

VII

ÉCOGÉOCHIMIE

Coordinateurs : L. Abbadie, N. Le Bris

Cet atelier s'est déroulé dans le cadre de la prospective Écologie chimique mais en parallèle des autres ateliers. En effet, cette discipline émergente partage avec l'Écologie chimique un certain nombre de problématiques (ex : impact des perturbations environnementales) et d'objets d'étude (ex : communautés microbiennes et associations symbiotiques, interactions organismes-environnement) et d'outils (ex : « Omiques ») mais fait appel au développement de nouveaux concepts. Des ponts entre les deux domaines seraient intéressants à renforcer, sans toutefois chercher à réduire l'Écogéochimie à la dimension « interaction entre organismes et molécules du vivant ».

Les impacts anthropiques conjugués sur l'environnement et la biodiversité concernent aujourd'hui toute la biosphère, jusqu'aux régions les plus reculées du globe (pôles, forêts tropicales, océan profond). Les perturbations à différentes échelles impliquent généralement des modifications des propriétés physico-chimiques de l'environnement, soit directement par l'augmentation de la teneur en certains composés (ex : contaminations par des substances organiques ou minérales, acidification liée à l'augmentation du CO₂ dissous dans l'eau de mer ou dus aux dépôts de polluants atmosphériques sur les sols), soit comme conséquence indirecte de modification de la diversité biologique (ex : eutrophisation, anoxie, érosion liée à la déforestation). La Biologie des organismes permet de prendre en compte ces contraintes sur la distribution des espèces et les structures de populations via les seuils de tolérance des espèces, les mortalités induites, ou les réponses métaboliques des individus aux facteurs de stress, et la biodisponibilité des éléments essentiels. **Aujourd'hui, les concepts et les outils manquent cependant pour appréhender**

les impacts de contraintes abiotiques multiples à différentes échelles spatio-temporelles sur des communautés diversifiées et en interactions, et plus encore sur les rétroactions mises en œuvre. Par exemple, appréhender les conséquences de l'accroissement des épisodes hypoxiques dans les régions côtières nécessite de considérer non seulement les réponses des différentes espèces à différents seuils d'exposition (létaux, sublétaux), à différents stades de leur cycle de vie, mais aussi leur influence sur la teneur en oxygène et la production de composés toxiques (par ex. H₂S) dans l'habitat. En milieu terrestre, des questions similaires se posent pour appréhender les conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes de substitution d'espèces végétales induites par le changement global. La remise à disposition des éléments minéraux dans le sol via la décomposition des litières nécessite notamment de mieux connaître les processus de rétroactions impliqués et par exemple les conséquences de modifications éventuelles de ce cycle sur le métabolisme primaire et secondaire de ces espèces.

VII.1

Nécessaire convergence de la Chimie environnementale, de la Biogéochimie et de l'Écologie

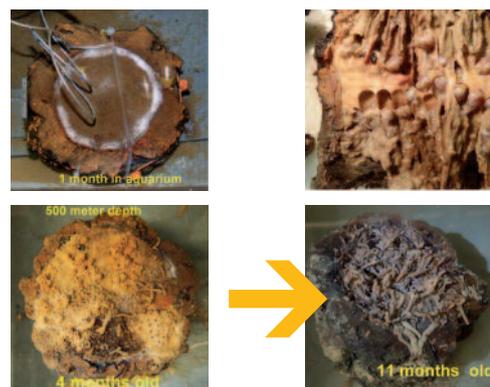
Traditionnellement, les études aux interfaces entre la Chimie et la Biologie des écosystèmes sont développées au sein de deux domaines disciplinaires : (1) les Sciences chimiques de l'environnement ; (2) la Biogéochimie*. Les Sciences chimiques de l'environnement qui incluent au sens large la Chimie et la Géochimie des milieux aquatiques continentaux et marins et des sols et la Physico-chimie de l'atmosphère, apportent une contribution essentielle à l'étude du fonctionnement des écosystèmes. Il en va de même pour l'étude des processus biogéochimiques et de leur rôle dans les flux de matière et d'énergie. Pour autant, l'intégration des approches proposées dans ces deux domaines avec l'Écologie des écosystèmes est encore très peu développée.

