

Atelier 7 : interactions biotique-abiotique

Philippe CHOLER, Mélanie AUFFAN, Odile BRUNEEL, Corinne CASIOT, Françoise ELBAZ-POULICHET, Jérôme ROSE ...

Introduction

Les Surfaces et Interfaces Continentales constituent des zones de couplages entre le milieu physique (*abiotique*) et le vivant (*biotique*). En ce sens, la problématique des liens entre compartiments biotiques et abiotiques est consubstantielle à l'étude de la zone critique. Les multiples déclinaisons autour de ce thème se rattachent naturellement aux grandes recherches portées par la communauté SIC : couplages entre climat et fonctionnement des écosystèmes, rôle du vivant dans les grands cycles biogéochimiques, écotoxicologie et dynamique des xénobiotiques, interdépendances entre sociétés humaines et environnement. Quelles que soient les échelles de temps ou d'espace qui sont privilégiées, ces questions nécessitent toujours le regard croisé des géosciences, des sciences du vivant et des sciences humaines et sociales. Les études de long terme, qui connaissent une poussée spectaculaire avec le développement de la recherche sur les changements globaux, nécessitent par essence de prendre en compte tous les couplages forts existant entre sous-sol, sol, végétation et atmosphère. Sans cette prise en compte, un certain nombre de processus interactifs ne pourraient être traités de manière satisfaisante (stockage et émission du carbone par exemple).

Les propositions de cet atelier visent à dégager quelques grandes lignes programmatiques pour lesquelles les processus couplés biotique-abiotique mériteraient d'être mieux observés, mieux compris et enfin mieux représentés dans les modèles. Dans le document qui suit, nous avons choisi de mettre l'accent sur des enjeux scientifiques qui représentent autant de verrous de connaissance et qui sont suffisamment génériques pour concerner différents types d'environnements (continental, marin etc). Nous avons également cherché à être complémentaire des réflexions menées dans le cadre de la prospective INEE 2017 et plus particulièrement de son atelier *Biosphère-Géosphère : approches intégrées* (cf. annexe) qui à bien des égards est un exercice similaire à celui mené par la communauté SIC¹.

Volet 1. Le vivant et le climat : actions et rétroactions.

- *Enjeu 1.1 : le climat et la diversité fonctionnelle.* L'approche par enveloppe (niche) climatique doit être étendue à la diversité non taxonomique afin de mieux saisir quelles sont les variables physiques de l'environnement qui déterminent la distribution spatiale des propriétés fonctionnelles du vivant. Cela peut être conduit pour des types fonctionnels (par exemple la répartition des plantes en C3 ou C4), de propriétés fonctionnelles des assemblages d'espèces (par exemple la teneur en azote dans les canopées). Les structures de co-variances entre traits fonctionnels (notion de compromis fonctionnel) ou entre grands types fonctionnels (relations entre grands compartiments de biomasse) doivent également être mieux reliés aux forçages climatiques.
- *Enjeu 1.2 : du changement climatique au changement bioclimatique.* Les grandeurs physiques mesurées en sciences du climat sont rarement celles qui sont perçues directement par les organismes. Il nous faut mieux cerner la manière dont les changements climatiques globaux se répercutent sur les conditions micro-bio-

¹ Il est proposé que la communauté SIC participe à l'animation de l'atelier biosphère-géosphère lors des journées prospectives de Bordeaux (février 2017) et que les animateurs de l'atelier INEE *Biosphère-Géosphère* fassent de même lors des prospectives SIC (*comm. tél. avec F. Guy en janvier 2017*). A l'issue de ces journées, nous examinerons selon quelles modalités les contributions des uns et des autres peuvent être à (chapeau commun ou davantage).

climatiques dans lesquelles se réalisent les fonctions du vivant (par exemple comment des changements de régime de précipitation modulent-ils la disponibilité en eau dans les horizons racinaires ? ou comment la dynamique saisonnière de l'enneigement conditionne-t-elle le climat du sol durant la saison défavorable ?)

