

VBB-Bulletin n° 15 / Mai 2013

1. Rapport de la présidente	1
2. Activités des groupes de projet.....	3
2.1. Groupe de projet <i>Echange de connaissances et sensibilisation du public</i>	3
2.2. Groupe de projet <i>Microbiologie</i>	3
2.3. Groupe de projet <i>Mycorhizes</i>	3
2.4. Groupe de projet <i>Faune</i>	3
2.5. Groupe de projet <i>Observation de longue durée</i>	3
3. Projets choisis du BSA.....	4
3.1. 25 ans d'observation de la biologie des sols dans le canton de Fribourg.....	4
4. Forum.....	8
4.1. Biodiversité du sol en zones alluviales subalpines : Lombricides et collemboles.....	8
4.2. La bio-minéralisation carbonatée : un petit tour d'horizon dans les sols.....	13

1. Rapport de la présidente

Claudia Maurer-Troxler
Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne – Service de la protection des sols Rütli, 3052 Zollikofen

Biodiversité: la diversité de la vie – sur et dans le sol

On assiste dans le monde entier à un recul dramatique de la biodiversité. Pourtant, la diversité des biotopes, des écosystèmes, des espèces végétales et animales, des champignons et des microorganismes et la richesse de leur patrimoine génétique sont indispensables à notre survie.

En ratifiant la Convention sur la biodiversité de 1994, la Suisse s'est engagée elle aussi à sauvegarder la diversité biologique et à faire un usage durable et équitable des éléments qui la constituent. En 2012, l'OFEV a élaboré la « Stratégie Biodiversité Suisse » et formulé dans le plan d'action dix objectifs représentant les orientations

que les acteurs (Confédération, cantons, communes et particuliers) devront suivre au cours des années à venir afin de maintenir et développer durablement la biodiversité et ses services.

Inventaires des biotopes, liste des espèces menacées, monitoring de la biodiversité, qualité et mise en réseau des surfaces de compensation écologique en agriculture: de nombreux instruments sont disponibles pour mesurer et développer la biodiversité en surface. Mais qu'en est-il de la diversité cachée sous terre, de ces innombrables animaux, champignons, microorganismes et algues dont une majorité nous est encore inconnue ? Leur diversité forme le fondement de la vie en surface, et leurs services nous assurent nourriture, eau potable et air pur.

On oublie souvent que les organismes dans le sol sont beaucoup plus nombreux et diversifiés que ceux vivant à la surface. Aussi le groupe VBB-BSA s'est-il donné pour mission d'attirer régulièrement l'attention sur cette biocénose et de mesurer et démontrer son importance pour le sol. Le NABO a déjà été complété par des paramètres biologiques, et des échantillons de sol ont été prélevés pour la première fois l'an passé dans le cadre du monitoring sur la biodiversité. Les futures discussions au sein du groupe montreront si des questions et des relevés de biologie du sol doivent être intégrés à ce niveau et dans le Plan d'action de la Stratégie Biodiversité Suisse.

Le thème de la biodiversité est abordé sous différentes formes dans plusieurs contributions de ce bulletin: dans les travaux en cours de divers groupes de projet (microbiologie, mycorhizes et faune, cf. page 3), dans le monitoring mis en place depuis plusieurs années dans le canton de Fribourg (page 4), ainsi que dans le forum où le groupe VBB-BSA présente des études d'instituts de recherche (page 8-18).

Nom du groupe et thèmes abordés	Membres	Personne de contact
Echange de connaissances et sensibilisation du public		
<ul style="list-style-type: none"> - Informer et sensibiliser le public aux questions se rapportant à la biologie du sol - Echanger des expériences et des connaissances 	<ul style="list-style-type: none"> E. Havlicek (OFEV) C. Maurer-Troxler (BE) D. Mösch (AG) D. Marugg (SG) D. Schmutz (BL) R. von Arx (BAFU) G. von Rohr (SO) T. Wegelin (ZH) D. Widmer (LU) 	<p>Daniela Marugg Baudepartement, Amt für Umwelt und Energie des Kantons St. Gallen Lämmli brunnenstrasse 54 CH-9001 St. Gallen Tel. 058 229 43 41 daniela.marugg@sg.ch</p>
Microbiologie		
<ul style="list-style-type: none"> - Elaborer et valider des stratégies d'échantillonnage (prairies, terres ouvertes, forêts) - Choisir, standardiser et valider des méthodes - Documenter la variabilité dans le temps et dans l'espace - Elaborer des bases d'interprétation (modèles de valeurs de référence) 	<ul style="list-style-type: none"> W. Heller (ACW) A. Fliessbach (FiBL) P. Mäder (FiBL) H.-R. Oberholzer (ART) 	<p>Dr. Hans-Rudolf Oberholzer Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) Reckenholzstrasse 191 CH-8046 Zürich Tel. 01 377 72 97 hansrudolf.oberholzer@agroscope.admin.ch</p>
Mycorrhizes		
<ul style="list-style-type: none"> - Elaborer et valider des méthodes standard pour décrire l'état d'un sol sur le plan des mycorrhizes 	<ul style="list-style-type: none"> S. Egli (WSL) H. Gamper (ETH) C. Maurer-Troxler (BE) P. Mäder (FiBL) H.-R. Oberholzer (ART) F. Oehl (ART) 	<p>Dr. Simon Egli WSL Zürcherstrasse 111 CH-8903 Birmensdorf Tel. 01 739 22 71 simon.egli@wsl.ch</p>
Faune		
<ul style="list-style-type: none"> - Evaluer et standardiser des méthodes de détermination de la pédofaune et les tester par des études de cas - Développer des tests écotoxicologiques 	<ul style="list-style-type: none"> S. Campiche (Centre Ecotox) E. Havlicek (BAFU) C. Maurer-Troxler (BE) L. Pfiffner (FiBL) 	<p>Dr. Claudia Maurer-Troxler Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz, Rütli CH-3052 Zollikofen Tel. 031 910 53 33 claudia.maurer@vol.be.ch</p>
Observation de longue durée (activités suspendues)		
<ul style="list-style-type: none"> - Coordonner des recherches sur la biologie du sol dans le cadre du réseau cantonal d'observation des sols - Réaliser des études pilotes d'observation à long terme (en collaboration avec le projet ART) 	<ul style="list-style-type: none"> U. Gasser (ZH) C. Maurer-Troxler (BE) H.-R. Oberholzer (ART) D. Mösch (AG) D. Marugg (SG) G. Schmid (SG) P. Schwab (ART) 	<p>Dr. Claudia Maurer-Troxler Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz, Rütli CH-3052 Zollikofen Tel. 031 910 53 33 claudia.maurer@vol.be.ch</p>

2. Activités des groupes de projet

2.1. Groupe de projet *Echange de connaissances et sensibilisation du public*

Daniela Marugg, Département des travaux publics, Office de l'environnement et de l'énergie du canton de Saint-Gall

Le groupe de projet continue de suivre le remaniement du KMSOIL, mais il n'a pas pu tenir de séance depuis le printemps 2012. Au début de l'été 2012 il s'est attaqué dans un premier temps à l'amélioration de l'ancienne plate-forme KMSOIL. Cette tâche a pu être réglée par le centre de service de l'OFEV. Les problèmes avec KMSOIL signalés au centre de service sont rapidement résolus par celui-ci. Si la performance de KMSOIL a pu être améliorée, la deuxième phase, à savoir le remaniement de l'ensemble du KMSOIL, traîne malheureusement en longueur. Le groupe de projet attend depuis l'été 2012 la décision de principe de la direction de l'OFEV pour savoir si le KMSOIL doit rester rattaché au système GEVER et amélioré dans le cadre de sa refonte, ou s'il doit en être détaché. Dans ce dernier cas de figure, il faudrait reconstituer le KMSOIL de l'extérieur et régler la question de la maintenance du système. Les coûts de ces travaux devraient être pris en charge conjointement par les cantons concernés et l'OFEV. La décision a été reportée à l'été 2013.

2.2. Groupe de projet *Microbiologie*

Hans-Rudolf Oberholzer, Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Le Groupe de projet Microbiologie n'a pas mené d'activité spécifique l'an passé. Ses membres ont collaboré avec d'autres groupes du BSA.

2.3. Groupe de projet *Mycorhizes*

Simon Egli, WSL Birmensdorf

Les échantillons des 154 sols agricoles suisses étudiés dans le cadre du projet sur le potentiel infectieux mycorhizogène ont subi des analyses supplémentaires portant sur la diversité des spores de champignons mycorhiziens à arbuscules. Celles-ci ont été extraites des échantillons par tamisage par voie humide suivi d'une centrifugation sur gradient de saccharose, puis identifiées selon leurs caractéristiques morphologiques et leurs structures cellulaires. Les résultats de

cette recherche seront pris en compte dans l'évaluation finale du projet.

2.4. Groupe de projet *Faune*

Claudia Maurer-Troxler, Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne – Service de la protection des sols

Une lettre sera envoyée à des universités, des instituts de recherche et des musées d'histoire naturelle afin d'établir une vue d'ensemble des enquêtes de zoologie et de microbiologie du sol réalisées jusqu'ici en Suisse, en se basant sur un tableau préparé à cet effet. Cet aperçu permettra de faire un état des lieux et d'identifier les lacunes à combler lors des prochains relevés. Il servira de base pour déterminer la biodiversité du sol dans le cadre de la Stratégie Biodiversité de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), et pour élaborer des indicateurs pédobiologiques pour l'Observatoire national des sols NABO. Cette base de données sera également mise à la disposition d'autres utilisateurs.

2.5. Groupe de projet *Observation de longue durée*

*Claudia Maurer-Troxler, Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne – Service de la protection des sols
Peter Schwab, Direction des projets LAZBO, FB14.2 (NABO) ART (AG, BE, SG, ZH)*

Ce groupe de projet a momentanément suspendu ses activités.

3. Projets choisis du BSA

3.1. 25 ans d'observation de la biologie des sols dans le canton de Fribourg

Nicolas Rossier

Institut agricole de Grangeneuve
CH-1725 Posieux
rossiern@fr.ch
Tél. 026 305 58 74

Introduction

Le réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO) a été mis en place entre 1987 et 1991. Ce réseau a pour objectif premier de récolter des informations d'ordre pédologique, agricole et environnemental sur les sols agricoles du canton de Fribourg. Il comporte au total 250 sites de 100 m² distribués sur une grille de 2 x 2 km dans tout le canton. Pour chaque cycle d'observation, 50 parcelles sont échantillonnées par année à la profondeur 0-20 cm. Par conséquent, tous les sites sont prélevés en cinq ans, ce qui équivaut à un cycle d'analyse.