Les modèles écologiques actuels rendent peu compte de la diversité des interactions entre communautés d'organismes et les composantes chimiques de l'environnement. Alors que la complexité des interactions biotiques (prédation, compétition pour l'espace, symbiose, médiation chimique) est de mieux en mieux prise en compte, les facteurs chimiques sont le plus souvent considérés sous forme de contraintes « externes ». Loin d'être extérieures au système écologique, ces contraintes chimiques et leurs effets sont fortement dépendants de l'activité des organismes et de la structuration des communautés. Les assemblages d'organismes modulent en effet les conditions de l'habitat et peuvent ainsi atténuer ou au contraire amplifier ces contraintes, voire même induire eux-mêmes localement des contraintes chimiques fortes. De fait, les relations entre biodiversité, fonctions et fonctionnement des écosystèmes soumis à des perturbations dépendent étroitement de ces relations réciproques à l'échelle des habitats (ex : production, décomposition de composés organiques et recyclage des éléments nutritifs des sols ; couplages entre diversité des macrophytes et stockage du carbone dans les herbiers marins).

De son côté, la Biogéochimie se définit comme un champ disciplinaire étudiant les capacités de recyclage des éléments (e.g. C, N, S, P) à l'échelle des écosystèmes. Sur cette base sont construits des modèles écologiques quantifiant les flux entre compartiments trophiques, à partir des ressources disponibles. Néanmoins, le rôle des interactions non-trophiques entre organismes dans

ces transformations biogéochimiques est encore peu pris en compte, alors que la notion même de biodégradabilité dépend directement de ces interactions, elles-mêmes modulées par l'environnement abiotique. Ainsi le « priming effect » permet la biodégradation de composés considérés comme réfractaires (ou récalcitrants) grâce à des interactions mutualistes soutenues par la disponibilité d'une ressource organique labile. Ce phénomène influence en retour les processus d'eutrophisation, d'acidification, etc. Par ailleurs, la réactivité chimique « abiotique » de l'environnement est souvent négligée. Les réactions abiotiques sont souvent considérées, à tort, comme lentes aux échelles caractéristiques du vivant. Les avantages offerts par les mécanismes de catalyse enzymatique mis en œuvre par le vivant pour l'acquisition d'énergie, permettent aux organismes d'utiliser ces réactions à leur profit. L'assimilation des éléments essentiels et la détoxification restent cependant contraints par les lois de la thermodynamique, de la cinétique chimique et la stœchiométrie* des réactions. La prise en compte simultanée des processus biologiques et abiotiques, mis en jeu par des consortiums syntrophiques complexes, s'avère aujourd'hui incontournable pour appréhender le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes.

Figure 8 : Bois immergés en aquarium d'eau de mer, de 6 à 11 mois par 500 mètres de profondeur.





VII.2

L'Écogéochimie : une rupture conceptuelle pour renouveler la science des écosystèmes

L'Écogéochimie propose d'analyser la complexité des systèmes écologiques et de construire sur cette base des approches intégratives qui prennent en compte cette complexité. La différence qualitative avec l'Écologie fonctionnelle (telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui) réside dans le fait de mettre systématiquement sur le même plan les organismes et les composantes de leur environnement abiotique, particulièrement les composés chimiques, en interaction avec ces organismes.

L'Écogéochimie s'intéresse à la dynamique conjointe des composés chimiques et des organismes vivants dans leur contexte environnemental. Elle étudie les interactions entre ces acteurs dans le but de comprendre les propriétés des écosystèmes (par exemple, les relations entre biodiversité, contrôle stœchiométrique, thermodynamiques et cinétiques des transformations biogéochimiques) et leur fonctionnement.

Cette approche constitue une rupture conceptuelle. Elle a pour objectif de favoriser l'émergence et le développement de concepts et d'outils nouveaux en considérant à part égale et sur le même plan l'approche physico-chimique de l'environnement traditionnellement prise en charge par les « Sciences de l'environnement », d'une part, et l'approche biologique de l'environnement relevant des Sciences écologiques, d'autre part. La démarche proposée vise à combiner et intégrer les approches des chimistes, géochimistes, physiciens et écologues pour analyser et modéliser les réseaux d'interactions qui lient la diversité du vivant aux composantes physico-chimiques de l'environnement.

L'objectif est de prédire la dynamique de ces réseaux pour prévoir les effets des changements de l'environnement sur la biodiversité et réciproquement. L'enjeu majeur de l'Écogéochimie est le développement d'outils et de stratégies expérimentales originales permettant de comprendre les mécanismes fondamentaux de la dynamique du vivant. La finalité première de l'Écogéochimie est donc la définition de concepts permettant la prédiction de la dynamique des écosystèmes et de leurs fonctions, de leurs régimes transitoires et de leur capacité de résilience. Une des applications à terme est aussi la définition de protocoles en ingénierie écologique, par exemple pour la remédiation d'environnements pollués.

