affecter notre intégrité physique ainsi que notre patrimoine architectural et artistique. En effet, les micro-organismes qui colonisent la surface de nos dents <sup>\*1</sup> sont capables d'altérer la structure de l'émail causant des dégâts parfois importants. Par ailleurs, les statues, les monuments et façades des bâtiments en pierre par exemple, sont eux aussi soumis à une forte altération d'origine microbienne (figure 1). Cependant, l'altération biologique des minéraux ne cause pas que des désagréments : elle a

\* Inra, Unité Mixte de Recherche « Interactions Arbres/Micro-organismes », 54280 Champenoux ; [uroz@nancy.inra.fr](mailto:uroz@nancy.inra.fr)

\*\* Inra, Unité de Recherche « Biogéochimie des Éco-systèmes Forestiers », 54280 Champenoux

\*1 Nos dents ainsi que nos os sont des minéraux d'origine biologique, composés d'hydroxyapatite.

aussi des applications industrielles. Certains micro-organismes sont notamment utilisés pour extraire des métaux ou des éléments toxiques présents dans des minerais pauvres ou des déchets miniers, comme dans le cas de la neutralisation des sulfures issus de la mine désaffectée de Matsuo au Japon. Ce processus est appelé bio-lixiviation. En conséquence, comprendre les mécanismes de l'altération nous permettra de mieux comprendre et gérer notre environnement, de trouver des moyens pour protéger notre patrimoine.



**Figure 1** Altération des minéraux : action des micro-organismes

Ces différents supports minéraux ont subi (partie droite) ou non (partie gauche) l'action du biologique. **A** et **B**) Observation au microscope électronique à balayage de cristaux d'apatite ayant séjourné ou non, quatre années dans la rhizosphère de hêtres de 80 ans (© Turpault, Inra). **C**) Statue détériorée ou non par l'action du biologique (d'après *International Biodeterioration & Biodegradation* 46 Th. Warscheida, J. Braamsb, *Biodeterioration of stone: a review* (2000) 343-368, © Elsevier) ; et **D**) dent saine ou cariée (© M.B. Ecole-plus.com).

## Des organismes et des environnements variés

Une grande diversité d'organismes est capable de coloniser et d'altérer des surfaces minérales de nature variée et dans différents environnements, allant de la cavité buccale à la surface des roches et au sol.

La cavité buccale est un exemple méconnu d'écosystème dans lequel l'altération minérale a son importance. Elle peut être considérée comme un environnement extrême du fait de la forte acidité qui la caractérise. Les dents constituent un support stable sur lequel les bactéries vont pouvoir se fixer et se multiplier. Elles sont susceptibles d'y former des biofilms, véritables matrices complexes formées de polysaccharides dans lesquels cohabitent diverses bactéries et champignons. Ces bactéries utilisent les sucres que nous consommons et produisent en retour des acides tels que l'acide lactique. Leur action conduit d'une part à la formation de la plaque dentaire (micro-environnement favorable à la survie des micro-organismes) et d'autre part à une décalcification localisée de la dent : la carie (figure 1). Les souches bactériennes fréquemment impliquées dans ce processus appartiennent aux genres *Streptococcus* et *Lactobacillus* (1).

Les lichens sont aussi capables de coloniser et d'altérer pendant des décennies la même surface minérale d'un rocher ou d'un monument. Ils sont classiquement décrits comme une symbiose entre un champignon et une algue photosynthétique. Le fonctionnement de cette symbiose implique des échanges de matières favorables aux deux partenaires. Les sucres produits par l'algue durant la photosynthèse alimentent le champignon en carbone. En retour, parallèlement aux processus d'altération physique comme la succession de phases de gel-dégel ou l'action répétée des gouttes de pluie, les hyphes du champignon, qui explorent l'environnement proche du lichen et pénètrent dans les fissures des roches, produisent des molécules organiques comme l'acide oxalique et libèrent ainsi les éléments minéraux nécessaires à la croissance du lichen. Les observations au microscope électronique à transmission montrent une interaction fine de contact du lichen avec la surface minérale, via une sorte de ciment naturel contenant des polysaccharides, des argiles et des oxydes de différents éléments chimiques en phase d'être assimilés. Dans les zones inaccessibles, car de porosité trop faible, le lichen est également capable de mobiliser les éléments minéraux à distance via l'action d'acides organiques excrétés (2).