Pour les 25 années d'observation des sols agricoles, la répartition des cycles est la suivante :

Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
1987 - 1991	1992 - 1996	1997 - 2001	2002 - 2006	2007 - 2011

Les 250 sites constituant le réseau d'observation ont été répartis en trois classes, en fonction de l'utilisation agricole du sol. Les trois types d'utilisation du sol retenus sont les terres assolées, les prairies permanentes et les alpages. Les alpages sont, bien entendu des prairies permanentes, cependant, ces surfaces ne sont utilisées que pour la pâture estivale et ne font pas partie de la surface agricole utile (SAU) de l'exploitation. La carte (Figure 3.1.1) localise tous les sites dans le canton de Fribourg selon le type d'utilisation et présente la limite des sept districts constituant le canton.

Cet article décrit l'évolution des deux variables représentant l'activité biologique des sols les plus importantes qui ont été décrites dans le rapport FRIBO sur l'évolution des paramètres biologiques (Rossier & Dessureault-Rompré, 2003). Il s'agit de la biomasse ATP et de la minéralisation du carbone organique analysés selon Maire (1984). Il est extrait du cinquième rapport FRIBO (Rossier & al. 2012).

Biomasse ATP

L'adénosine triphosphate (ATP) est contenue dans toutes les cellules biologiques. Etant donné

que cette molécule est hydrolysée à la mort des cellules vivantes, il s'agit donc d'un bon marqueur pour les organismes vivants. Elle sert à la transmission et à la réserve d'énergie dans la plupart des réactions biochimiques. C'est donc une source d'énergie pour les microorganismes. Cette mesure permet d'estimer la masse totale des microorganismes vivants par unité de sol. La biomasse ATP est liée à la teneur en argile et en humus des sols.

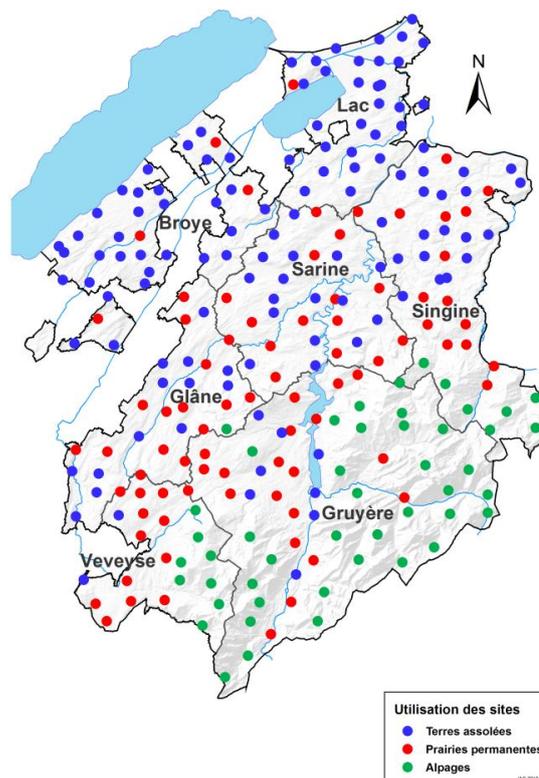


Figure 3.1.1 Localisation et utilisation des sites FRIBO.

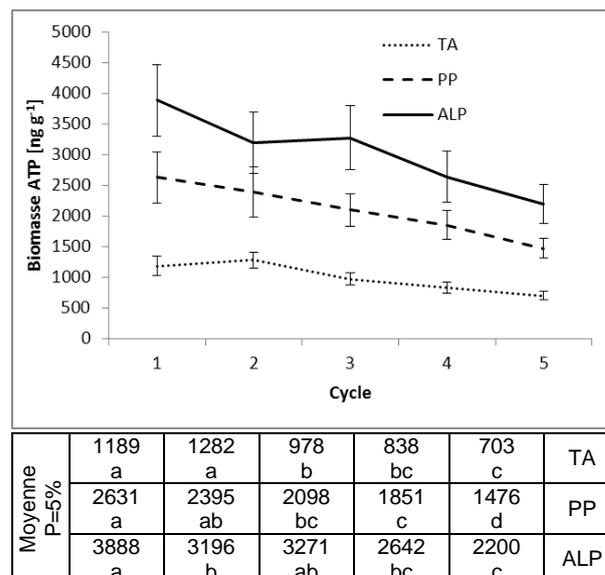


Figure 3.1.2 Evolution de la biomasse ATP.

La Figure 3.1.2 montre bien que les terres assolées sont caractérisées par une flore microbienne

plus faible comparativement aux sols situés dans les prairies permanentes et les alpages. Comme le mentionnent Rossier & Dessureault-Rompré (2003) dans leur rapport sur les paramètres biologiques, ces différences proviennent des teneurs en matière organique des sols et de la mise en culture. Dans les terres assolées, les sols sont travaillés intensivement et la biomasse racinaire fluctue énormément, ce qui perturbe l'activité naturelle des microorganismes. Les sols sous prairies sont beaucoup plus stables, car l'humus et de ce fait la biomasse microbienne y sont constamment renouvelés.

Quel que soit le mode d'utilisation, la biomasse microbienne diminue de manière constante et significative au cours des cinq cycles de mesure du réseau FRIBO. Les baisses sont du même ordre de grandeur pour les trois utilisations du sol, soit de 41% pour les terres assolées, 44% pour les prairies permanentes et de 43% pour les alpages. Cette baisse de la quantité de microorganismes dans les sols est inquiétante et selon nos connaissances actuelles difficilement explicable.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- L'augmentation moyenne des températures laisse plus de temps aux microorganismes pour effectuer leur travail, mais en parallèle l'offre en nourriture n'augmente pas, ce qui au final fait baisser leurs populations.
- Les événements climatiques exceptionnels tels que sécheresse, canicules, grand froids perturbent la vie et la reproduction des microorganismes
- Les pollutions ambiantes diffuses affectent les microorganismes et augmentent leur mortalité, phénomène que l'on pourrait comparer à la mort des abeilles.
- La méthode analytique n'est pas stable, spécialement le calibrage annuel des appareils de mesure.
- Les apports d'engrais organiques très agressifs tels que les lisiers non traités tuent et inhibent de nombreux microorganismes. L'agressivité des lisiers envers les organismes vivants est largement reconnue, de plus ce type d'engrais de ferme est en augmentation avec la généralisation des stabulations libres sur caillebotis et la diminution de la production de fumier qui y est associée.

La biomasse ATP est fortement corrélée avec la teneur en matière organique. Les analyses démontrent que celle-ci est stable, nous pouvons donc exclure l'hypothèse d'un manque de nourriture pour les microorganismes. De plus leur activité représentée par la minéralisation du

carbone organique est resté globalement stable (Figure 3.1.6).

Evolution par site

Vingt-et-un sites ont une diminution significative de leur teneur en biomasse ATP (Figure 3.1.3). Il s'agit de huit terres assolées, de six prairies permanentes et de sept alpages. Les sites en terres assolées souffrent d'un déficit de prairie temporaire dans la rotation. Plusieurs alpages se situent dans des zones difficiles, terrains instables, hydromorphes ou superficiels. Les causes provoquant la diminution de la biomasse en prairies permanentes sont diverses, (piétinement, modification de l'utilisation, remaniement etc.). 81% des sites en diminution se situent en région herbagère et d'élevage dans le sud du canton, ce qui appuie l'hypothèse de la toxicité des engrais de ferme. Malheureusement nous ne relevons pas les pratiques de fumure, ce qui nous empêche d'établir une corrélation chiffrée entre la fumure et la biomasse ATP.

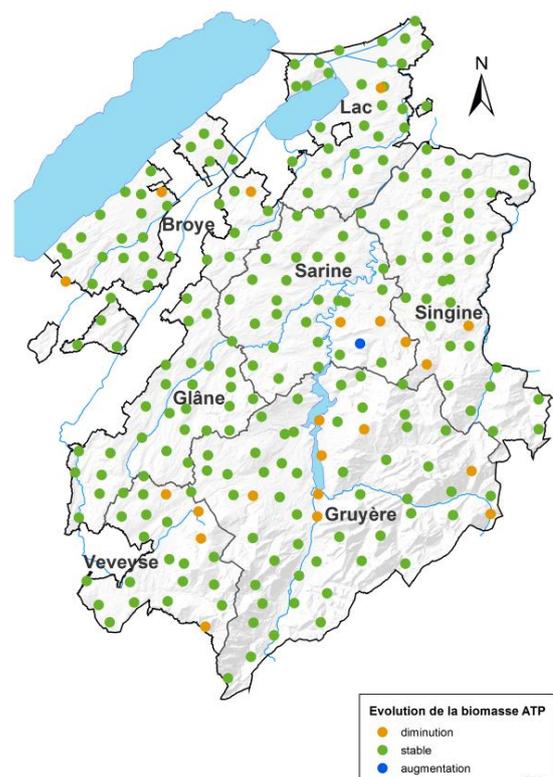


Figure 3.1.3 Evolution par site des teneurs en biomasse ATP au cours des cinq cycles.

Un seul site voit sa biomasse augmenter, c'est une terre assolée avec une part de prairie temporaire en augmentation.

Appréciation selon le barème fribourgeois

Le groupe Biologie du sol - Application (BSA) a publié en 2009 une aide à la mise en œuvre pour l'utilisation et l'interprétation des paramètres bio-

logiques des sols (BSA 2009). Nous avons collaboré à cette publication en y intégrant les barèmes recalculés avec l'analyse de régression de tous les sites FRIBO. Ces barèmes sont utilisés pour les interprétations ci-après.

Quelle que soit l'utilisation des sols, la part de sites dans la classe "pauvre" est en augmentation

(Figure 3.1.4), et inversement pour les sols très riches. La part des sols jugé satisfaisants se situe autour de 30% pour les terres assolées et les prairies permanentes et de 50% pour les alpages. Ce tableau confirme l'appauvrissement des sols en biomasse constaté à la Figure 3.1.3.