L'approche écogéochimique est un domaine émergent à l'interface de la Chimie et de l'Écologie, complémentaire des approches de l'Écologie chimique, centrée sur la médiation entre organismes, et de celle de la Chimie des produits naturels. L'Écogéochimie s'intéresse aux processus biologiques et physico-chimiques de régulation des transferts d'énergie, de nutriments ou de composés toxiques. Elle vise à mieux comprendre comment les interactions des organismes avec leur environnement régulent les transformations chimiques, à des échelles d'étude spatiales et temporelles représentatives de ces interactions. Elle s'intéresse aussi aux interactions entre organismes qui ne reposent pas nécessairement sur la transformation de la matière, pour permettre d'intégrer l'étude des patrons de biodiversité et d'habitats à celle des transferts trophiques ou du recyclage des éléments chimiques.

Plusieurs thèmes émergents à l'interface de la Chimie environnementale et de l'Écologie sont susceptibles de structurer ce nouveau domaine :

VII.2.1

Acquisition / utilisation / stockage des ressources organiques et minérales dans les écosystèmes

Ce thème s'intéresse aux régulations entre flux d'énergie et flux de nutriments dans les écosystèmes et les effets linéaires et non-linéaires de leurs interactions, ainsi que les transitions entre ces deux modes de fonctionnement. Il s'intéresse au couplage entre structure des communautés, composition biochimique et biodégradabilité de la ressource (matière organique et nutriments minéraux), et environnement minéralogique (texture / composition minéralogique) des différents compartiments au sein des systèmes écologiques. Il vise à préciser les conséquences de ces couplages sur la dynamique du vivant et sur les réponses aux chan-

gements environnementaux. Les questions clés pour ce thème sont :

- Quel rôle jouent les interactions vivants / particules minérales dans la création d'habitats et quelle influence exercent-elles sur les activités métaboliques et les transferts d'éléments ?
- Quels sont les facteurs qui déterminent l'efficacité des processus enzymatiques microbiens en synergie et leur régulation par les rapports stœchiométriques de la ressource (C:N:P) ?
- Quelles contraintes stœchiométriques s'exercent sur les écosystèmes et quels rôles jouent les couplages entre cycles des nutriments sur les relations biodiversité – fonction ?

VII.2.2

Contraintes chimiques combinées sur la diversité des assemblages et sur les processus de transformation biochimique

Les relations réciproques entre transformations biochimiques contrôlées par le vivant et les processus chimiques et physiques abiotiques au sein des écosystèmes génèrent une mosaïque d'habitats aux propriétés diverses, en termes de ressources disponibles (carbone, énergie, nutriments) et de contraintes environnementales (toxicité et autres facteurs de stress chimiques). La dynamique des processus de transformation de la matière y est combinée à celle de la biodiversité, elle-même influencée par les contraintes chimiques multiples qui s'exercent sur les organismes dans ces systèmes dynamiques. L'approche proposée vise à déconstruire la complexité biologique et chimique des micro-habitats pour élucider les mécanismes qui gouvernent les relations biodiversité – fonctions et pour établir des modèles permettant de prédire leur dynamique temporelle. Elle doit contribuer à mieux appréhender les risques liés à la multiplicité des facteurs de stress et aux chan-

gements de fréquence d'évènements extrêmes en terme de « stress chimique » (ex : toxicité aiguë, période d'anoxie), et leur rôle sur la résilience des écosystèmes.

Les questions appréhendées par cette approche sont :

- Quels contrôles cinétiques et thermodynamiques s'exercent sur les conditions chimiques à l'échelle des micro-habitats et comment interagissent-ils avec la dynamique et la structuration des communautés ?
- Quelle est l'importance de la compétition entre activité microbienne et processus abiotiques et quels rôles jouent les consortia microbiens dans cette compétition ?
- Quels sont les mécanismes de rétroactions biologiques positives (« bioengineering », chimiosynthèse, détoxification) ou négatives (eutrophisation, remobilisation de polluants) sur les facteurs de stress chimiques multiples et comment influencent-ils la dynamique de l'écosystème ?