Le sol, et tout particulièrement l'environnement proche de la racine des plantes, appelé rhizosphère ou mycorrhizosphère\*, sont tous deux conditionnés par l'altération microbienne des minéraux. Tandis que certains micro-organismes telluriques vivent dans la solution du sol, d'autres colonisent la surface des minéraux (figure 2), dont ils peuvent affecter la structure. Par ailleurs, grâce aux sucres, acides organiques et acides aminés qu'elle produit au niveau de ses racines, la plante sélectionne et maintient une communauté microbienne rhizosphérique mixte, fongique et bactérienne, très active qui se multiplie, explore le sol environnant et mobilise des éléments nutritifs tels que le fer, le calcium, le potassium et le phosphore, à partir des minéraux du sol. Il apparaît qu'un minéral s'altère visiblement plus lorsqu'il est situé dans une rhizosphère que lorsqu'il est localisé dans un sol dépourvu de racines (figure 1). Cette altération ne peut néanmoins être imputée uniquement aux micro-

(1) Loesche WJ (1986) *Microbiol Rev* 50(4) 353-80  
(2) Banfield JF et al. (1999) *Proc Natl Acad Sci USA* 96(7) 3404-11

\*2 Selon que la racine est ou non associée à un champignon symbiotique mycorrhizien.

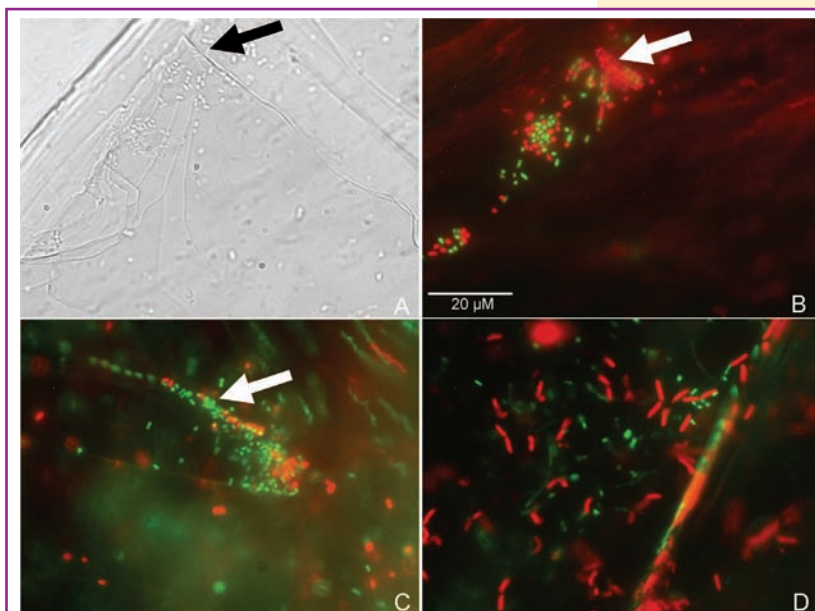
organismes qui colonisent cette niche. En effet, la plante joue aussi un rôle prépondérant dans l'altération biologique des minéraux dans la rhizosphère : la production de métabolites tels que les acides organiques ou les protons au niveau des racines, agit directement sur la cinétique d'altération des minéraux. Mais l'impact des bactéries n'est cependant pas négligeable. Il a été récemment montré que l'inoculation d'une souche bactérienne sélectionnée permet de multiplier par un facteur 1,4 à 1,5 l'altération d'un minéral de référence, la biotite, en comparaison avec l'effet d'une plante non inoculée (3).