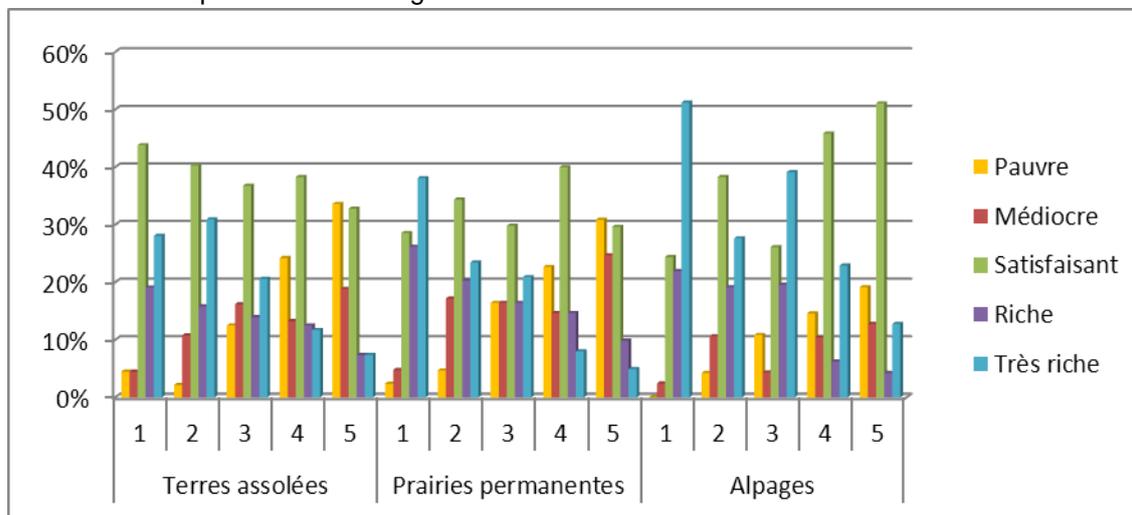


Figure 3.1.4 Répartition des sites d'après l'appréciation de la biomasse ATP selon le barème fribourgeois.

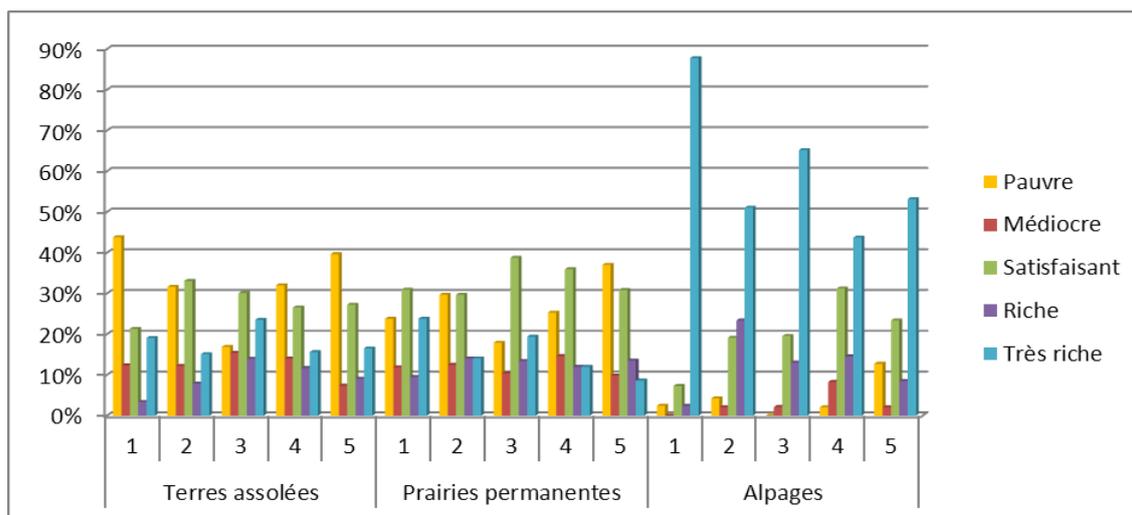


Figure 3.1.5 Répartition des sites d'après l'appréciation de la minéralisation du carbone organique selon le barème fribourgeois.

Minéralisation du carbone organique

La minéralisation du carbone organique donne une évaluation de la quantité de matière organique minéralisée au cours de l'incubation (travail effectué par la biomasse pendant la durée de l'incubation). Il s'agit de la somme de CO₂ dégagé durant les 15 jours d'incubation converti en son équivalent de matière organique. Cette valeur résume bien les trois mesures de l'activité respiratoire qui ont été analysées dans le rapport sur les paramètres biologiques (Rossier & Dessureault-Rompré, 2003).

La minéralisation du carbone organique effectuée par la biomasse microbienne est dépendante de l'utilisation du sol (Figure 3.1.6). Une biomasse microbienne plus importante en termes de quantité peut potentiellement minéraliser de plus grandes quantités de matière organique par gramme de sol sur une période de 15 jours. Les sols comprenant les prairies permanentes et les alpages sont donc caractérisés par un potentiel minéralisateur plus important, du fait d'une part qu'ils sont dotés en moyenne de plus grandes teneurs en humus et en argile, et d'autre part par l'effet de la présence constante de la prairie sur ces sols.

Les alpages ont observé une baisse significative de leurs valeurs après le premier cycle de prélèvement et sont restés stables par la suite. Les valeurs sont stables pour les terres assolées et les prairies permanentes.

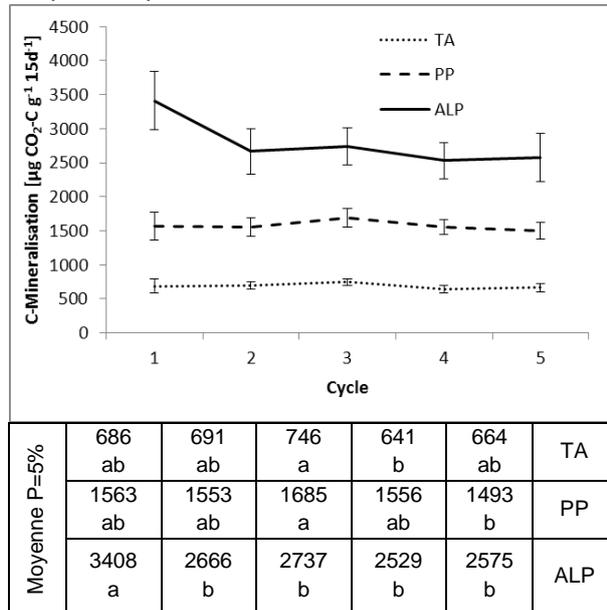


Figure 3.1.6 Evolution de la minéralisation du carbone organique.

Evolution par site

Sept terres assolées, quatre prairies permanentes et trois alpages présentent une diminution significative de leur valeur de minéralisation du carbone organique (Figure 3.1.7). Les causes sont diverses, cinq sites sont peu profonds, hydromorphes ou ont été remblayés, trois prairies permanentes sont passées en terres assolées, un site est en culture maraîchère et trois sites ont également une baisse de leur valeur ATP.

Six sites ont une augmentation significative. Il s'agit de trois terres assolées, deux prairies permanentes et un alpage. Trois de ces sites ont vu leur part de prairie augmenter durant cette période.

Appréciation selon le barème fribourgeois

La part de terres assolées classée satisfaisant fluctue très légèrement et se maintient autour des 30% (Figure 3.1.5). Dans les prairies permanentes, la part de sites pauvres augmente depuis le troisième cycle, tandis que les sites très riches diminuent dans le même intervalle de temps. Dans les alpages, la part des sites pauvres augmente et celle des sites très riches diminue.

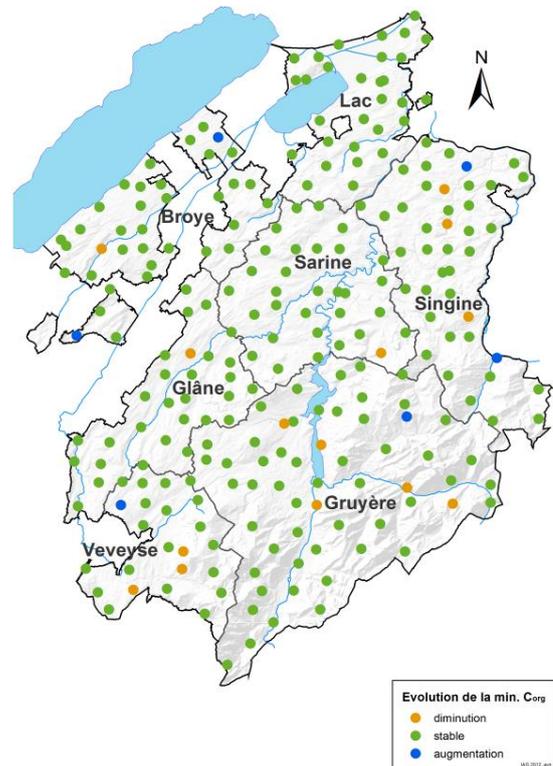


Figure 3.1.7 Evolution par site des teneurs de minéralisation du carbone organique au cours des cinq cycles.

Conclusion

Même si les valeurs moyennes de minéralisation du carbone organique des prairies permanentes et des alpages restent relativement stables, la proportion de sites pauvres a augmenté, ce qui démontre, au même titre que pour la biomasse ATP, que l'activité de la flore microbienne des sols du canton de Fribourg est mise à mal. Ce constat nous pousse à maintenir notre activité de monitoring des sols et à éclaircir les différentes hypothèses émises au sujet de la diminution de la biomasse, de façon à maintenir la fertilité et la productivité des sols agricoles.

Bibliographie

- (1) Groupe de travail « Biologie du sol – application » (BSA), 2009. Utilisation et interprétation des paramètres biologiques du sol. Aide à la mise en œuvre. 25 pages. Posieux/Berne.
- (2) Maire N., 1984. Extraction de l'adénosine triphosphate dans les sols ; une nouvelle méthode de calcul des pertes en ATP. Soil Biology and Biochemistry, 19 491,-500.
- (3) Rossier N. & Dessureault-Rompré J., 2003. FRIBO : Réseau d'observation des sols agricoles 1987-2001 Biologie. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, Station cantonale des productions animales et végétales, Grangeneuve. 98 pages.
- (4) Rossier N., Von Niederhäusern A., & Bongard L., 2012. FRIBO, Réseau fribourgeois d'observation des sols 1987-2011. Institut agricole de l'Etat de Fribourg IAG, Posieux. 200 pages.