VII.2.3

Influence indirecte des interactions biotiques sur les processus environnementaux

Les interactions entre organismes agissent, secondairement ou directement, sur les propriétés abiotiques de l'environnement. Un enjeu est d'explicitier les mécanismes et d'estimer leur importance pour le fonctionnement des écosystèmes en s'attachant aux points suivants identifiés comme les plus pertinents :

- Rôle fonctionnel et dynamique des associations symbiotiques (ex : parasitisme versus symbiose) ;
- Liens entre composés chimiques actifs (métabolites secondaires) issus de la biomasse disponible et la diversité et l'efficacité des décomposeurs, rôle dans les relations trophiques

et le ratio hétérotrophie/autotrophie (ex : disponibilité des éléments nutritifs) ;

- Contribution aux bilans élémentaires (ex : DMS algues, cycle de l'azote), impact de la production de métabolites secondaires sous l'effet de stress environnementaux et mitigations, et réciproquement ;
- Transfert des contaminants dans et au travers des matrices biologiques : remobilisation/stockage, spéciation/ toxicité, détoxification/bioaccumulation, bio-épuration par les associations d'organismes en interaction avec leur environnement. Rôle des exo-polymères sécrétés par les microorganismes et métazoaires (EPS).

VII.2.4

Couplages entre dynamique des méta-communautés et changement des paramètres chimiques de l'environnement à grande échelle ou des transferts entre méta-écosystèmes dans des environnements fortement contraints

L'intégration de ces différentes approches dans des scénarios de changement global, implique de définir plus précisément le rôle de ces interactions dans les couplages à plus grande échelle.

- Rôle des couplages entre dynamiques environnementales et écologiques régies par des lois de nature différente dans la stabilité et la résilience des écosystèmes (ex : impact de la perte de biodiversité et/ou d'espèces invasives sur la capacité de l'écosystème à répondre à une perturbation chimique, seuils de rupture/changement de régimes) ;
- Relations combinées entre diversité et rapports polluants/nutriments dans les transferts entre écosystèmes (ex : couplages terrestres marins, benthopélagique, etc.) ;
- Importance des événements climatiques extrêmes (hydrodynamiques, hydrologiques extrêmes).

POUR EN SAVOIR PLUS

Azam F. and F. Malfatti. 2007. Microbial structuring of marine ecosystems. *Nat Rev Microbiol*, 5(10):782–791.

Guenet B., M. Danger, L. Abbadie, and G. Lacroix. 2010. Priming effect: bridging the gap between terrestrial and aquatic ecology. *Ecology*, 91(10):2850–2861.

Hall E. K., F. Maixner, O. Franklin, H. Daims, A. Richter and T. Battin. 2011. Linking microbial and ecosystem ecology using ecological stoichiometry: A synthesis of conceptual and empirical approaches. *Ecosystems*, 14:261–273.

Kuzyakov Y. 2010. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9):1363 – 1371.

Lohrer A. M., S. F. Thrush, and M. M. Gibbs. 2004. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions. *Nature*, 431(7012):1092–1095.

Moore J. C., E. L. Berlow, D. C. Coleman, P. C. de Ruiter, Q. Dong, A. Hastings, N. C. Johnson, K. S. McCann, K. Melville, P. J. Morin, K. Nadelhoffer, A. D. Rosemond, D. M. Post, J. L. Sabo, K. M. Scow, M. J. Vanni, and D. H. Wall. 2004. Detritus, trophic dynamics and biodiversity. *Ecology Letters*, 7(7):584–600.

Stams A. J. M., and C. M. Plugge. 2009. Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea. *Nat Rev Microbiol*, 7(8):568–577.

Stockdale A., W. Davison, and H. Zhang. 2009. Micro-scale biogeochemical heterogeneity in sediments: A review of available technology and observed evidence. *Earth-Science Reviews*, 92(1-2):81 – 97.

Vaquero-Sunyer R., and C. M. Duarte. 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105(40):15452–15457.

Wall D. H., R. D. Bardgett, and E. Kelly. 2010. Biodiversity in the dark. *Nature Geosci*, 3(5):297–298.

Prospective

Écologie chimique



UNE PROSPECTIVE DE L'INSTITUT ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT



www.cnrs.fr



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	3
I. INTRODUCTION	5
II. LES COMMUNAUTÉS CONCERNÉES	6
III. CHIMIE DU VIVANT ÉCO-INSPIRÉE	7
IV. ÉCOLOGIE CHIMIQUE, UNE SCIENCE EXPÉRIMENTALE ET INTÉGRATIVE	12
V. L'ÉCOLOGIE CHIMIQUE ET LES OMIQUES	16
VI. APPROCHES MÉTABOLOMIQUES EN ÉCOLOGIE CHIMIQUE	24
VII. ÉCOGÉOCHIMIE	31
VIII. BASES DE DONNÉES	36
IX. PARTENARIATS AVEC LES AUTRES INSTITUTS OU D'AUTRES ÉTABLISSEMENTS DE RECHERCHE	39
X. OUTILS À PROMOUVOIR	40
GLOSSAIRE	43
LISTE DES PARTICIPANTS	44