### Une clé de la durabilité de nos écosystèmes forestiers ?

Comment expliquer que nos forêts poussent ? Question qui peut paraître étonnante en apparence, mais à laquelle la réponse n'est pas si simple. En effet, parmi les environnements terrestres, l'écosystème forestier est l'un de ceux qui ne subit généralement pas de fertilisation de la part de l'Homme, contrairement, par exemple, aux terres agricoles. D'où viennent les nutriments nécessaires à la croissance durable des écosystèmes forestiers ? Mis à part les apports liés aux pluies et aux retombées atmosphériques ainsi que le recyclage de la matière organique *via* la chute des feuilles et les racines mortes, les minéraux des sols constituent le seul réservoir en nutriments disponibles pour le fonctionnement de ces écosystèmes (figure 3). Mais comment s'opère cette altération minérale ? Il est important de rappeler ici que les forêts sont principalement situées sur des sols pauvres et souvent acides (4). Cette acidité a pour conséquence majeure pour les plantes de générer dans le sol de fortes concentrations en ions tels que les ions  $Al^{3+}$  et  $H^+$  qui inhibent la croissance racinaire. Dans les écosystèmes forestiers, les arbres se sont associés à des micro-organismes rhizosphériques (bactéries et champignons symbiotiques) avec lesquels ils coopèrent pour libérer les nutriments nécessaires à leur croissance (5, 6). Par exemple, il a été récemment montré que dans la rhizosphère de plants de chênes de 30 ans, et plus particulièrement au niveau des mycorhizes d'un champignon symbiotique ubiquiste dans nos forêts, *Scleroderma citrinum*, les proportions de bactéries capables de mobiliser le fer ou le phosphore à partir de réserves inorganiques, ainsi qu'à altérer un minéral de référence, la biotite, étaient significativement plus importantes au niveau de la mycorhize que dans le sol nu.

### Que sait-on de l'impact des micro-organismes ?

Les micro-organismes, et tout particulièrement les bactéries, sont remarquables dans leur diversité, qu'elle soit phylogénétique ou métabolique, et pour leur faculté à s'adapter et à coloniser les environnements les plus extrêmes que ne tolèrent pas les champignons. Comme décrit précédemment, les bactéries et les champignons sont capables de former des structures en biofilm que ce soit sur la surface des minéraux du sol, sur nos dents, sur des statues ou pierres de construction. Cette association permet aux micro-organismes de créer des micro-environnements plus favorables à leur survie, dans lesquels ils sont protégés contre les agressions extérieures.



**Figure 2** Colonisation microbienne de la surface des minéraux

Particules de biotite (phyllosilicate,  $K(Fe,Mg)_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$ ) observées au microscope à transmission en lumière polarisée (A) et en épifluorescence (B). Les bactéries (de l'ordre du  $\mu M$ ) apparaissent comme de petits bâtonnets colorés en rouge ou en vert. Cette coloration est due à l'utilisation d'un colorant (LIVE DEAD®) qui se fixe sur les acides nucléiques, colorant ainsi les cellules bactériennes. Les bactéries intactes sont colorées en vert, tandis que celles qui présentent une membrane endommagée apparaissent en rouge. Les bactéries colonisent souvent les arrêtes (symbolisée par une flèche blanche) des particules de biotite (C). Une diversité morphologique des bactéries présentes sur cette particule minérale est observée (D).

© UROZ, INRA

Dans ces environnements particuliers, les bactéries prélèvent les nutriments et l'énergie nécessaires à leur croissance à partir de la matrice minérale, *via* notamment de nombreuses réactions d'oxydation (perte d'électron) et de réduction (gain d'électron) ou par la production de molécules chélatrices (molécules présentant la capacité de fixer les ions).

Contrairement aux eucaryotes supérieurs qui misent sur l'oxygène pour leur respiration, de nombreuses bactéries excellent dans l'utilisation d'autres accepteurs d'électrons terminaux pour subvenir aux besoins énergétiques de leur métabolisme. Ces bactéries se rencontrent souvent dans des environnements particuliers dépourvus d'oxygène, dans l'eau, dans les sols engorgés ou sur la face inférieure des biofilms qu'elles créent à la surface de minéraux ou dans les canalisations. Parmi ces bactéries, des souches appartenant aux espèces *Gallionella ferruginea*, *Geobacter sulfurreducens*, *Leptothrix sp.*, *Shewanella oneidensis* ou *Thiobacillus ferrooxidans*, ont été caractérisées pour leur capacité à oxyder ou à réduire des éléments chimiques simples comme le fer, le chrome, le manganèse, le mercure, l'arsenic, le sélénium ou l'uranium. On parle de corrosion ou de biocorrosion pour qualifier l'impact des bactéries sur ces composés métalloïdes simples. Les réactions chimiques impliquées sont relativement bien connues et associent réactions géochimiques et dégradation de la matière organique. Dans le cas de minéraux plus complexes contenant ces éléments chimiques, comme les silicates par exemple, les réactions chimiques induites par les bactéries conduisent à des modifications de structure des minéraux par dissolution ou transformation. D'un point de vue chimique, ces processus requièrent des couples rédox (couple d'éléments chimiques comprenant un oxydant et réducteur) ayant des potentiels assez élevés pour produire la quantité d'énergie nécessaire au bon fonctionnement et à l'intégrité des cellules bactériennes impliquées. Notons que le fonctionnement de nos cellules est basé sur le même processus fondamental : capter de l'éner-