- *Enjeu 1.3 : l'effet du vivant sur le climat.* Les rétroactions du vivant sur le milieu physique restent sous-étudiées. Ces questions peuvent être abordées depuis une échelle très locale (par exemple comment les traits comportementaux ou architecturaux d'espèces ingénieurs modifient les conditions physiques locales, notion de construction de niche) jusqu'à une échelle globale (par exemple le lien entre la dynamique des végétations sous-ligneuses dans l'arctique et le bilan radiatif par modification de l'albédo, les effets de l'évapotranspiration des couverts en domaine semi-aride sur les régimes locaux de précipitation).
- ...

Volet 2. La place du vivant dans les grands cycles de matière.

Texte à enrichir en insistant davantage sur l'effet du vivant sur les cycles.

Le devenir des éléments (nutriments et contaminants) au sein de la zone critique résulte d'actions et de rétroactions complexes entre le monde du vivant et le monde minéral.

- *Enjeu 2.1 : Stœchiométrie des écosystèmes & métabolisme des interfaces (sol, sédiment).* Quelles sont les principales (co)-limitations en nutriments des grands processus écosystémiques (productivité primaire, décomposition) ? De nouvelles méthodes d'analyse (omiques, activités éco-enzymatiques) appliquées aux milieux d'interface (sol, sédiments) offrent des possibilités de caractériser les variabilités spatiales et temporelles des grandes fonctions microbiennes en lien avec les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore. Ces données complètent les estimations de la stœchiométrie C:N:P des compartiments de biomasse. Elles fournissent une vision plus complète des stratégies d'acquisition/conservation/immobilisation des nutriments à différents niveaux trophiques et permettent de mieux en saisir les conséquences pour le fonctionnement des écosystèmes.
- *Enjeu 2.2. Traits fonctionnels microbiens.* En complément à la caractérisation de la biodiversité des milieux d'interfaces (approches par ADN environnemental), il est nécessaire de mieux comprendre quelles sont les fonctions exprimées par les grands compartiments de la biomasse et comment ces fonctions répondent aux variations de l'environnement (changements climatiques, changements d'utilisation des terres, xénobiotiques etc). Un défi est l'identification de propriétés ou types fonctionnels pour la biodiversité des sols et des sédiments. Un objectif est de mieux représenter cette biodiversité fonctionnelle dans les modèles biogéochimiques (par exemple en incorporant des modèles de dynamiques de biomasse ou d'activités enzymatiques spécifiques).
- *Enjeu 2.3. Dynamique du vivant – dynamiques des pools (stocks ?)* Les réponses des écosystèmes aux changements globaux (climat, utilisation des terres, cycle de l'eau) ont des répercussions sur la taille des pools de matière des grands cycles (C,N,P). La contribution des effets directs ou indirects (c'est-à-dire médiés par la dynamique du vivant) de ces changements reste mal comprise. Par exemple, l'effet du réchauffement sur les écosystèmes arctiques et alpins favorise la dynamique ligneuse et un stockage plus important de carbone dans la biomasse tout en procurant des conditions plus favorables à la minéralisation de la matière organique du sol. La question de l'érosion des sols nécessite également de mieux articuler les

forçages climatiques (par exemple la récurrence d'événements de précipitations extrêmes) et la dynamique de la végétation dans les bassins versants elle-même très dépendante des usages du sol. Le cas particulier du carbone et de sa dynamique dans les sols se heurte à de nombreux verrous. En effet la matière organique des sols, majoritairement composée de carbone, et participant à quatre grands services écosystémiques (résistance des sols à l'érosion, leur rétention en eau, leur fertilité pour les plantes et leur biodiversité) est issue du vivant et interagit fortement avec le minéral. Par exemple des travaux récents ont montré que la présence de matières organiques dans le sol bloque la croissance cristallographique des phases minérales secondaires. Ces interactions à nano-échelle permettent de proposer des mécanismes de stabilisation du C dans les sols associant à petite échelle deux processus d'interactions organo-minérales avec des dynamiques découplées, en rupture avec les mécanismes classiquement présentés. Mais comment le vivant contrôle ou réagit à la dynamique de ces phases organo-minérales?