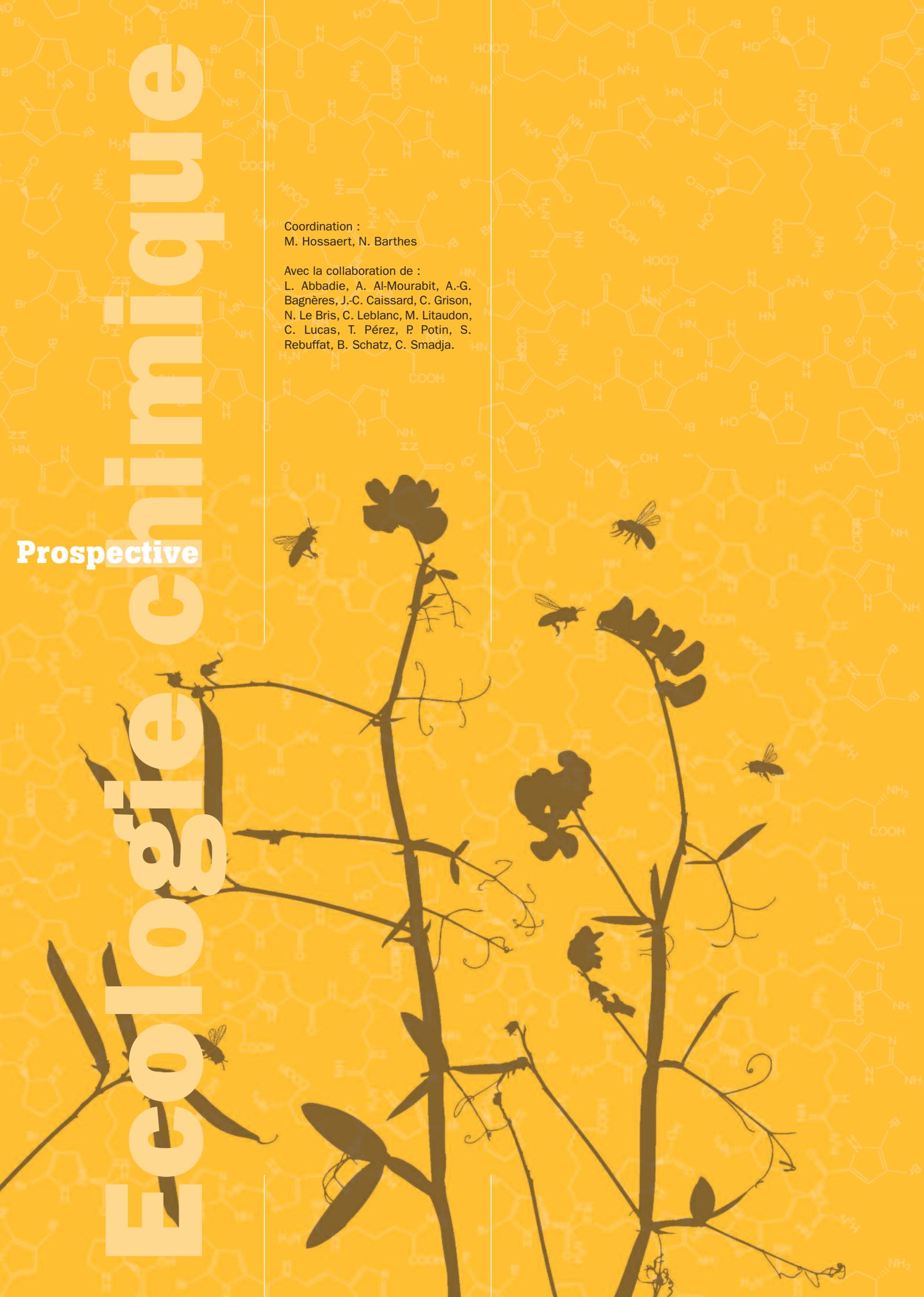


Ecologie chimique

Prospective

Coordination :
M. Hossaert, N. Barthes

Avec la collaboration de :
L. Abbadie, A. Al-Mourabit, A.-G.
Bagnères, J.-C. Caissard, C. Grison,
N. Le Bris, C. Leblanc, M. Litaudon,
C. Lucas, T. Pérez, P. Potin, S.
Rebuffat, B. Schatz, C. Smadja.