(3) Calvaruso C *et al.* (2006) *Appl Environ Microbiol* 72(2) 1258-66

(4) Badeau V *et al.* (1999) *Étude et Gestion des Sols* 6(3) 165-80

(5) Paris F *et al.* (1995) *Plant and Soil* 177, 191-201

(6) Frey-Klett P *et al.* (2005) *New Phytol* 165(1) 317-28



gie en couplant des donneurs d'électrons à des accepteurs d'électrons. Chez les bactéries, le flux électrochimique résultant de ce couplage produit de l'énergie utilisée par exemple pour le transport d'éléments en solution, la rotation des flagelles et la synthèse de composés chimiques riches en énergie connus, comme l'adénosine triphosphate (ATP).

Par ailleurs, dans les environnements aérobies ou micro-aérobies, il a été montré que les micro-organismes, qu'il s'agisse cette fois-ci de bactéries ou de champignons, produisent des molécules (des protons, des acides organiques et/ou des sidérophores) qui peuvent participer à l'altération des minéraux selon deux grands procédés : la complexation des éléments et l'acidification du milieu. C'est le cas notamment du champignon ectomycorhizien *Pisolithus tinctorius*, capable par exemple d'altérer un minéral de référence, la phlogopite, par une complexation des ions aluminium associée à une dissolution acide du réseau cristallin. Cette altération se traduit lors de l'observation aux rayons X par une augmentation de l'espace entre les feuillettes de la phlogopite (5). Le même type d'observation a aussi été réalisé pour un autre champignon ectomycorhizien, *Laccaria laccata*, (7, 8) ainsi qu'avec des bactéries appartenant au genre *Acidithiobacillus*, *Agrobacterium* ou *Bacillus*. À l'inverse, il a été observé que des micro-organismes pouvaient perturber la dissolution d'un minéral. Des études récentes ont en effet mis en évidence *in vitro* que les souches de *Shewanella oneidensis* ou de *Ramlibacter tataouinensis* inhibaient respectivement la dissolution de la calcite et du pyroxène, mais les mécanismes demeurent pour le moment méconnus (9, 10).

Parmi les acides les plus souvent cités comme étant impliqués dans les processus d'altération des minéraux silicatés, on trouve l'acide oxalique et l'acide acétique, mais aussi d'autres acides comme les acides formique, propionique, lactique, pyruvique, citrique, succinique ou sulfurique. Ces molécules sont capables d'acidifier le milieu, de casser les liaisons oxygène et de complexer les ions en solution. Cette dernière capacité est aussi décrite pour les sidérophores. Ces molécules très affines du fer sont excrétées par les micro-organismes en condition de carence en fer : elles complexent et transportent le fer jusque dans la cellule. Par ailleurs, l'enveloppe exopolysaccharidique des bactéries, du fait de sa charge électrique, est aussi capable de complexer des ions et pourrait ainsi contribuer au processus d'altération (11). L'action des acides organiques et des molécules complexantes sur l'altération des minéraux est donc double : ces molécules peuvent se fixer sur les surfaces minérales et littéralement en arracher des éléments, et elles peuvent complexer les éléments en solution, accélérant ainsi indirectement le taux de dissolution des minéraux. À l'heure actuelle, les molécules produites par les micro-organismes et impliquées dans l'altération sont loin d'être toutes identifiées.

