

Cycle des nutriments et de la matière organique dans des sols forestiers sous différents climats. Durabilité des forêts et des sols. Impact du changement climatique et de l'exploitation forestière.

Encadrement : Marie-Claire Pierret (Enseignante-chercheur, Institut Terre et Environnement Strasbourg ITES Université de Strasbourg).
Co-encadrement : Emilie Beaulieu (Maitresse de conférences, École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement Strasbourg (ENGEES)).

Contacts : marie-claire.pierret@unistra.fr - emilie.beaulieu@engees.unistra.fr

Le doctorant sera rattaché à ITES, Strasbourg. La thèse combinera du travail de terrain (échantillonnage, mesures in-situ, sur trois sites : Vosges, US, Kazakhstan), des analyses, et de l'expérimentation en laboratoire (expérimentation en batch et en colonne).

Mots clefs : sol, forêt, fertilité, nutriment, matière organique

Résumé : Cette étude propose de développer une approche via de l'expérimentation en laboratoire à partir de matériaux de terrain. L'objectif est de reproduire à plus petite échelle certains processus in-situ afin d'avoir une meilleure maîtrise sur les paramètres caractéristiques des réactions ce qui permettra d'améliorer leur compréhension, leur quantification et leur modélisation. L'expérimentation permet ainsi d'étudier les mêmes mécanismes et réactions que ceux qui ont lieu dans la nature mais avec des conditions connues et fixées et des paramètres contrôlables. L'objectif est d'étudier les phases qui constituent ce qu'on nomme le complexe argilo-humique CAH du sol et qui représente un réservoir type "boîte noire", encore mal caractérisé et difficile à modéliser, mais qui est probablement le matériel du sol le plus réactif et le plus riche en nutriments biodisponibles comme C, N, Ca, Mg, P ou K. L'expérimentation permettra également de caractériser et quantifier les paramètres nécessaires à l'amélioration de la prise en compte des processus de production des nutriments dans les modèles biogéochimiques existants. La question du devenir des nutriments et de l'évolution de la nature et du stock de la matière organique sont centrales et liées aux enjeux de l'étude de l'impact du changement climatique, de l'acidification ou de la sylviculture sur les écosystèmes forestiers, à différentes latitudes.

Contexte

La pression anthropique sur les forêts ne fait que croître avec des besoins qui ne faiblissent pas. Le bois, dont les utilisations industrielles sont multiples est souvent considéré comme une source renouvelable et donc associée au développement économique durable. Cependant, certaines conséquences de son exploitation, sur la biodiversité, l'érosion, la qualité des sols, le bilan carbone global ou le cycle de l'eau, mais aussi sur les populations traditionnelles sont loin d'être négligeables.

Par ailleurs, la santé des forêts ne peut être découplée de celle des sols. Or la fertilité des sols forestiers, dépend essentiellement de deux facteurs : l'environnement naturel responsable de leur fertilité « naturelle » (nature de ces sols, climat, couvert végétal) et l'utilisation/exploitation anthropique de ces sols qui peut fortement impacter et modifier cette fertilité.

Le complexe argilo-humique CAH est constitué d'un mélange complexe d'argiles et de matières organiques. Son architecture supramoléculaire dynamique est assurée par des liaisons faibles, de type électrostatique et des ponts cationiques, généralement calciques. Les argiles sont parfois mal cristallisées donc difficiles à identifier par les techniques de DRX. Elles peuvent également être un mélange entre différents pôles, impossible à déterminer analytiquement. La matière organique, quant à elle, est composée d'une multitude de molécules depuis les biomolécules végétales jusqu'à leurs produits de dégradation avec un spectre étendu de poids moléculaires depuis les lignines et cellulose jusqu'à l'acide acétique.

Les enjeux de cette thèse sont : 1) une meilleure caractérisation de la nature et la composition du CAH (des argiles et de la matière organique), 2) une meilleure compréhension et identification de sa réactivité et de sa stabilisation ; 3) une meilleure évaluation de son évolution dans le temps, que ce soit de sa nature ou de sa fertilité, et 4) une amélioration des modèles géochimiques déjà existants sur la prise en compte de ces processus. **Cette étude s'inscrit dans la suite d'une thèse ayant développé et validé la méthodologie et l'approche numérique.**

Les sites choisis

Nous proposons d'étudier en parallèle des sols provenant d'environnements différents, soumis à des pressions différentes et en suivant un gradient climatique (sols forestiers tempérés, boréaux, pergélisols).

Les sols forestiers de milieux tempérés sont des sols âgés de plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années. Nous travaillons sur les sols du bassin versant du Strengbach où justement les plantations forestières, et en particulier d'épicéas, montrent des signes de mauvaise santé avec un taux moyen de dépérissement compris entre 25 et 60% (classe III de pertes d'aiguilles, notation ONF). Ces sols, déjà caractérisés précisément, ont fait l'objet d'expérimentations dans le cadre d'une précédente thèse.