4. Forum

4.1. Biodiversité du sol en zones alluviales subalpines : Lombriciens et Collemboles

Renée-Claire Le Bayon, Bullinger-Weber G., Salomé C., Zigerli D., Amstutz R., Gobat J.-M. & Guenat C.

MER Institut de Biologie, Laboratoire Sol & Végétation
Université de Neuchâtel
Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel
claire.lebayon@unine.ch
Tél. +41 32 718 23 65

Introduction

Les zones alluviales sont des milieux situés à l'interface entre écosystèmes terrestres et aquatiques, et représentent ainsi de véritables écotones se caractérisant par des variations du niveau de l'eau. La dynamique fluviale joue donc un rôle prépondérant sur la géomorphologie du milieu, la rivière charriant des sédiments de granulométrie variable et provoquant à la fois des processus de sédimentation ou d'érosion du système (Petts et Amoros, 1996). Il en résulte une hétérogénéité spatiale du paysage très marquée que ce soit en termes de ressources nutritives mais également d'habitats pour les organismes vivants. En Suisse, les zones alluviales recensent ainsi près de la moitié des espèces végétales, mais également des poissons, batraciens, oiseaux et mammifères qui peuvent y trouver les conditions nécessaires à leur développement (Gallandat et al., 1993).

Depuis la parution de l'Ordonnance fédérale de protection des zones alluviales de Suisse de 1992, la biodiversité végétale et animale est largement étudiée dans ces écosystèmes fluviaux. Toutefois, le compartiment « sol » est peu exploré, et seules quelques récentes études ont mis en avant toute l'importance de se focaliser sur les sols alluviaux, l'épisolum humifère ainsi que la pédofaune dans ces milieux très dynamiques (Zigerli, 2011; Bullinger-Weber et al., 2012). De plus, à l'interface entre marges proglaciaires et plaines alluviales, les zones alluviales subalpines sont également peu documentées dans la littérature.

Dans ce contexte, l'objectif de ce document est de présenter une synthèse de plusieurs études menées dans la vallée du Gasterntal (BE) où coule la rivière Kander, prenant sa source au glacier Kanderfirn et se jetant dans le lac de Thoune. L'accent sera porté sur les communautés lombriciennes et sur les Collemboles, en lien

avec les différentes phytocénoses, les formes d'humus et les sols.

Matériel et Méthodes

Site d'étude : La zone alluviale du Gastereholz (objet de l'inventaire fédéral n°74) est située à 1370 m d'altitude au-dessus de Kandersteg (BE). La moyenne des températures annuelles est de 5.4°C et celle des précipitations de 1180 mm (données www.bafu.admin.ch). La Kander présente un système fluvial en tresses et est caractérisée par un régime hydrologique de type nival. Le débit moyen mesuré de 1950 à 1982 est de 2.1 m³ s⁻¹ avec des valeurs moyennes estivales de 5.3 m³ s⁻¹ et hivernales de 0.1 m³ s⁻¹ (OFEV, 2010). En outre, les débits journaliers varient fortement en été en lien avec les périodes d'ensoleillement (fonte des neiges). Les alluvions sont majoritairement carbonatées.

Végétation : Le choix des sites d'échantillonnage selon les stades d'évolution de la végétation s'est basée sur les cartes de végétation préexistantes (Gallandat et al., 1993): 1) des zones herbacées pionnières (ZP) sur galets appartenant à l'alliance de l'*Epilobion fleischeri* (association du *Salici-Myricarietum*) ; 2) des forêts pionnières de saules (FS) rattachées à l'alliance du *Salicion eleagni* (association du *Salicetum eleagno-daphnoidis*) ; 3) des forêts pionnières d'aulnes blancs d'âges différents (forêts jeunes (FAJ) et matures (FAM)) appartenant à l'alliance de l'*Alnion incanae* (association du *Calamagrostio-Alnetum incanae*).

Sols, formes d'humus et Pédofaune : Pour chaque point d'échantillonnage, le Référentiel pédologique (Baize & Girard, 2009) a permis de distinguer les catégories de sols alluviaux ; la clé européenne d'identification des formes d'humus (Zanella et al., 2011) a été utilisée et un raccordement sommaire à la clé WRB-FAO a été effectué (Jabiol et al., 2013). Les Lombriciens ont été extraits au printemps et à l'automne dans les zones FS, FAJ et FAM, suivant les techniques de Lawrence & Bowers (2002) et identifiés à l'espèce. Les Collemboles ont été collectés au cours de 3 saisons, par des piégeages Barber (Collemboles épigés) et des extractions Berlèse (Collemboles endogés) dans toutes les zones, et identifiés au genre.

Résultats et discussion

Sols alluviaux : Les sols, peu évolués, sont globalement peu épais et atteignent rarement plus de 50 cm pour des raisons diverses et complémentaires. La première est que la

dynamique fluviale à cette altitude et dans cette vallée encaissée est telle que les phénomènes d'érosion et sédimentation sont très intenses et fréquents, défavorisant ainsi la mise en place de processus pédogénétiques sur le long terme. La seconde a trait à l'activité biologique; en effet, à cette altitude et compte tenu de la longue période d'enneigement, les activités biologiques liées à la décomposition de la matière organique et à son intégration à la matrice minérale sont concentrées sur environ 6 mois de l'année. La formation d'horizons J voire A est par conséquent lente, de même que l'évolution des sols.

Trois catégories de sols alluviaux sensu stricto (fluviosols) dominent sur les sites étudiés et sont tous carbonatés:

- i) les FLUVIOSOLS BRUTS, majoritairement situés en zones herbacées pionnières et présentant



a)



b)



c)

Figure 4.1.1 Trois formes d'humus recensées sur le site d'étude, identifiées dans les zones pionnières (ZP) et les forêts alluviales de saules (FS) et d'aulnes jeunes et matures (FAJ et FAM): a) Psammomull (ZP et FS), b) Eumésomphi (FAJ et FAM) et c) Peyromoder (FAJ et FAM). Photos: A. Widmer.

Formes d'humus : Six formes d'humus ont été décrites par Zigerli (2011). La majorité d'entre elles appartiennent au groupe des Entiformes en lien avec le substrat sableux sur lequel elles reposent. Les Psammomulls sont ainsi les formes dominantes en ZP et FS, avec des séquences d'horizons du type: OL/OF_{z0} discontinu ou en poches/miA et/ou meA (Figure 4.1.1 a). Toutefois, il est à noter que dans de nombreux cas, l'horizon A est absent, au profit d'un horizon Js ou M. Si la nomenclature de Zanella et al. (2011) est difficilement applicable, celle de Jabiol et al. (2013) permet de nommer la forme d'humus observée; dans le cas précis, il s'agirait de FLUVIC PARAHUMUS. Cette nomenclature très récente est tout à fait prometteuse dans de tels milieux.

Dans les FAJ et FAM, les horizons holorganiques et organo-minéraux tendent à s'épaissir, les Terroformes apparaissent avec notamment des Eumésomphis (OL/OF_{z0}/[OH]/meA; (Figure 4.1.1 b)). Localement, des Peyromoders sur substrat grossier sont observés (Figure 4.1.1 c) ainsi que des Hydroformes dans les cas particu-

des proportions de matériel grossier type galets très importantes;

- ii) les FLUVIOSOLS JUVENILES, observés dans les forêts FS, FAJ et FAM, et enfin
- iii) les FLUVIOSOLS TYPIQUES qui sont recensés uniquement en forêts matures.

Ainsi, de manière globale, le gradient d'évolution des sols en fonction de l'éloignement à la rivière et/ou de l'exhaussement par rapport au lit de la rivière est respecté, en lien aussi avec l'évolution des phytocénoses depuis les communautés herbacées pionnières jusqu'aux aulnaies blanches les plus âgées. Il reste à noter que quelques REDOXISOLS et REDUCTISOLS TYPIQUES fluviques, c'est-à-dire des sols caractérisés par une présence semi-permanente ou permanente d'eau, sont parfois observés dans des conditions topographiques et/ou pédologiques (texture fine) particulières.

liers des REDUCTISOLS TYPIQUES cités précédemment.

Globalement, les conditions d'incorporation de la matière organique au sol à cette altitude sont dépendantes de différentes variables telles que :

- i) la texture minérale et la quantité de litière apportée (épigée et endogée) qui vont conditionner l'évolution des formes d'humus,
- ii) les conditions pédoclimatiques qui influencent fortement l'activité biologique (microorganismes, microarthropodes) et donc la décomposition de la litière et son incorporation au sol,
- iii) l'épaisseur du sol qui module également l'activité d'enfouissement des matériaux par les Lombriciens, notamment celle des vers de terre anéciques dont la présence exige une épaisseur de sol minimale.

Pédofaune

Lombriciens : Sur une base de 27 espèces et sous-espèces recensées à ce jour en zone alluviale sur le territoire Suisse (Salomé et al., 2011), 11 été observées dans les forêts FS, FAJ et FAM,

appartenant essentiellement aux catégories écologiques des endogés et des épigés (Tableau 4.1.1). Aucun ver de terre anécique n'a été collecté dans la zone alluviale; toutefois, dans un pâturage adjacent mais hors de la zone alluviale, des individus ont été observés. De plus, le travail de Widmer (2013) a relevé la présence d'espèces anéciques en forêts intermédiaires et matures au sein de zones alluviales subalpines autres que celle du Gastereholz.

S'agissant des communautés lombriciennes, la Figure 4.1.2 synthétise leur répartition à l'étage subalpin en fonction des conditions du milieu. Il apparaît non seulement que ces dernières influencent fortement les communautés en place, mais également que la texture du sol est la variable qui module la présence de certaines espèces. Ainsi, *Dendrobaena octaedra*, une espèce très petite, pourra survivre dans des

poches de matières organiques très fines déposées en surface de substrat minéral grossier. *Lumbricus rubellus* est quant à lui relativement ubiquiste tandis que les textures minérales fines seront plus favorables à *Aporrectodea rosea* et *Octolasion cyaneum*.

Tableau 4.1.1 Espèces lombriciennes épigées et endogées recensées dans les forêts FS, FAJ et FAM de la zone alluviale subalpine.