### La génomique et les géosciences : un atout précieux

L'identification de plusieurs souches bactériennes aux propriétés altérantes a permis de faire de grandes avancées dans la compréhension des processus microbiens impliqués dans l'altération des minéraux, par la mise en évidence du rôle non seulement des réactions

d'oxydo-réduction, mais aussi de certaines molécules acides, des sidérophores ou des exopolysaccharides de l'enveloppe bactérienne.

Cependant la génétique de ces souches bactériennes est encore peu développée en comparaison à d'autres. Ceci s'explique par le fait que, si l'on considère les bactéries capables d'oxyder le fer ( $Fe^{2+}$ ) par exemple, la plupart n'ont été découvertes et caractérisées que dans les dix dernières années. L'accession récente au génome de bactéries telles que *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Desulfovibrio vulgaris*, *Geobacter sulfurreducens* ou encore *Shewanella oneidensis*, permet aujourd'hui de mieux comprendre le potentiel métabolique de ces souches, et ouvre de nouvelles perspectives d'utilisation de leurs propriétés par l'Homme, en particulier pour l'extraction de minerais rares ou la gestion durable de l'environnement. En effet, les séquençages menés par *The Institute for Genomic Research* \*3 ont révélé des tailles de génome relativement réduites, comprises entre 2,9 Mpb pour *A. ferrooxidans* et 4,9 Mpb pour *S. oneidensis*, et ont permis de générer un véritable catalogue de gènes candidats susceptibles de coder pour des métabolismes propres à ces bactéries, par exemple la capacité à oxyder le fer. L'examen rapide du génome d'une souche de *G. sulfurreducens* a mis en évidence des capacités métaboliques jamais encore décrites : cette souche possède de nombreux systèmes senseurs permettant d'apprécier la tension en oxygène, l'état redox ou encore les niveaux d'énergie (12). Plus précisément, les génomes de *G. sulfurreducens* et *D. vulgaris* présentent de nombreuses séquences d'enzymes du type hydrogénase (enzyme catalysant la réduction des protons en hydrogène gazeux) et des protéines du type cytochrome c (protéines impliquées dans le transport des électrons).

Ainsi l'ensemble de ces données de génomique vient compléter les informations déjà acquises par des techniques de génétiques plus conventionnelles mais complémentaires \*4, notamment sur la souche d'*A. ferrooxidans*. Ces approches plus conventionnelles ont par exemple permis de proposer récemment un autre rôle pour certains métabolites secondaires produits par des bactéries du genre *Pseudomonas* : substances humiques, quinones, phenazines et riboflavine. La mutation du gène *phzB* \*5 rend par exemple la souche bactérienne PCL1391 de *Pseudomonas chlororaphis* incapable de dissoudre des oxydes de fer et de manganèse (13). Dans des conditions particulières d'oxygénation du milieu ces différentes molécules pourraient jouer un rôle dans la réduction d'éléments tels que le fer ou le manganèse et donc contribuer au processus d'altération des minéraux contenant des éléments sensibles à l'oxydo-réduction (14).

En conditions aérobies en revanche, très peu de gènes impliqués dans le processus d'altération des minéraux sont connus. Seuls des gènes participant à la synthèse de l'acide gluconique ont été identifiés dans des souches de *Pseudomonas*, d'*Erwinia* ou de *Rhanelia*. La mutation de ces gènes conduit à une absence de production d'acide par la bactérie et s'accompagne clairement d'une incapacité à solubiliser des cristaux de phosphate de calcium (15). Cependant la même démonstration n'a pas été réalisée avec des minéraux complexes tels que les silicates. De la même manière, les gènes impliqués dans la synthèse des sidérophores semblent être de bons candidats, mais l'effet d'aucun de ces gènes n'a été testé sur des minéraux jusqu'à présent.

\*3 TIGR ;

[www.tigr.org/tdb/mdb/mdbcomplete.html](http://www.tigr.org/tdb/mdb/mdbcomplete.html)

\*4 Constructions de banques d'ADN génomique, clonage et criblage pour une fonction précise.

