

Impact du changement climatique sur le couplage des cycles biogéochimiques: interactions N, C, Mo, V dans les écosystèmes Arctiques : Interactions C-N-Mo-V en milieu Arctique

Contexte du projet:

Le changement climatique affecte tout particulièrement les régions Arctiques (IPCC, 2013). Le dégel du pergélisol (sol gelé en permanence) et la décomposition accélérée de la matière organique des sols sont responsables d'émissions de gaz à effet de serre, de production de matière organique dissoute, mais également de la libération d'éléments minéraux. En parallèle, la remontée vers le Nord de la limite des arbres (Berner et al., 2013), qui peut s'accompagner localement d'une augmentation de la proportion d'espèces ligneuses, est observée. Il en résulte une augmentation du rapport carbone/azote (C/N) de la biomasse, en association avec une plus grande disponibilité en N dans les sols (Weintraub and Schimel, 2003).

La stœchiométrie C/N est un facteur déterminant pour la composition des communautés microbiennes du sol (Eskelinen et al., 2009) et de leur métabolisme (Mooshammer et al., 2014), mais son impact sur le stockage de carbone reste controversé (Macdonald et al., 2018). En particulier, certains auteurs ont suggéré que l'augmentation des capacités de fixation du carbone par les plantes, rendue possible avec à l'élévation du CO₂ atmosphérique, pourrait conduire à une augmentation de la demande en N par les organismes (plantes et microorganismes du sol), induisant une limitation progressive de leur croissance par la disponibilité en azote (Luo et al., 2004). Ainsi, les changements évoqués ci-dessus (modifications de la disponibilité en azote du sol et changement de végétation) pourraient n'être que transitoires et la compréhension des conséquences des changements climatiques sur le fonctionnement de ces écosystèmes apparaît indispensable pour prévoir leur devenir.

Dans les écosystèmes, l'azote biodisponible provient principalement de la décomposition de la matière organique, qui permet de remettre en circulation l'azote organique, et de la fixation biologique de N₂ (réduction de N₂ atmosphérique en NH₃ bio-assimilable par les plantes). Ce dernier processus est réalisé par des bactéries (symbiotiques ou non dans les sols) et est catalysé par une métallo-enzyme, la nitrogénase, contenant du fer (Fe) et du molybdène (Mo) (Peters et al., 1995), ou du vanadium (V) comme substitut au Mo lorsque celui-ci est moins disponible (Darnajoux et al., 2019). La V-nitrogénase est moins efficace et plus facilement dégradable que la Mo-nitrogénase (Rees et al., 2017), mais compte tenu de la fréquente limitation en Mo des écosystèmes boréaux, la prise en compte de son rôle dans la modélisation des cycles biogéochimiques terrestres paraît indispensable (Darnajoux et al., 2019).

Les éléments Mo et V biodisponibles dans les sols ont pour origine le fond géochimique; Mo étant un élément rare environ 100 fois moins abondant que V dans les sols européens (Salminen, 2005). Actuellement, leurs cycles biogéochimiques globaux sont largement influencés et modifiés par les activités anthropiques (notamment la combustion des énergies fossiles et les activités minières; Nriagu & Pacyna, 1988, Gustafsson, 2019). Cependant, l'importance relative de cette remobilisation reste à démontrer dans les écosystèmes Arctiques. Si Mo est connu comme un élément trace essentiel pour de nombreux organismes (micro-organismes, plantes supérieures et mammifères), cette propriété reste encore à valider pour V, bien que ces deux éléments soient incorporés par les plantes à partir des formes chimiques solubles dans la solution du sol (Smedley, Kinniburgh, 2017). Leur biodisponibilité dépend de leur mobilité et donc de leur spéciation, une carence en Mo chez les plantes pouvant aussi bien être due à de faibles quantités de Mo qu'à la présence de Mo fortement lié à la matière organique en particulier (Marks et al., 2015). Ainsi, la disponibilité de Mo et V apparaît donc comme un facteur limitant pour l'incorporation de N dans les écosystèmes (Rousk, et al., 2017) et pourrait être également un régulateur important de l'apparition de la limitation progressive par l'azote (Liang et al., 2016 ; Trierweiler et al., 2018). En retour, l'augmentation attendue de la demande en azote pourrait conduire à une immobilisation de ces éléments dans la biomasse microbienne ou dans la biomasse végétale, et ainsi limiter progressivement la capacité de fixation de N par les écosystèmes.

