Les Cahiers Prospectives

Prospective Ecologie chimique

UNE PROSPECTIVE DE L'INSTITUT ECOLOGIE 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

www.cnrs.fr

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.

AVANT-PROPOS

Après l'année internationale de la biodiversité en 2010 et l'année internationale de la Chimie en 2011, il convient que 2012 voit la parution de cette brochure consacrée à un domaine né du croisement de ces deux grands thèmes, l'Écologie chimique. Cette initiative avait déjà jeté ses premières pierres en 2009, lors des réflexions de prospectives d'INEE engagées à Rennes, où l'Écologie chimique s'est nettement démarquée comme domaine prometteur de nouvelles questions de recherche au centre d'interfaces multiples, porté par une communauté française novatrice au niveau international.

Les interactions entre organismes, et les interactions entre organismes et leur environnement physio-chimique, passent très souvent par l'intermédiaire de molécules. La médiation chimique de ces interactions est le "terrain de jeu" de l'Écologie chimique. Une énorme diversité de molécules, allant de très simples à très complexes, est impliquée dans la perception du milieu, dans la communication entre individus d'une espèce et entre espèces, et dans le jeu des défenses et contre-défenses mis en place dans les interactions antagonistes. Etudier ces interactions et leur médiation chimique, nécessite une approche résolument interdisciplinaire, alliant la Chimie, la Biochimie et les nombreux domaines de la Biologie qui nourrissent l'Écologie, de l'Éthologie jusqu'à la Génomique.

En France, de nombreux chercheurs à cette interface entre l'Écologie et la Chimie s'associent pour étudier la médiation chimique et la biodiversité. Ces chercheurs se sont penchés sur une grande gamme d'organismes vivant dans des écosystèmes marins et continentaux, explorant toute leur complexité chimique et ses conséquences écologiques, tout en y intégrant l'approche évolutive centrale à toute l'Écologie.

L'objectif de cette brochure est de présenter le socle commun des connaissances fondamentales dans ce vaste champ d'étude. Premièrement, le rôle primordial des interactions dans le fonctionnement des communautés est développé. Ensuite, le rôle que joue la communication, et surtout la communication chimique, en régulant ces multiples interactions et en structurant les communautés, est expliqué et illustré. Les produits naturels ont été mis à contribution dans une diversité de rôles dans ces interactions, en fonction des propriétés physico-chimiques et biologiques de chacun. l'Écologie chimique nous donne le cadre pour mieux interpréter, étendre et valoriser nos connaissances sur la diversité des produits naturels. On commence à comprendre ainsi leurs divers rôles dans les processus de communication au sein de biotopes très divers des milieux aquatiques (dulcicoles et marins) ou terrestres, impliquant des interactions entre organismes dans les règnes animal, végétal et bactérien.

En contribuant aux connaissances fondamentales, les études en Écologie chimique participent en même temps au développement d'applications de ces connaissances. L'Écologie chimique nous aide à concevoir les nouvelles écotechnologies nécessaires à la résolution de problèmes environnementaux. L'Écologie chimique a ainsi déjà montré ses applications potentielles dans la lutte biologique, la bio-remédiation et dans l'ingénierie écologique. L'étude de la médiation chimique des interactions entre organismes est aussi une approche intelligente et efficace pour la recherche de nouvelles molécules d'intérêt pour la Pharmacie, la Médecine, l'Agronomie et l'industrie.

Les chercheurs impliqués en Écologie chimique en France sont essentiellement regroupés en deux GDR, l'un sur le milieu terrestre, le GDR « Écologie chimique » (GDR 2827), et l'autre sur le milieu marin, le GDR « BioChiMar » (GDR 3269). Ces deux GDR impliquent une cinquantaine de laboratoires associés au CNRS (Institut écologie et environnement et Institut de chimie). Cette communauté de chercheurs s'est donc mobilisée pour réfléchir sur l'état de cette recherche en France et sa place au niveau international, et aussi pour faire ressortir les forces et les grandes lignes novatrices de ce champ disciplinaire.