\*5 *phzB* : gène impliqué dans la synthèse de la phénazine-1-carboxamide

(7) Leyval C, Berthelin J (1991) *Soil Sci Soc Am J* 55, 4, 1009-16

(8) Styriakova I et al. (2004) *Can J Microbiol* 50(3) 213-9

(9) Luttge A, Conrad PG (2004) *Appl Environ Microbiol* 70(3) 1627-32

(10) Benzerara K et al. (2004) *Geomicrobiol J* 21, 341-9

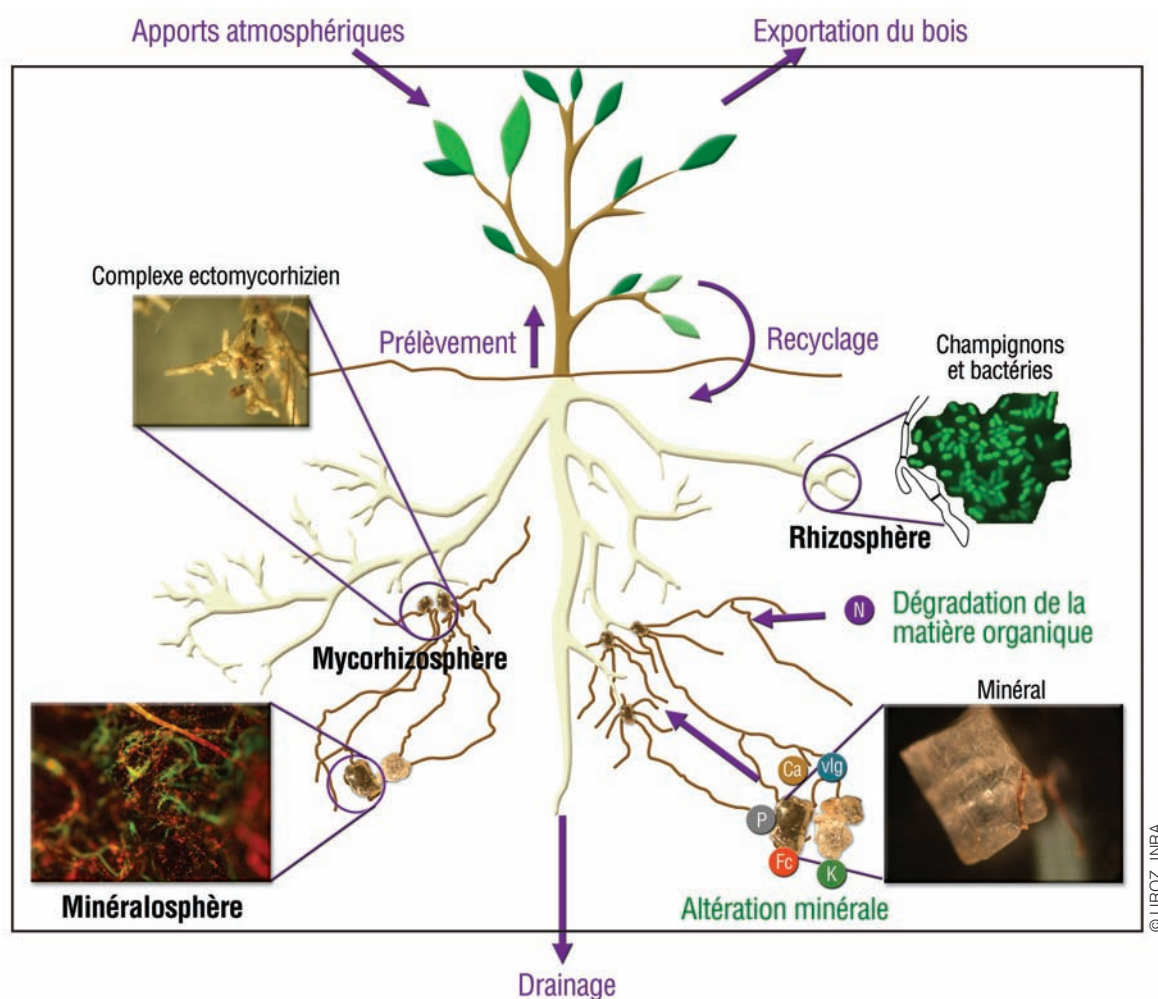
(11) Banfield JF, Nealson KH (1997) *Reviews in Mineralogy* 35