GLOSSAIRE

Activité biologique ou bioactivité (p.9)

Dans ce cas, les composés olfactifs ont une activité biologique lorsqu'ils sont détectés par l'individu récepteur.

Allélobiose (p.11)

Interactions plante-plante par l'intermédiaire de composés chimiques volatils ayant lieu entre des plantes saines (non attaquées par des herbivores) et apportant un bénéfice à la plante réceptrice.

Biogéochimie (p.32)

Étude des flux d'éléments chimiques essentiels tels que le carbone, l'azote, le phosphore, ou les micronutriments entre compartiments du vivant (groupes d'espèces représentant les producteurs et consommateurs) et compartiments physiques de l'environnement dans un écosystème.

Chimio-taxonomie (p.25)

La chimio-taxonomie utilise la composition en métabolites chimiques des organismes vivants comme critères de regroupement taxonomique.

Communautés (p.5)

Une communauté d'espèces représente l'ensemble des espèces en interaction à différentes échelles spatiales pouvant aller d'un arbre, d'un habitat à celle d'un paysage.

Écogéochimie (p.6 et voir le chapitre correspondant p.31)

Étude des mécanismes d'interaction entre la biodiversité et les propriétés physiques et chimiques d'un environnement dans le but de mieux comprendre les propriétés dynamiques de l'écosystème.

Interactions biotiques (p.7)

Elles regroupent l'ensemble des interactions entre deux organismes vivants, par opposition aux interactions abiotiques qui correspondent aux interactions avec les paramètres physico-chimiques d'un environnement (sol, air, eau, etc.).

Médiation chimique (p.12)

C'est la transmission d'informations par l'intermédiaire de composés chimiques entre deux individus d'espèces différentes ou non. Dans le cadre d'une médiation chimique olfactive, on distingue le message chimique comme l'odeur émise par l'individu émetteur et le signal chimique comme celle perçue par l'individu récepteur.

Métabolites primaires et secondaires (p.6)

A titre d'exemple, les métabolites primaires ont été définis chez les plantes comme les produits du métabolisme ayant des fonctions dans leur croissance et leur développement. Autrefois considérés comme des déchets du métabolisme, les métabolites secondaires regroupent différents composés (tannins, composés olfactifs volatils ou non, latex, composés de blessure, etc.) et ont des fonctions variées comme la défense contre l'herbivorie, l'attraction des pollinisateurs, les inhibiteurs de croissance des bactéries ou de plantes voisines, etc.

Microorganismes (p.5)

Ce sont des organismes vivants microscopiques, c'est-à-dire généralement invisibles à l'œil nu, qui regroupent des eucaryotes et des procaryotes (voir ci-dessous).

Phylum (p.26)

En systématique, le phylum est un regroupement d'espèces vivantes appartenant au même grand embranchement (voir aussi le focus sur la taxonomie p.29).

Procaryotes, eucaryotes (p.12)

Les procaryotes sont des organismes vivants composés d'une cellule unique sans noyau. À l'inverse, les eucaryotes sont des organismes vivants unicellulaires ou pluricellulaires caractérisés par la présence d'un noyau.

Remédiation (p.10)

Procédé de dépollution fondé sur l'utilisation d'un organisme vivant (bioremédiation) ou d'une plante (phytoremédiation).

Sémiochimique (p.8)

Substance chimique émise par une plante ou un animal dans l'environnement et qui a valeur de signal entre les êtres vivants.

Stœchiométrie (p.32)

En Chimie, la stœchiométrie est le calcul des relations quantitatives entre réactifs et produits au cours d'une réaction chimique. C'est aussi la proportion des éléments (composition élémentaire) dans une formule chimique, s'applique aussi aux échanges élémentaires entre compartiments des écosystèmes.

Stress environnemental (p.8)

Il regroupe les contraintes fortes imposées par l'environnement aux individus qui y sont présents. Il peut correspondre à un stress hydrique, physique, à un stress imposé par d'autres espèces (pathogène, invasion biologique) ou à un stress global imposé par les activités anthropiques (pollution, modification du milieu, etc.).

Taxon (p.25)

En taxinomie (ou taxonomie) (voir focus sur la taxonomie p.20), un taxon est une entité conceptuelle qui regroupe tous les organismes vivants possédant en commun certains caractères bien définis.