Cette brochure est le résultat des six ateliers de réflexion couvrant les différentes sensibilités dans le domaine. Elle développe des thèmes intégrant la Chimie des produits naturels, l'Écologie expérimentale, les approches '-omiques' (y compris la Métabolomique), et les différents outils mis à contribution dans l'Écologie chimique, sans oublier l'interface entre l'Écologie chimique et l'Écogéochimie. Cette dernière est un domaine en émergence en France et a été associée à cette réflexion. Cette brochure est à la fois le témoin d'un travail collectif hautement interdisciplinaire et une incitation à nous joindre dans cette voie. Qu'elle soit une source d'inspiration à tous ceux qui partagent avec nous cette vision large de l'Écologie, définie par l'un de ses praticiens les plus célèbres (G.E. Hutchinson) comme « l'étude de l'univers » !

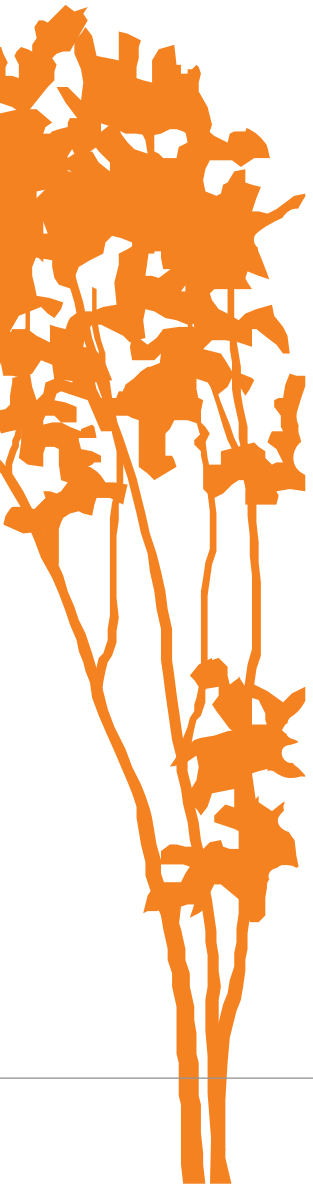
Françoise Gaill
Directrice de l'Institut écologie et environnement du CNRS

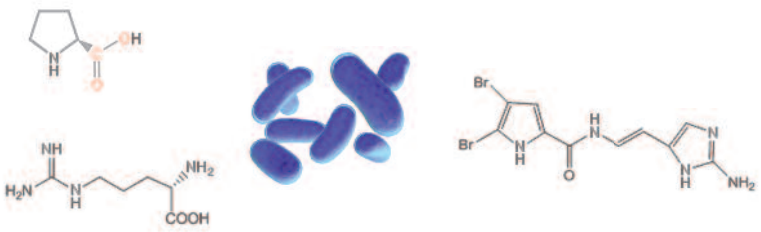
Martine Hossaert
Directrice adjointe scientifique
de l'Institut écologie et environnement du CNRS

I INTRODUCTION

Une réflexion globale a conduit ces dernières années à **définir les grands contours de l'Écologie chimique**, dans la communauté française largement impliquée dans cette discipline. L'Écologie chimique consiste en l'étude des interactions entre organismes, et avec leur environnement, médiées par des molécules dans toute leur diversité et leur complexité et selon une approche hautement interdisciplinaire (Chimie, Biochimie, Biologie, Éthologie, Génomique, etc.). Il s'agit d'une discipline relativement récente dont l'originalité n'est pas de rechercher une spécialisation pointue, mais au contraire d'échanger des connaissances et des savoir-faire conduisant à des effets de synergie constructifs et innovants. Dans ce contexte, une ouverture croissante aux différentes sensibilités de la Chimie analytique ou préparative est naturelle.