La compréhension des conséquences du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes Arctiques, avec notamment, l'étude des interactions entre cycles biogéochimiques d'éléments majeurs et d'éléments traces nécessite la mise en commun de compétences multiples telles que l'étude de la diversité des organismes et des interactions écologiques, la géochimie minérale et organique et la physiologie des espèces, qui sont généralement portées par des communautés différentes.

Objectif de la thèse :

Dans ce contexte, la thèse se propose de tester les conséquences du changement climatique (fonte du pergélisol et remontée de la ligne des arbres) sur la diversité végétale et le fonctionnement des écosystèmes Arctiques, avec un focus particulier sur les interactions entre cycles de C, N et Mo/V.

Ces interactions seront testées sous l'angle du modèle conceptuel d'interactions proposé ci-contre (Figure 1) permettant ainsi d'associer, dans le cadre de la thèse une démarche expérimentale (mesure des quantités élémentaires dans les différents compartiments; voir ci-après) et de modélisation.

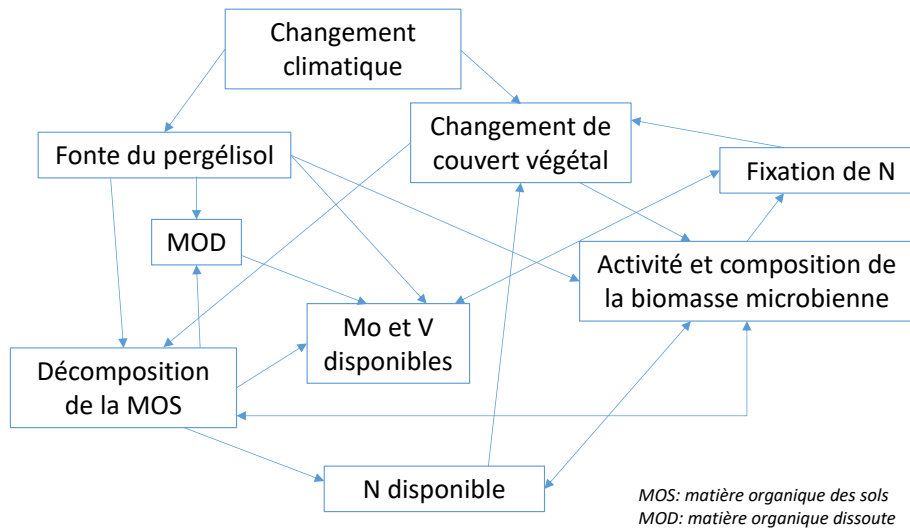


Figure 1: Modèle conceptuel d'interactions carbone-azote-molybdène-vanadium en milieu Arctique.

Le modèle conceptuel sera renseigné par les mesures suivantes, qui seront réalisées de part et d'autre de la limite des arbres et dans deux zones d'études : l'une avec un haut rapport Mo/V et l'autre avec un faible rapport Mo/V, au Nord de la Suède:

- Quantification de C et N dans la végétation (principales espèces), la litière, le sol (fractions particulière, dissoute, biomasse microbienne) ;
- Mo, V dans la végétation, la litière, le sol (fractions particulière, dissoute, complexée à la matière organique, complexée aux oxydes métalliques, biomasse microbienne du sol) ;
- Mesure du $\delta^{15}\text{N}$ dans la végétation (principales espèces), dans le sol (N total, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+)
- Quantification et identification des activités Mo-nitrogénase et V-nitrogénase par mesure à l'acétylène et signature isotopique $\delta^{13}\text{C}$ de l'éthylène produit (Zhang et al, 2016) ;

Le fait de se placer de part et d'autre de la limite des arbres a pour objectif de permettre la comparaison entre un système "avant réchauffement climatique" (présence de pergélisol, végétation rase de type toundra) et un système "après réchauffement climatique" (présence d'arbres, absence de pergélisol continu ou épaissement de la couche non gelée).

Les mesures de terrain permettront alors de tester le modèle conceptuel (Fig. 1) à l'aide d'approches statistiques telle que les modèles en équations structurées (voir par exemple Leloup et al, 2018).

Pris dans son ensemble, ce travail permettra de répondre aux questions suivantes :

- Mo et V sont-ils présents sous une/des formes utilisables par les plantes ?
- Cette disponibilité est-elle équivalente dans les sols de toundra et de taïga (forêt boréale) ?
- La fixation de N_2 sous toundra et taïga est-elle limitée par Mo ou par V ?
- Les écosystèmes boréaux resteront-ils limités en N ?