Les sols de régions boréales sont généralement des sols jeunes car développés sur des roches libérées des glaciers depuis 20 000 ans environs, et pauvres en nutriments. Le site en milieu boréal sera le Bear Brook Watershed in Maine (Nord Est des Etats-Unis). Les sols sont jeunes (10-12 000 ans), formés à partir de l'altération des till glaciaires. Ce sont des sols forestiers, acides, d'environ 1 mètre d'épaisseur, avec une différenciation nette des horizons et un couvert végétal de feuillus ou de résineux. Les sols sont acides avec des pH compris entre 3,7 et 4,7. La fraction échangeable est dominée par Al et H et les sols ont une réserve en cations nutritifs comme Ca et Mg très faibles

Les pergélisols sont des sols glacés qui, suite au réchauffement climatique (impactant encore plus fortement les régions arctiques), tendent à fondre sur des épaisseurs de plus en plus importantes et durant des périodes de plus en plus longues. Ces sols contiennent des teneurs en matières organiques importantes engendrant potentiellement des émissions de gaz à effet de serre (CH₄, CO₂) qui pourraient impacter fortement l'effet de serre avec des valeurs estimés entre 68 et 508 GtC Gigatons de

carbone. Nous étudierons des profils provenant de permafrost du Kazakhstan en collaboration avec l'Université Nazarbayev de Nur-Sultan City (ex. Astana).

L'expérimentation

Pour mener cette étude nous avons choisi de développer une approche originale qui consiste à étudier les sols non pas directement in-situ mais par le biais d'expérimentation en laboratoire. En effet, les sols sont un milieu extrêmement compliqué à caractériser entièrement. Par ailleurs une multitude de processus physiques, chimiques et biologiques ont lieu dans les sols qu'il est impossible de définir de manière totalement exhaustive, impliquant les phases minérales, les solutions, les plantes, les microorganismes, les litières, les racines, les gaz.

Au cours de nos expérimentations, où nous forcerons les échanges avec des protons en renouvelant les solutions, nous espérons d'une part déconvoluer les différentes sources des cations et de carbone via les réactions d'échange, mais aussi les stocks d'éléments dans les minéraux du sol puisque les réactions de dissolution pourront aussi avoir lieu, contrairement à l'utilisation des extractants seuls. La mesure des rapports isotopiques en Sr et en C de l'ensemble des sources potentielles, nous aidera à déconvoluer les différentes origines de ces éléments dans le temps.

L'idée sera de travailler via des expérimentations en laboratoire dans une démarche de modélisation analogique des processus naturels tout en réduisant leurs complexités. A la différence des approches expérimentales qui travaillent avec des phases organiques (fraction acides humiques standardisée) et minérales séparées (montmorillonite isolée), nous allons étudier des échantillons de sols naturels issus de différents horizons le long de profils pédologiques situés en milieux contrastés.

Les expérimentations seront en batch discontinus et en colonne, sur une durée de plusieurs mois (6 à 12 mois). Les solutions seront à pH=3.5 (similaire à l'acidité naturelle en milieu forestier). Elles seront analysées régulièrement pour suivre l'évolution de la réactivité du milieu (chimie minérale et organique, isotopie Sr, C). Cette approche expérimentale en batch n'est pas courante car ce type d'expérience est généralement réalisé pour étudier les phénomènes de sorption ou de désorption, sur des phases séparées et plus rarement sur des sols totaux. Les analyses avant/après des sols et des argiles (caractérisations pédologiques, minéralogiques, chimiques, et isotopiques) spécifieront les évolutions des phases primaires et l'apparition éventuelles de phases secondaires, ainsi que l'évolution de la matière organique au cours des lessivages. La détermination de la nature de la matière organique, sa réactivité et son évolution dans le temps sera réalisée grâce à la spectroscopie IR (NIRS, MIRS), RMN, UV et fluorescence, CPG, rapport isotopique du C ($\delta^{13}\text{C}$).

La modélisation

Depuis plusieurs années, des modèles numériques d'altération continentale (SAFE, WITCH) sont couplés à des modèles biosphériques (ASPECTS, LPJ) afin de prendre en compte le rôle de la végétation sur la composition chimique des eaux de surface et sur les interactions eau/roche à l'échelle de parcelle de sol ou bien de bassin versant. Cependant, une étude récente sur le bassin versant du Strengbach met en évidence le rôle clé joué par le complexe d'échange et les limites des modèles numériques actuels sur la prise en compte des processus d'échanges impliquant ce complexe et représentant une importante source de nutriments.

Les résultats attendus sont une meilleure caractérisation des phases organiques et argileuses dans des sols contrastés et une meilleure compréhension de leur réactivité et de leur évolution, en particulier pour le futur. Ces données permettront de mieux comprendre et modéliser la mobilité des nutriments et du carbone dans un contexte de questionnement sur le devenir de la fertilité des sols et la durabilité des forêts ou sur l'impact du réchauffement des sols gelés dans le bilan carbone global.

L'originalité de cette étude sera de combiner plusieurs outils issus de disciplines différentes (pédologie, minéralogie, isotopie, chimie organique, modélisation) sur des sites à des latitudes variées, en explorant une approche expérimentale en laboratoire pour mimer, en les simplifiant, des processus naturels, actuels ou futurs.

Ce travail permettra de suivre dans le temps les quantités (flux) de nutriments (Ca, Mg, P, C, N) extraits des sols par les solutions extractantes, leurs spéciations, et l'évolution de la nature de la matière organique dissoute (sa transformation, sa dégradation). Les analyses isotopiques aideront à caractériser l'origine des éléments entre les différents pôles possibles : atmosphère, minéraux, phases échangeables, matière organique, litière..., ainsi que l'évolution dans le temps des contributions de ces différents pôles.

Le modèle ainsi validé permettra de tester plusieurs scénarii futurs en termes de hausse de température, de modification des régimes pluviométrique, de changements d'espèces végétales ou de coupes forestières ...

Collaborations: Marie Noëlle Pons LRPG Nancy, Arnaud Legout et Berndt Zeller, INRA Nancy, Laurent Richard School of Mining and Geosciences - Nazarbayev University. Nur-Sultan city, Kazakhstan