- *Enjeu 2.4 Cycle des contaminants et interactions avec le vivant* ». La compréhension des mécanismes biotiques et abiotiques impliqués dans la dynamique et l'impact des contaminants qu'ils soient naturels ou anthropiques (éléments organiques, inorganiques, radioéléments, nanoparticules, médicaments, perturbateurs endocriniens, xénobiotiques, etc) ainsi que leurs effets « cocktails », représente un enjeu majeur pour l'environnement et la santé humaine. Les questions de biodisponibilité et d'écotoxicité ont fait l'objet de nombreux travaux, mais des verrous existent toujours et en particulier, dans le cas de contaminations diffuses à de faibles doses sur des temps longs. Beaucoup de questions demeurent sur la dynamique et l'impact des polluants (transformations microbiennes, cycles biogéochimiques des éléments, écologie des écosystèmes anthropisés, ou toxicité biologique, etc). Par exemple : en quoi la réaction du vivant à une exposition sur le long terme affecte la dynamique des contaminants eux-mêmes (transferts, transformations). Quelle est la dynamique des contaminants dans le cas de phénomènes de résistance ou résilience des organismes ? Quelle est la contribution des fluides excrétés par les plantes (parties racinaires et aériennes (guttation, évapo-transpiration) aux transferts des contaminants dans l'écosystème ? Le développement de nouveaux outils (méthodes Omics, isotopes utilisés comme traceurs, techniques d'imageries, etc.), ou l'utilisation de plates formes adaptées type Ecotron, permettra d'apporter un nouvel éclairage sur l'étude des écosystèmes anthropisés, et aidera à la mise en place de solutions de remédiation innovantes. Ces avancées nécessitent un travail pluridisciplinaire aboutit alliant, sans être exhaustif, géochimie, microbiologie, hydrologie, pédologie, minéralogie, toxicologie, santé ou sciences sociales. La modélisation du comportement de ces contaminants, de leur devenir et effet sur l'environnement et la santé humaine, représente également un outil important pour mieux appréhender les processus en jeu, et peut être d'une grande aide dans la gestion des risques induits, pour les décideurs publics.

Volet 3. Dynamiques du milieu - trajectoires du vivant: couplages – découplages.

- *Enjeu 3.1. Articulation entre processus lents et processus rapides*. L'un des problèmes liés à la représentation des liens entre le biotique et l'abiotique est celui de l'articulation entre des processus lents et des processus rapides. Un exemple est celui de l'articulation entre des pulses de ressources déclenchées par des événements de précipitations en région semi-aride ou de fonte du manteau neigeux dans les régions froides et le déclenchement d'une cinétique plus lente de croissance végétale et d'immobilisation des ressources dans la biomasse. Un exemple de découplages temporels entre biotique et abiotique est le retard qui est observé dans

la réponse des espèces aux changements climatiques globaux (notion de dette climatique). L'exploration de ces couplages que ce soit au niveau expérimental ou soit au niveau théorique reste encore limitée de même que ses conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes.

- *Enjeu 3.2. Identification de points de bascule.* Comment les couplages entre compartiments biotique et abiotique concourent-ils à expliquer des changements de régime dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes ? Exemple des relations entre herbivorie - cycle de l'azote - et végétations dominées par les graminées pérennes et basculement possible vers des formations arbustives. Exemple des relations entre la végétation redistribution locale du manteau neigeux – le régime thermique des sols et le fonctionnement microbien des sols.

Enjeu 3.3. Exposition à court et long-terme aux xénobiotiques. Comment les réponses du vivant à des expositions à court terme à des concentrations élevées informent-elles sur des effets sur le long terme à des concentrations faibles ? Un exemple est celui des contaminants émergents pour lequel par définition peu de recul existe. La mise en place d'expérimentations adaptées aux expositions sur le long terme (exemple des mésocosmes aquatiques ou terrestres) demandent à être renforcées. Elles permettront d'identifier les mécanismes biologiques de défenses contre ces polluants émergents.