Espèces épigées	Espèces endogées
<i>Dendrobaena octaedra</i>	<i>Aporrectodea caliginosa caliginosa</i>
<i>Dendrodrilus rubidus</i>	<i>Aporrectodea handlirschi</i>
<i>Dendrodrilus subrubicundus</i>	<i>Aporrectodea rosea</i>
<i>Lumbricus moliboeus</i>	<i>Octolasion cyaneum</i>
<i>Lumbricus rubellus</i>	<i>Octolasion tyrtaeum lacteum</i>
	<i>Octolasion tyrtaeum tyrtaeum</i>

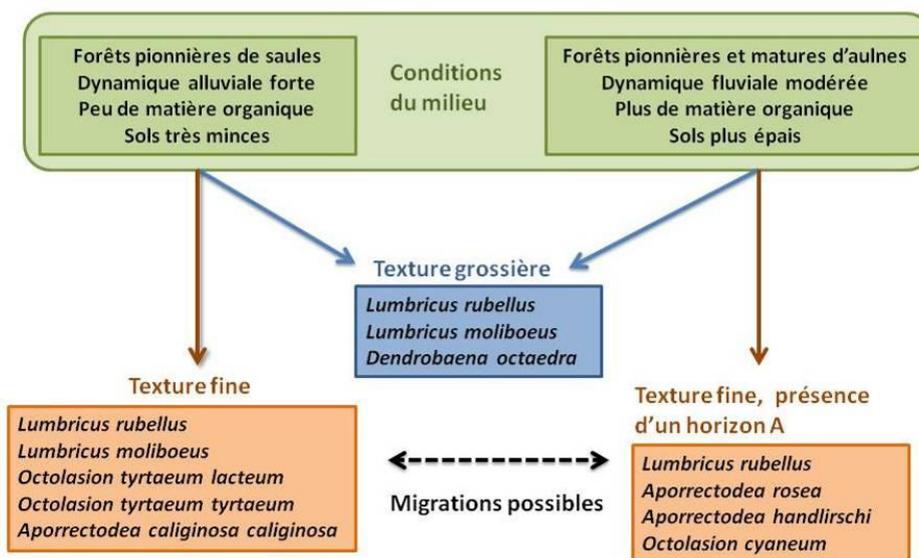


Figure 4.1.2 Répartition des communautés lombriciennes en fonction des conditions du milieu; la variable déterminant la présence des espèces est la texture du sol (d'après Salomé, 2011).

Collemboles

Collemboles épigés : Parmi les 15'200 Collemboles épigés déterminés, sept familles et 17 genres ont été identifiés. Les familles de Collemboles épigés les plus abondantes (Entomobryidae, Isotomidae et Tomoceridae) permettent de distinguer ZP, FS, FAJ et FAM. Chaque stade d'évolution de la végétation est ainsi reconnaissable par une combinaison caractéristique de familles (Figure 4.1.3).

Les facteurs environnementaux contribuent à la répartition de ces familles de Collemboles, les Isotomidae étant par exemple inféodés aux ZP et FS alors que les Tomoceridae se retrouveront préférentiellement dans les FAJ et FAM. L'abondance des genres de Collemboles se révèle être un indicateur encore plus précis du milieu (Figure 4.1.3). Ainsi, huit genres sont

retrouvés à tous les stades, ce qui suggère une amplitude physiologique large. À l'inverse, Folsomides est prépondérant dans les ZP, *Protaphorura* et *Vertagopus* dans les FS, *Pseudachorutes* et *Odontella* dans les stades FAJ et FAM.

En lien étroit avec les formes d'humus, trois genres sont typiques: 1) *Isotomurus* en ZP, la présence de niches écologiques à microclimat humide pouvant expliquer la présence de ce genre hygrophile dans un milieu xérique; 2) *Desoria* en FS, présentant une écomorphose, témoin de conditions microclimatiques variables; 3) *Pogonognathellus* en FAJ et FAM et reconnu pour être acidophile et typique des forêts évoluées.

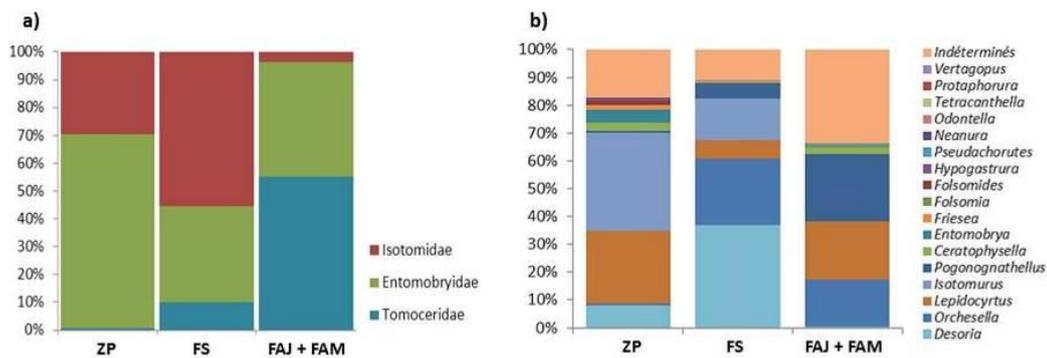


Figure 4.1.3 Proportions relatives des familles (a) et des genres (b) de Collemboles épigés dans les zones pionnières (ZP) et les forêts alluviales de saules (FS) et d'aulnes jeunes et matures (FAJ et FAM).

Collemboles endogés : Les sols des aulnaies abritent une densité de Collemboles plus élevée que celle des autres milieux, en lien avec à la fois la présence d'horizons hologaniques et la texture fine qui contribuent à la rétention de l'eau, contrairement à ce qui est observé en ZP. La communauté des Collemboles endogés se compose également de 17 genres répartis dans

sept familles. À l'exception des horizons minéraux des aulnaies, la famille des Isotomidae domine largement dans les sols des stades de végétation considérés (Figure 4.1.4). Cette famille pourrait donc être potentiellement retenue comme bonne indicatrice d'alluvialité. Le genre *Folsomia* domine (Figure 4.1.4).

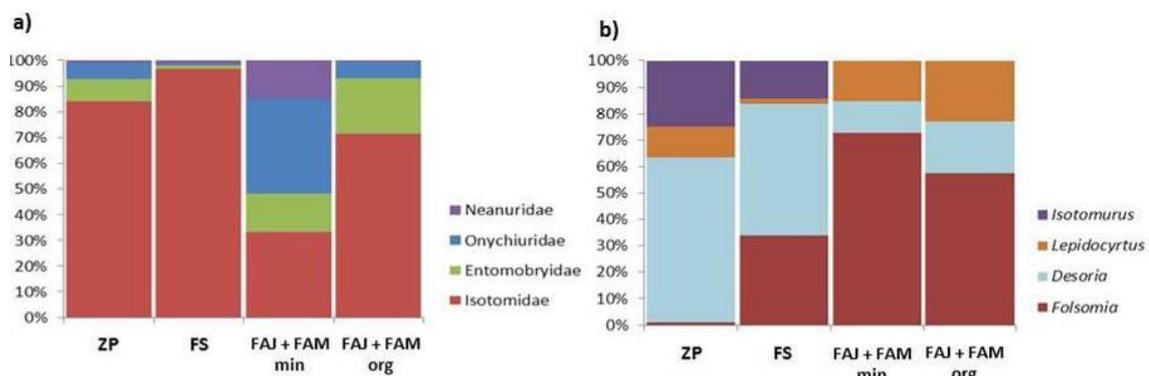


Figure 4.1.4 Proportions relatives des familles (a) et des genres (b) de Collemboles épigés dans les zones pionnières (ZP) et les forêts alluviales de saules (FS) et d'aulnes jeunes et matures (FAJ et FAM). Les horizons minéraux (min) et organiques (org) sont distingués.

La Figure 4.1.5 synthétise la répartition des communautés de Collemboles en fonction des caractéristiques écologiques et physicochimiques du milieu. Collemboles épigés et endogés se répartissent le long du gradient d'humidité et de teneur en matière organique, deux facteurs prépondérants de leur habitat.

Conclusion et perspectives

L'étude holistique conduite dans la vallée du Gasterntal (BE) a permis de mettre en évidence une importante diversité à différentes échelles d'organisation spatio-temporelle, du sol aux communautés faunistiques en passant par les formes d'humus. Cette étude confirme le rôle déjà évoqué d'indicateurs du milieu joué par les Lombriciens en zone alluviale (Bullinger-Weber et al., 2012 ; Salomé et al., 2011). Ainsi, au-delà de

l'approche descriptive et fonctionnelle, il apparaît qu'au même titre que les Lombriciens, les Collemboles sont de bons indicateurs de l'évolution des formes d'humus dans cette zone alluviale subalpine, en lien avec le stade d'évolution de la végétation. Teneurs en matière organique et texture sont les deux variables qui contrôlent la répartition des communautés faunistiques étudiées. Outre les aspects de biodiversité, Lombriciens et Collemboles ajoutent une composante fonctionnelle essentielle à une meilleure compréhension des systèmes alluviaux, en particulier à cet étage altitudinal. Ces groupes apportent ainsi des informations complémentaires de celles fournies par la végétation, à des échelles spatio-temporelles différentes. Il reste à démontrer si cette tendance peut être généralisée à différentes altitudes, dans des zones alluviales

semi-naturelles mais également revitalisées, afin de pouvoir mettre en évidence le rôle potentiel de la pédofaune en tant que bioindicateur de perturbations humaines.

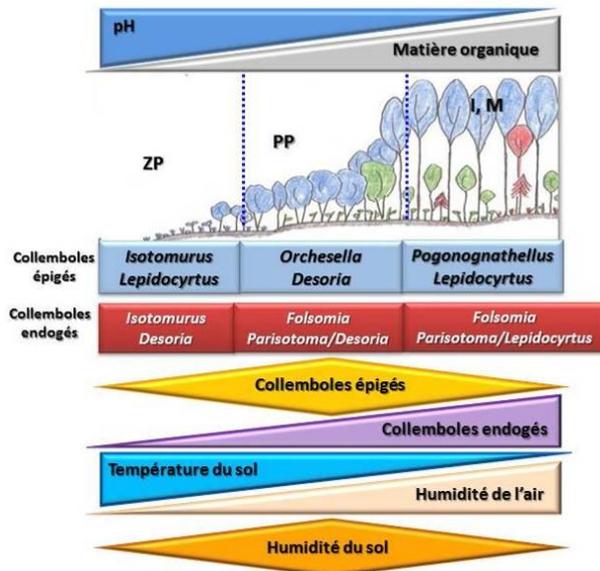


Figure 4.1.5 Répartition des communautés de Collemboles Arthropléones dans les zones pionnières, post-pionnières, intermédiaires et matures en fonction des caractéristiques du milieu (d'après Zigerli, 2011).