(12) Methé BA et al. (2003) *Science* 302(5652) 1967-9

(13) Hernandez ME et al. (2004) *Appl Environ Microbiol* 70(2) 921-8

(14) Stams AJ et al. EM (2006) *Environ Microbiol Mar* 8(3) 371-82

(15) Babu-Khan S et al. (1995) *Appl Environ Microbiol* (1995) Mar 61(3) 972-8



**Figure 3** Implication des micro-organismes dans le cycle des nutriments et la croissance des arbres en forêt

Ce cycle s'organise autour de cinq grandes composantes : prélèvements, recyclage, apports atmosphériques, exportation du bois et drainage. Deux d'entre elles (prélèvements et recyclage) sont fortement influencées par les micro-organismes du sol, qui colonisent différentes niches. On parle de minéralosphère pour qualifier l'environnement proche d'une particule minérale, de même de mycorhizosphère et de rhizosphère pour le volume de sol soumis à l'influence des racines mycorhizées ou non. Une racine est mycorhizée lorsqu'elle est associée à un champignon symbiotique du sol appelé champignon mycorhizien. Les arbres des forêts boréales et tempérées sont principalement associés à des champignons symbiotiques appelés ectomycorhiziens, du fait de la structure des organes symbiotiques qu'ils forment sur les racines courtes de leur hôte. Le complexe ectomycorhizien qui en résulte comprend non seulement des tissus racinaires et des cellules de champignon symbiotique, mais aussi des bactéries et des champignons non symbiotiques qui cohabitent dans cette niche. L'enjeu actuel est de déterminer la contribution des différentes composantes de cette microflore aux processus de dégradation de la matière organique et d'altération minérale.

Beaucoup d'efforts et d'investissement en termes de recherche sont donc encore nécessaires à l'avenir pour compléter l'identification des déterminants moléculaires microbiens des processus d'altération des minéraux et répondre à un certain nombre de questions d'importance évolutive et écologique, notamment : la séquence des gènes impliqués dans l'altération est-elle conservée ? Les mécanismes gouvernés par ces gènes sont-ils génériques ? Quels sont les facteurs environnementaux régulant l'expression de ces gènes ?

### La géomicrobiologie des sols : une discipline émergente à développer

Nous vivons actuellement les prémices d'une nouvelle discipline, la géomicrobiologie des sols. À l'avenir les études de l'écologie et de la génétique des micro-organismes impliqués dans l'altération des minéraux du sol devront se développer et se multiplier si l'on veut tirer pleinement parti des applications que cette nouvelle discipline pourra générer aussi bien dans le domaine industriel que dans celui de la protection de l'environnement. Dans l'état actuel de nos connaissances, de nombreuses hypothèses écologiques et mécanistes peuvent être émises

mais restent à vérifier. L'une d'entre elles pourrait être que les minéraux du sol constituent une niche écologique particulière, la minéralosphère, qui sélectionne les micro-organismes les plus aptes à altérer ces minéraux. La vérification de cette hypothèse nécessitera de s'intéresser aux souches microbiennes cultivables et à leurs potentialités, mais aussi de caractériser l'ensemble de la communauté microbienne présente sur les minéraux dans les sols, aussi bien du point de vue taxonomique que du point de vue fonctionnel. Le passage par l'étude des micro-organismes cultivables est un prérequis, certes restrictif car l'on estime que seuls 1 % des micro-organismes telluriques sont cultivables, mais indispensables quand on étudie une fonction dont on ne connaît pas les déterminants génétiques. L'étude de ce nouveau compartiment nécessitera des approches polyphasiques impliquant notamment la construction de banques génomiques et métagénomiques<sup>\*6</sup> qui serviront à lier la fonction d'altération aux gènes et aux micro-organismes impliqués<sup>\*7</sup>. Une fois les micro-organismes et les déterminants génétiques identifiés, des études de diversité fonctionnelle, des études d'expression et de localisation *in situ* des principaux gènes impliqués, devront être engagées afin de mieux comprendre les processus d'altération qui régissent la fertilité et la toxicité des sols. ●

<sup>\*6</sup> voir article de N. Lombard *et al.*, dans ce dossier.

<sup>\*7</sup> voir article de P. Lemanceau *et al.*, dans ce dossier.