La question des interactions entre cycles du C et de N a permis d'établir plusieurs théories, sans qu'un consensus ait pu être trouvé (MacDonald et al., 2018). Nous proposons l'hypothèse que le cycle d'éléments traces tels que Mo et V constituent un facteur déterminant des interactions C-N. Ce travail de thèse associera principalement deux laboratoires aux compétences bien distinctes (iEES-Paris et

METIS), en s'appuyant sur des approches et des outils qui leur sont propres : l'écologie des interactions, la modélisation et l'isotopie pour le laboratoire iEES, la géochimie des éléments traces et de la matière organique des sols pour le laboratoire METIS. Ce travail sera également l'occasion de mettre en place des partenariats récemment initiés avec le *Department of Forest Ecology and Management* de l'*Université suédoise des sciences agricoles (SLU, Umeå)*.

L'ensemble des analyses moléculaires, élémentaires et isotopiques seront réalisées sur les plateformes de Sorbonne Université (CISE, ALIPP6, ALYSE, GEORG). Une demande de financement auprès des programmes nationaux EC2CO et internationaux INTERACT seront déposés (seconde soumission) pour le financement des analyses et des missions. En cas de non financement la première année, les analyses seront financées par les fonds propres des laboratoires.

Références

- Berner LT, *et al* (2013) Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia. *Global Change Biology* 19: 3449–3462.
- Darnajoux D, *et al* (2019), Molybdenum threshold for ecosystem scale alternative vanadium nitrogenase activity in boreal forest, *PNAS* 116, 24682–24688.
- Eskelinen A, Stark S, Männistö M (2009) Links between plant community composition, soil organic matter quality and microbial communities in contrasting tundra habitats. *Oecologia* 161, 113-123.
- Gustafsson, (2019) Vanadium geochemistry in the biogeosphere -speciation, solid-solution interactions and ecotoxicity, *Applied Geochemistry*, 102, 1-25
- Leloup J, (...) Raynaud, X (2018). Unravelling the effects of plant species diversity and aboveground litter input on soil bacterial communities. *Geoderma* 317, 1–7.
- Liang J, *et al* (2016). Processes regulating progressive nitrogen limitation under elevated carbon dioxide: a meta-analysis. *Biogeosciences* 13, 2689–2699.
- Luo Y, *et al* (2004). Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *Bioscience* 54, 731–739.
- Macdonald, CA, *et al* (2018) Soil nutrients and soil carbon storage: modulators and mechanisms. In B. K. Singh (Ed.), *Soil Carbon Storage: Modulators, Mechanisms and Modelling* (pp. 167-205).
- Marks *et al* (2015). Soil organic matter regulates molybdenum storage and mobility in forest. *Biogeochemistry*, 125, 167-183.
- Mooshammer M, *et al* (2014) Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon:nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. *Nature Communications* 5: 3694.
- Nriagu & Pacyna, 1988, Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals, *Nature*, 333, 134-139
- Peters JW, Fisher K, Dean DR (1995) Nitrogenase structure and function: a biochemical-Genetic perspective. *Annual Review of Microbiology* 49, 335-366
- Salminen R, Tarvainen T, Vos WD, (2005). *Geochemical atlas of Europe. Background information, methodology and maps Part 1* Part 1. Geological Survey of Finland, Espoo.
- Smedley, Kinniburgh, 2017) (Molybdenum in natural waters: a review of occurrence, distribution and controls); *Applied Geochem* 84, 387-432.
- Rees et al., (2017) Comparative electronic structures of nitrogenase FeMoco and FeVco, *Dalton trans.*, 46, 2445.
- Rousk K, *et al* (2019) Molybdenum and phosphorus limitation of moss-associated nitrogen fixation in boreal ecosystem. *New Phytologist*, 214, 97-107.
- Trierweiler A, *et al* (2018). Rising CO2 accelerates phosphorus and molybdenum limitation of N2-fixation in young tropical trees. *Plant & Soil* 429, 363–373.
- Weintraub MN, Schimel JP (2003) Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in Arctic tundra soils. *Ecosystems* 6, 129–143.
- Zhang, X (2016). Alternative nitrogenase activity in the environment and nitrogen cycle implications. *Biogeochemistry* 127, 189–198.