ANNEXES :

1. Texte complémentaire sur les MOS (à intégrer plutôt dans l'atelier Matières Organiques du Sol ?)

- Le fonctionnement des écosystèmes est dépendant des interactions multi-échelles entre leurs constituants biotiques et abiotiques. Un bon exemple est fourni par le compartiment matière organique du sol (MOS) qui joue un rôle primordial au sein des écosystèmes terrestres et, au-delà, au sein des surfaces continentales dans leur ensemble. Ce compartiment a en effet la capacité de réguler le climat *via* sa fonction puits ou source de CO₂, mais aussi d'autres gaz à effet de serre (N₂O, CH₄...). Alors que des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années dans la caractérisation des cortèges moléculaires qui composent ce compartiment et sont impliqués dans sa dynamique, les interactions complexes existant entre le compartiment MOS, la végétation et la biomasse microbienne du sol, ainsi que les contrôles qu'exerce en retour ce compartiment sur la biodiversité de l'écosystème sol, demeurent très peu connus. Malgré des avancées importantes, les processus conduisant à la stabilisation à long terme des MOS ne sont également que partiellement élucidés. S'il est de plus en plus clair aujourd'hui que la « récalcitrance » biogéochimique n'est pas le processus clé, il reste encore à décrypter dans le détail les processus alternatifs de protections physiques et physicochimiques. La MOS est aussi la principale source de carbone organique transféré vers les eaux de surface. La caractérisation des formes de ce carbone organique et la quantification des flux allant des écosystèmes terrestres vers les écosystèmes aquatiques demeurent des enjeux majeurs pour l'évaluation des effets de ces transferts sur le cycle global du carbone et les fonctions écologiques associées.

2. Texte complémentaire sur la partie écodynamique des polluants

- La compréhension des mécanismes biotiques et abiotiques contrôlant la dynamique et l'impact des contaminants à grande échelle (paysage, bassin versant...) est donc un enjeu majeur dans le contexte des services écologiques (préservation, altération,

remédiation). Cet enjeu requiert d'être capable de modéliser les processus impliqués et leurs facteurs de contrôle, c'est-à-dire d'en décrypter le fonctionnement à l'échelle la plus élémentaire. Les mécanismes moléculaires impliqués se répercutent en effet à tous les niveaux de l'organisation biologique, jusqu'à la modification du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère, *sensu lato*. Une compréhension à l'échelle moléculaire permet de minimiser la perte d'information lors des nécessaires changements d'échelles spatiales ou temporelles. Elle s'appuie sur des connaissances en physicochimie des interfaces et en biogéochimie et fait également appel aux disciplines de la biologie, en particulier la physiologie, l'écologie et l'écotoxicologie, pour ce qui concerne les interactions avec et entre les systèmes biologiques. Enfin, dans la zone critique, l'homme est non seulement la cible directe des contaminants en tant que maillon terminal des réseaux trophiques, mais aussi le responsable des causes, des conséquences et des décisions en tant qu'agent de remédiation et de gestion (Fig. 1).

3. Texte complémentaire sur les enjeux en modélisation (à intégrer dans l'atelier Modélisation ?)

- *Couplage d'approches 'mécanistique' et 'intégrative'*. Actuellement, une évaluation du risque environnemental associé à l'émergence des nouvelles technologies est rendue impossible au cas par cas et *via* des approches dites 'classiques'. En effet, cette tâche est rendue difficile par les incertitudes sur les quantités utilisées, mais aussi la complexité des propriétés complexité croissantes des matériaux auxquels nous sommes réellement exposés dans notre société. Traiter la question du risque pour l'Homme ou l'Environnement des xénobiotiques montre donc ses limites. A l'aide de modèle de type bayésiens, il sera possible de produire des prévisions des risques associées à des niveaux d'incertitudes. Ces modèles associés à des expérimentations adaptées (exemple des mésocosmes terrestres ou aquatiques) prendront en compte la complexité des processus qui vont gouverner l'exposition (et les impacts) et donc le risque potentiel. L'avantage des résultats obtenus dans les mésocosmes en termes d'exposition et d'impact est de pouvoir d'obtenir des données d'entrées plus réalistes afin de diminuer ces niveaux d'incertitudes. Cela permettra à terme d'aboutir à de modèles de prévisions des risques liés aux nanotechnologies plus pertinents.