Bibliographie

- (1) Baize, D., Girard, M.-C., 2009. *Référentiel Pédologique 2008. Savoir faire*. Quae édition.
- (2) Bullinger-Weber, G., Guenat, C., Salomé, C., Gobat, J.-M., Le Bayon, R.-C., 2012. Impact of flood deposits on earthworm communities in alder forests from a subalpine floodplain (Kandersteg, Switzerland). *Eur J Soil Biol* 49, 5-11.
- (3) Gallandat, J.-D., Gobat, J.-M., Roulier, C., 1993. *Cartographie des zones alluviales d'importance nationale*, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
- (4) Guenat, C., Bureau, F., Weber, G., Toutain, F., 1999. Initial stages of soil formation in a riparian zone: Importance of biological agents and lithogenic inheritance in the development of the soil structure. *Eur J Soil Biol* 35, 153-161.
- (5) Jabiol, B., Zanella, A., Ponge, J.-F., Saffrioni, G., Englisch, M., van Delft, B., de Waal, R., Le Bayon, R.-C., 2013. A proposal for including humus forms in the World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO). *Geoderma* 192, 286-294.
- (6) Lawrence, A.P., Bowers, M.A., 2002. A test of the 'hot' mustard extraction method of sampling earthworms. *Soil Biol Biochem* 34, 549-552.
- (7) Petts, G., Amoros, C., 1996. *Fluvial Hydrosystems*. Chapman & Hall, London.
- (8) Salomé, C., 2011. *Distribution des communautés lombriciennes et pédogenèse en forêts alluviales : étude le long de deux gradients écologiques*. Doctorat es Sciences Thesis, Neuchâtel.
- (9) Salomé, C., Guenat, C., Bullinger Weber, G., Gobat, J.-M., Le Bayon, R.-C., 2011. Earthworm communities in alluvial forests: Influence of altitude, vegetation stages and soil parameters. *Pedobiologia* 54S, 89-98.
- (10) Widmer, A., 2013. *Caractérisation des formes d'humus alluviales sous aulnaies blanches subalpines*. Master Thesis, Neuchâtel.
- (11) Zanella, A., Jabiol, B., Ponge, J.F., 2011. A European morpho-functional classification of humus forms. *Geoderma* 164, 138-145.
- (12) Zigerli, D., 2011. *Relations entre le degré d'évolution de l'épisolum humifère et la pédofaune dans une zone alluviale subalpine (Gasterntal, BE, Suisse)- Focus sur les Collemboles*. Master Thesis, Neuchâtel.

4.2. La bio-minéralisation carbonatée : un petit tour d'horizon dans les sols

Eric Verrecchia

*Laboratoire Biogeosciences
Institut des Sciences de la Terre
Geopolis – Campus Mouline
Université de Lausanne
1015 – Lausanne
eric.verrecchia@unil.ch
Tél. 021 6924450*

Du concept de bio-minéralisation

Il est d'usage de considérer l'activité biologique dans les sols comme un facteur de formation de la structure, d'édification de la porosité, mais aussi comme une source et un acteur essentiel du recyclage de la matière organique elle-même. Bref, de nombreux aspects concernent bien entendu la chaîne du vivant, de la formation de la biomasse à sa décomposition la plus ultime en dioxyde de carbone. Pourtant, le vivant et le minéral sont bien plus intimement liés qu'il n'y paraît. Les organismes vivants du sol sont aussi une source très importante de bio-minéraux, en particulier carbonatés, bio-minéraux qui jouent un rôle essentiel dans l'édification de nombreux sols. La majeure partie des bio-minéraux carbonatés est constituée de calcite. L'aragonite restant très métastable en milieu continental, cette dernière ne concerne que quelques espèces à coquilles. On distingue plusieurs types de processus dans la formation des bio-minéraux. En premier lieu, cette formation peut être directement dictée par l'organisme. On parle alors de bio-minéralisation génétiquement programmée. C'est le cas par exemple des coquilles de mollusques ou des tiges et oogones de characées, et bien entendu squelettes et tests. Dans le cas d'absence de programmation génétique spécifique, la bio-minéralisation peut être soit induite, soit influencée par le vivant. Dans le cas où le vivant joue un rôle direct dans la précipitation de carbonate par son métabolisme, la bio-minéralisation est induite. En revanche, si le vivant ne sert que de catalyseur à la précipitation du fait de la présence de certaines macro-molécules ou de changements imprimés au milieu, alors la bio-minéralisation doit être considérée comme influencée par le vivant.

En tout état de cause, dans le cas de bio-minéralisation non programmée, la précipitation de carbonate liée au vivant dans les sols reste directement (ou indirectement) liée aux équilibres carbonatés, et donc entre autre, aux conditions de pression partielle de CO₂. Même si les bio-

minéraux se forment dans des cellules spécialisées, parfois avec l'aide de protéines spécifiques, ou sous les effets directs d'une activité métabolique, les conditions physico-chimiques liées aux équilibres carbonatés restent incontournables.

Quels sont donc les acteurs du vivant qui contribuent à la formation de bio-minéraux carbonatés dans les sols ? En fait, ils couvrent l'ensemble des cinq règnes du vivant : animaux, végétaux, champignons, bactéries, et plus exceptionnellement, protistes.

Les animaux: coquilles, constructions et biosphéroïdes

Les coquilles forment la catégorie la plus facilement observable des contributions bio-minérales aux sols. Les fragments de coquilles, en particulier celles des gastéropodes ou d'oiseaux, sont identifiables assez aisément, que ce soit macroscopiquement, à la loupe ou au microscope. Reconnaisables à leur structure cristalline organisée en couches lamellaires et/ou prismatiques, elles constituent un apport non négligeable de carbonate de calcium, en particulier dans les zones appauvries en calcaire comme dans certains sols tropicaux littoraux. Associés quelquefois aux coquilles de gastéropodes, on observe des bio-minéralisations de quelques millimètres, de forme sub-elliptique à cristaux subparallèles et parfois en couches concentriques. Ces objets correspondent à des opercules, sortes de couvercles construits par les escargots en phase de repos saisonnier.

Les insectes aussi contribuent à générer des accumulations carbonatées dans les sols, que ce soit les hyménoptères, les coléoptères ou les isoptères. Les hyménoptères et coléoptères construisent des formes de nids indurées de carbonate de calcium par un double processus de bio-minéralisation induite : l'agglomération de particules et leur cimentation par des excréments qui peuvent aussi servir de sites de nucléation pour la calcite secondaire (cas de certaines abeilles et de scarabées). Les isoptères (termites) sont connus de longue date pour avoir la faculté de provoquer la précipitation de carbonate de calcium dans les sols. Du fait des conditions extrêmement alcalines dans leurs intestins (de l'ordre de pH = 10 ; Köhler et al., 2012), les termites sont capables de précipiter directement du carbonate de calcium dans leur organisme, dans leurs excréments et les divers produits de déchets. De plus, dans certaines termitières, on peut observer des accumulations secondaires de carbonate de calcium soulevant le problème de leur influence directe (bio-minéralisation induite)

ou indirecte (bio-minéralisation influente) du fait des conséquences chimiques que ces insectes induisent en modifiant les conditions édaphiques locales. En tout état de cause, l'accumulation de carbonate de calcium peut atteindre 9 tonnes pour une seule termitière (Mujinya et al., 2011), changeant drastiquement les conditions du sol tropical sous influence.

Pour terminer, les vers de terre contribuent aussi à la bio-minéralisation carbonatée par la production de bio-sphéroïdes. Ces objets aisément reconnaissables en lame mince (Figure 4.2.1), sont générés par les glandes calcifères des vers et excrétées dans les turricules. La production peut atteindre dans certains sols 4.3 mg CaCO_3 par ver et par jour avec un rendement de 20 à 3000 mol $\text{CaCO}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Lambkin et al., 2011). Certaines limaces (Arionidés) produisent aussi des granules calcaires, ressemblant à des bio-sphéroïdes de vers, mais de forme et de structure interne différentes. Pour finir, certaines fèces et déjections d'animaux (comme ceux des ovins par exemple) contiennent de petites sphérulites fibroradiées d'oxalate et de carbonate de calcium et se retrouvent intégrées dans les sols. Elles servent souvent de marqueurs de l'élevage dans les sols archéologiques (Canti, 1999).

Végétaux... et minéraux

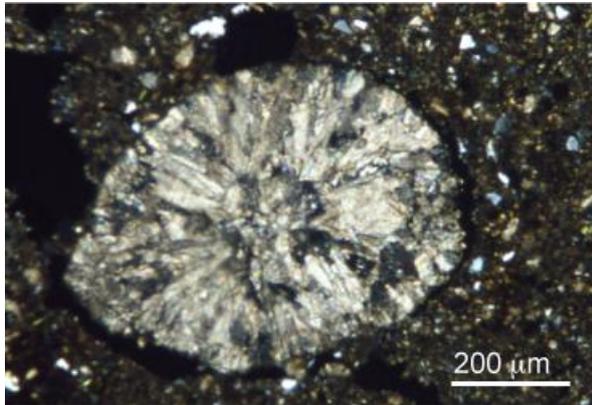


Figure 4.2.1 Exemple de bio-sphéroïde de ver de terre dans un sol de terrasse alluviale. Lumière polarisée analysée.

L'une des premières manifestations de la bio-minéralisation carbonatée liée aux plantes forme la vaste catégorie des rhizolithes. Terme introduit par les géologues, les rhizolithes sont des traces de racines qui ont été pétrifiées. Plusieurs cas de figures existent : soit la racine s'est décomposée et il ne reste que le manchon carbonaté induré, soit la racine elle-même se trouve minéralisée, conservant l'ensemble de sa structure comme dans un bois pétrifié. Les manchons carbonatés racinaires remontent à l'influence des premières plantes terrestres. De nos jours, ce sont des

objets communs dans les sols carbonatés sur arènes, comme dans les sols dunaires du pourtour méditerranéen. La plante, par sa capacité de succion des solutions du sol, les concentre jusqu'à provoquer la formation de nucléi. Les solutions péri-rhizosphériques sont en général assez fortement saturées vis à vis de la calcite car ce sont essentiellement des dépôts très fins (les micrites) qui sont observés, corroborant la multitude des sites de nucléation. Les rhizolithes comme témoins de l'activité végétale sont fréquemment utilisés dans la littérature géologique portant sur les paléosols. Associés à la rhizosphère, il n'est pas rare non plus de trouver des poils racinaires minéralisés en calcite. Dans ce cas, seule la partie externe de la racine avec ses cellules piliformes se trouve remplacée par des pseudomorphoses de cristaux de calcite.



Figure 4.2.2 Exemple de cellules racinaires calcifiées dans un brunisol sur loess. Lumière polarisée.

Dans le cas d'une trop grande disponibilité de calcium assimilable par la racine dans la solution du sol, aux seuils de toxicité de la chlorose par exemple, certaines plantes utilisent le vacuome pour inhiber cette toxicité du calcium en provoquant sa précipitation sous forme inerte de carbonate de calcium. Le monocristal de calcite peut ainsi croître dans les vacuoles, jusqu'au point d'envahir totalement la cellule et former de véritables moules de cellules racinaires: ce sont CRC (« *calcified root cells* » en anglais) ou *cellules racinaires calcifiées* (Figure 4.2.2). Dans certains sols, en particulier sur le pourtour méditerranéen, les CRC peuvent être tellement abondantes qu'elles forment un véritable sable cytomorphe, changeant ainsi la texture du sol et ses paramètres physico-chimiques. Pour en terminer avec le règne végétal, il ne faut pas oublier la capacité de certaines graminées à précipiter dans leurs tissus de petites sphérulites, souvent en oxalates, parfois en carbonate de calcium, mais aussi en silice amorphe. Ces

cristaux particuliers portent souvent le nom de phytolithes.

Le rôle fondamental des champignons

Les champignons sont des acteurs de première importance dans les sols. Décomposeurs, facteurs structurant des agrégats, agents de translocation des éléments, les champignons sont aussi capables de bio-minéralisation carbonatée. Surtout connus pour leur capacité à précipiter les oxalates de tout type (de Ca, mais aussi de Mg, Sr, Mn, Co, Cd, Cu, Fe, ou Zn ; Gadd, 1999), certains champignons se calcifient, formant ce que les géologues appellent des *filaments calcifiés* (« *calcified filaments* » en anglais ; Figure 4.2.3). Bien que certains de ces filaments semblent effectivement pouvoir être associés à des carbonatations, nombre d'entre eux ont été confondus avec des minéralisations d'oxalates dans la littérature.

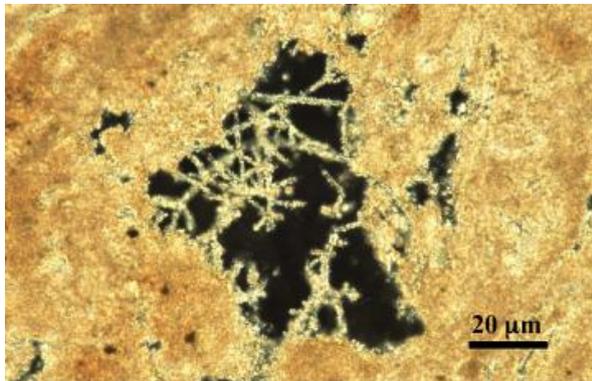


Figure 4.2.3 Exemple de filaments fongiques calcifiés. Il est probable que certains d'entre eux soient encore recouverts d'oxalate de calcium et non de carbonate. Sol carbonaté sur craie. Lumière polarisée analysée.

Bien plus spectaculaires et observables à l'œil nu, des cristaux particuliers de calcite peuvent être précipités en très grande quantité par les champignons dans certains sols, comme par exemple les calcosols du Jura sur dépôts de grèzes ou de cryoclastes (Figure 4.2.4). Ces accumulations forment des bandes blanches carbonatées sous forme de Bca ou de Cca, parfois indurées. L'essentiel de cette matière carbonatée est composée de millions de *cristaux de calcite en aiguilles* ou NFC (pour « *Needle Fibre Calcite* » en anglais).

L'origine et la caractérisation biogéochimique de la calcite en aiguilles ont fait l'objet d'études récentes qui ont non seulement démontré l'implication directe de la bio-minéralisation fongique (Bindschedler et al., 2010, 2012) mais aussi l'implication de ces bio-minéraux dans le cycle couplé du carbone et du calcium du sol, le carbone ayant une origine essentiellement liée à la respiration du sol (Millière et al., 2011).



Figure 4.2.4 Exemple typique de sol sur cryoclastes dont les horizons profonds sont totalement envahis par de la calcite d'origine fongique (horizon blanchâtre). Il est à noter que les horizons de surface sont très humifères alors que ceux de profondeur sont de texture grossière et essentiellement minéraux. Sol carbonaté du Jura suisse, canton de Neuchâtel.

La calcite en aiguilles revêt de multiples faciès et s'exprime sous des formes diverses (Figure 4.2.5), toutes connectées génétiquement à l'influence fongique. La calcite en aiguilles se formerait dans des cordons rhizomorphes, la nucléation trouvant des conditions favorables au sein des structures particulières des microtubules des hyphes et de leur capacité de translocation.

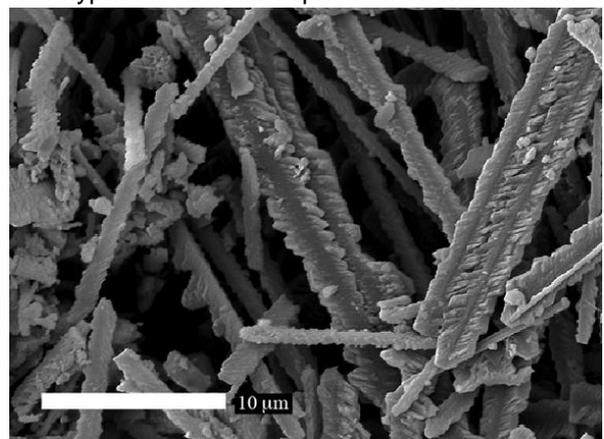


Figure 4.2.5 Exemple de calcite en aiguilles vue au microscope électronique à balayage. Echantillons d'un sol carbonaté du Jura suisse, canton de Neuchâtel.

Les champignons interviennent donc directement dans le cycle du carbonate de calcium des sols. Par leur capacité à explorer le milieu et à diffuser les cations tels que celui du calcium, ils induisent une bio-minéralisation dans leurs cordons en nucléant la calcite par le biais du calcium et des ions carbonatés de la solution du sol. Les

champignons ne semblent pas fractionner le carbone, car de fait, ils ne métabolisent pas les espèces carbonatées inorganiques mais les sources organiques de carbone. La calcite en aiguilles a donc la signature géochimique du carbone inorganique dissous dans la solution du sol, et par conséquent, essentiellement celle du dioxyde de carbone issu de la respiration.

Les bactéries : un rôle bio-minéralisateur ambigu

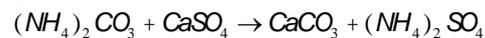
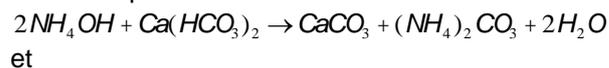
L'implication directe de bactéries dans la précipitation de carbonate de calcium via une biominéralisation programmée dans les sols n'est pas attestée. En revanche, leur rôle dans la modification des conditions édaphiques locales est incontestable. Ce rôle est dû à deux types d'influence sur la cristallisation: celui d'activités métaboliques particulières et celui de la formation de dépôts spécifiques constitués de substances exo-polymériques ou EPS (certains champignons sont aussi capables de produire ces EPS).

Par exemple, les mécanismes d'assimilation du CO_2 par les bactéries apparaissent liés à ceux de la régulation du pH intracellulaire, et donc des échanges ioniques, qui à leur tour restent dépendants de l'assimilation de bicarbonate et de calcium. Il semblerait que souvent, la précipitation de carbonate de calcium soit la réponse des communautés bactériennes hétérotrophes à un enrichissement de l'environnement en matière organique.

Autre contexte, dans la respiration anaérobie, l'oxydation de la matière organique peut également induire des précipitations de CaCO_3 . Un cas extrême consiste en la production de méthane biogénique en profondeur par des populations de bactéries méthanogènes qui transforment la matière organique dissoute issue de la surface en CO_2 et CH_4 . Cette transformation peut s'accomplir sous des sols très riches en matière organique ou sous des tourbes, dans des conditions phréatiques et anoxiques franches. Du carbonate de calcium secondaire peut alors précipiter dans les fissures de la roche en préservant la structure laminaire organique des colonies bactériennes (Lauriol et Clark, 1999).

La réduction par des bactéries hétérotrophes de nitrates et de sulfates mène aussi à la production de CaCO_3 . Toujours dans les milieux riches en sulfate de calcium (gypse), mais cette fois en présence des ions fer, l'activité bactérienne peut conduire à la précipitation concomitante de carbonate de calcium et de sulfure de fer. Un autre processus, similaire à la sulfato-réduction, se déroule lors de la déamination oxydante des

amino-acides par les bactéries aussi bien aérobies qu'anaérobies :



De nouveau, le résultat est la formation de dépôts carbonatés.

Enfin, il semblerait que la nature chimique des parois bactériennes contribue aussi à faciliter la nucléation de la calcite, en particulier par la présence de certains acides aminés et de groupements spécifiques comme les carboxyles (Braissant et al., 2003). La forme sphéroïdique est souvent associée aux cristaux trouvés dans ces films bactériens. Dans les sols carbonatés désertiques soumis à l'influence des tapis microbiens, il n'est pas rare de trouver des horizons indurés constitués de myriades de petites sphérolithes (Figure 4.2.6) et associés à des tapis de cyanobactéries. Dans ce cas, l'imprégnation des EPS des cyanobactéries par le CaCO_3 résulte des processus biogéochimiques suivants : 1) assimilation des ions HCO_3^- comme source de carbone pour la photosynthèse à partir d'un milieu calme et appauvri en CO_2 , 2) excrétion d'ion OH^- dans les gaines et formation d'un gradient d'alcalinité, 3) à la faveur de ce gradient, combinaison des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} dans les gaines et finalement, 4) précipitation de cristaux de calcite (CaCO_3).

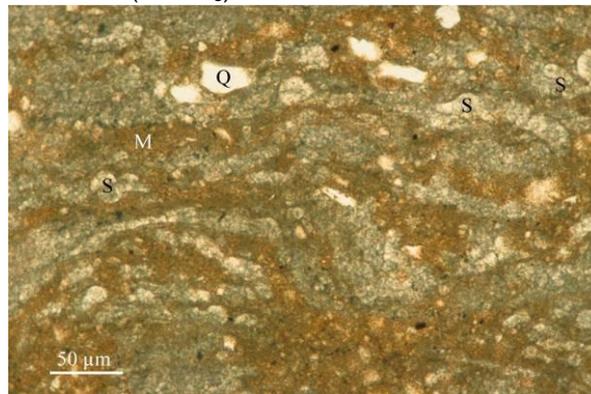


Figure 4.2.6 Exemple de sphérolithes de calcite associées à des tapis de cyanobactéries. Q : quartz, S : sphérolithes ; M : dépôt fin d'argiles et de carbonate (micrite). Sol à encroûtement carbonaté, Israël. Lumière polarisée.

L'ensemble de ces processus rend compte avant tout de l'étroite interaction entre monde microbien, voies métaboliques et environnement pédologique. Les bactéries constituent bien le moteur de la précipitation, mais par des voies externes de modification du milieu.

Quand tout un écosystème contribue à la bio-minéralisation carbonatée : la voie oxalate-carbonate

Dans le milieu tropical, l'ensemble des acteurs, végétaux, champignons, et bactéries, converge pour provoquer la précipitation de carbonate de calcium dans des sols où les conditions édaphiques devraient interdire tout dépôt de type calcaire : c'est la voie oxalate-carbonate. Certains arbres de la zone intertropicale produisent, lors de leur activité photosynthétique, de grandes quantités d'oxalate de calcium. Lors de la décomposition du bois du tronc et/ou des racines, les cristaux d'oxalate sont libérés dans le milieu pédologique, libération à laquelle contribuent certains termites terrioles. Responsables de la dégradation du bois, certains champignons sont à même de produire de grande quantité d'oxalate de calcium, contribuant ainsi au réservoir de ce sel organique. Or, ces cristaux sont très stables et très peu solubles dans les conditions de surface. Mais, il existe dans le sol des bactéries qui utilisent les sels d'oxalate comme source à la fois de carbone et d'électrons, les bactéries dites oxalotrophes. Ces bactéries, avec ou sans l'aide des champignons (Martin et al., 2012), ont accès aux cristaux disponibles dans le sol. Lors de l'oxalotrophie, les bactéries alcalinisent fortement le milieu faisant passer le pH des sols de 4.7 à plus de 8.5. L'oxalotrophie a également comme conséquence de libérer des ions hydrogène-carbonates, qui à des pH alcalins, se dissocient en carbonate. En présence de calcium dans la solution du sol et lors de phases de concentration des solutions, les carbonates pourront donc précipiter dans le sol sous forme de calcaire (Verrecchia et al., 2006).

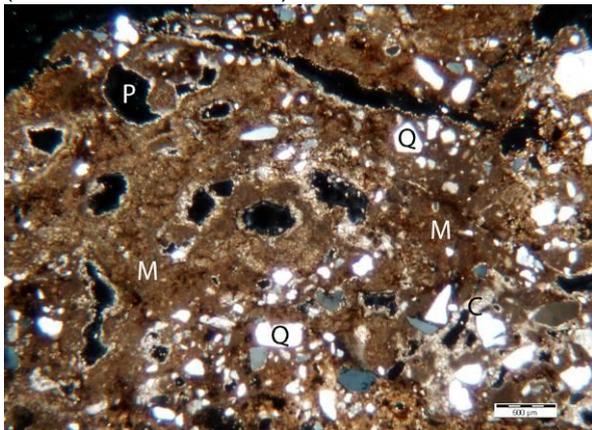


Figure 4.2.7 Effets de la voie oxalate-carbonate sur les sols tropicaux. Q : quartz, P : pores ; M : dépôt fin d'argiles, d'oxydes de fer et de carbonate (micrite) ; C : ciments calcitiques pédogéniques. Sol carbonaté en contexte ferrallitique (!), Côte d'Ivoire. Lumière polarisée analysée.

Le sol illustré en Figure 4.2.7 n'a plus aucune des caractéristiques d'un sol ferrallitique : bien que les quartzs soient préservés du fait de leur faible altérabilité, les oxydes de fer quant à eux, ne sont que sous forme de des traces, alors que la matrice est entièrement carbonatée et composée de carbonates fins micritiques. Des ciments secondaires d'origine pédogénique (microsparite) viennent indurer les zones d'accumulation. Ces sols, associés à la voie oxalate-carbonate et ses acteurs, constituent donc des écosystèmes au sens propre du terme et dont les caractéristiques biogéochimiques en font de véritables puits de carbone (Cailleau et al., 2011).

Conclusion

Les processus d'interaction entre le vivant et le minéral sont donc extrêmement nombreux lorsqu'on aborde la biogéochimie du carbonate de calcium dans les sols. Plantes, micro-organismes, animaux, tous ont la capacité de produire des bio-minéraux carbonatés et par conséquent de changer les conditions physico-chimiques des sols. L'étude de ces interactions prouve combien il est difficile de dissocier le vivant du minéral dans l'évolution de l'épiderme terrestre : s'il était vraiment nécessaire de le préciser, ces interactions soulignent une fois de plus que les sols sont des propriétés émergentes de la rencontre du monde vivant et du monde minéral dans les conditions de surface d'une planète bien singulière.

Remerciements

Certains des résultats exposés (calcite en aiguilles et voie oxalate-carbonate) ont fait l'objet d'un travail d'équipe. J'aimerais remercier les Profs P. Junier et M. Aragno (Unine), les Drs S. Bindschedler, G. Cailleau, M. Guggiari, et L. Millière (Unil), ainsi que les Drs O. Braissant (Unibas) et D. Job (Unine), et G. Martin (MSc Unil-Unine). Cette contribution a été rédigée lors d'un séjour académique à l'Università degli Studi di Milano rendu possible par la Fondation Herbette de l'Université de Lausanne.

Bibliographie

- (1) Bindschedler, S., Millière, L., Cailleau, G., Job, D., Verrecchia, E.P. (2010): Calcitic nanofibres in soils and caves: a putative fungal contribution to carbonatogenesis. *Geological Society, London, Special Publications* 336, 225-238.
- (2) Braissant O, Cailleau G, Dupraz C, Verrecchia EP (2003) Bacterially induced mineralization of calcium carbonate in terrestrial environments: the role of exopolysaccharides and amino acids. *J Sedim Res* 73:485-490
- (3) Cailleau, G., Braissant, O., and Verrecchia, E.P. (2011) Turning sunlight into stone: the oxalate-carbonate pathway in a tropical tree ecosystem. *Biogeosci* 8: 1755-1767.
- (4) Canti, M.G., 1999. The production and preservation of faecal spherulites: animals, environment and taphonomy. *J. Arch. Sci.* 26, 251-258.
- (5) Gadd, G.M., Poole, R.K. (1999): Fungal Production of Citric and Oxalic Acid: Importance in Metal Speciation,

- Physiology and Biogeochemical Processes. In: *Advances in Microbial Physiology*. pp 47-92. Academic Press.
- (6) Köhler, T., Dietrich, C., Scheffrahn, R.H., Brune, A. (2012): High-resolution analysis of gut environment and bacterial microbiota reveals functional compartmentation of the gut in wood-feeding higher termites (*Nasutitermes* spp.). *Appl Environ Microbiol* 78, 4691-4701.
- (7) Lambkin, D.C., Gwilliam, K.H., Layton, C., Canti, M.G., Pearce, T.G., Hodson, M.E. (2012): Soil pH governs production rate of calcium carbonate secreted by the earthworm *Lumbricus terrestris*. *Appl Geochem* 26, Supplement, S64-S66.
- (8) Lauriol, B., Clark, I. (1999): Fissure calcretes in the arctic: a paleohydrologic indicator. *Appl Geochem* 14, 775-785.
- (9) Martin, G., Guggiari, M., Bravo, D., Zopfi, J., Cailleau, G., Aragno, M., Job, D., Verrecchia, E., Junier, P. (2012): Fungi, bacteria and soil pH: the oxalate-carbonate pathway as a model for metabolic interaction. *Environ Microbiol* 14, 2960-2970.
- (10) Milliere, L., Hasinger, O., Bindschedler, S., Cailleau, G., Spangenberg, J.E., Verrecchia, E.P. (2011): Stable carbon and oxygen isotope signatures of pedogenic needle fibre calcite. *Geoderma* 161, 74-87.
- (11) Mujinya, B.B., Mees, F., Boeckx, P., Bodé, S., Baert, G., Erens, H., Delefortrie, S., Verdoodt, A., Ngongo, M., Van Ranst, E. (2011): The origin of carbonates in termite mounds of the Lubumbashi area, D.R. Congo. *Geoderma* 165, 95-105.
- (12) Verrecchia, EP, Braissant, O and Cailleau, G. 2006. The oxalate-carbonate pathway in soil carbon storage: the role of fungi and oxalotrophic bacteria. In: *Fungi in Biogeochemical Cycles*, Gadd, G M. (ed.) 289-310. Cambridge: Cambridge University Press.

Impressum Bulletin VBB-BSA n° 15/2013

Editeur

Groupe de travail *Biologie du sol – application*

Le groupe de travail BSA/VBB a été fondé en 1995, à l'initiative des services cantonaux de la protection des sols et de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Il traite essentiellement d'aspects de la biologie du sol en rapport avec la protection des sols et la conservation de leur fertilité dans le cadre de l'application de l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol).

Présidente depuis 2012

Claudia Maurer-Troxler

Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne – Service de la protection des sols
Rütti

3052 Zollikofen

Tél. 031 910 53 33

E-mail: claudia.maurer@vol.be.ch

Secrétariat et commandes

Paul Mäder

Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL)

Ackerstrasse

CH-5070 Frick

Tél. 062 865 72 32

Fax. 062 865 72 73

E-mail: paul.maeder@fibl.org

Le Bulletin est également disponible sur Internet:

<http://www.bafu.admin.ch/boden> > thèmes

>Biologie du sol