De par sa définition même, l'Écologie chimique est un domaine de recherche pluridisciplinaire, ce qui implique à la fois une diversité d'approches scientifiques et de techniques. Les besoins diffèrent en fonction des objets d'étude (insectes, organismes marins, mammifères, oiseaux, microorganismes*, communautés*, écosystèmes, etc.). **Les ateliers de prospectives, organisés par le CNRS-INEE, ont permis de mettre en exergue cette interdisciplinarité. Ainsi il est fondamental de maintenir, mais aussi de faire prospérer, les recherches en cours en encourageant le développement de nouvelles stratégies en Écologie basées sur ces compétences à l'interface de la Chimie et de l'Écologie**. Beaucoup de zones d'ombre restent à explorer pour bien comprendre les mécanismes impliqués tant dans la mise en place de la communication chimique intra et interspécifique que dans les interactions entre organismes et propriétés chimiques de leurs environnements, quels que soient les biotopes et les organismes étudiés. D'un point de vue plus appliqué, l'Écologie chimique est aussi un domaine d'avenir permettant de répondre à des questions sociétales sur la qualité et la préservation de l'environnement face aux changements globaux.





Cette réflexion globale sur l'Écologie chimique a été menée en 6 ateliers couvrant les différentes sensibilités de la discipline. De ce fait, le texte suivant peut comporter quelques redondances inévitables compte-tenu de l'interconnexion des ateliers.

II LES COMMUNAUTÉS CONCERNÉES

Actuellement, les communautés de chercheurs impliqués en Écologie chimique en France sont majoritairement regroupées en deux GDR, un sur le milieu terrestre, le GDR « Écologie chimique » (GDR 2827), le plus ancien, et l'autre sur le milieu marin, le GDR « BioChiMar » (GDR 3269), impliquant une soixantaine d'équipes.

Ces deux structures doivent voir leur dynamique, à présent commune, maintenue dans le temps. Des liens se sont instaurés avec les chimistes des substances naturelles à travers des programmes de recherche fédérateurs. Des outils structurels sont donc à identifier et à mettre en place pour unifier cette communauté scientifique grandissante. Par exemple : i) des écoles thématiques (comme celle organisée du 24 au 30 juin 2012 ; http://res-ec.cefe.cnrs.fr/) qui pourraient être récurrentes et qui permettraient de sensibiliser et de mieux former des personnes à l'interface de l'Écologie et de la Chimie des produits naturels ; ii) la création d'un réseau thématique suffisamment large (e.g. GDRE ou GDRI). Il semble aussi indispensable de promouvoir, auprès des Instituts de recherche, des organismes financeurs (**ANR, FRB, etc.**), le développement d'appels d'offres sur l'Écologie chimique afin de pouvoir financer des projets interdisciplinaires et d'envergure internationale dans ce domaine.

Il est aujourd'hui nécessaire d'accroître, par des moyens à déterminer, l'intégration de communautés scientifiques complémentaires de façon à avoir des approches plus intégratives des problématiques complexes de la Biologie, de l'Éthologie, mais également de la Chimie analytique listant la **chimiodiversité** des organismes vivants. Par exemple, les recherches portant sur les voies de biosynthèse de ces métabolites secondaires* (nécessité de spécialistes de la Chimie du Vivant / Biochimie / Biochimie évolutive), sur l'utilisation de composés de synthèse (nécessité de chimistes organiciens de synthèse) et sur le rôle des microorganismes (nécessité de microbiologistes) doivent être intégrées. Des collaborations avec des chercheurs en Physique étudiant la mécanique des fluides et la thermodynamique seraient également à promouvoir pour travailler sur la diffusion des molécules et la construction des paysages olfactifs.

La communauté d'Écologie chimique est également largement impliquée dans l'émergence de l'Écogéochimie*, une approche interdisciplinaire nouvelle à laquelle se réfère explicitement pour le moment un nombre limité d'équipes et de laboratoires. En fait, cette thématique concerne très largement des laboratoires d'Écologie expérimentale, d'Écologie théorique, d'Écologie microbienne, de Biogéochimie environnementale, d'Écotoxicologie, mais aussi les structures de type ECOTRONS, des stations d'Écologie expérimentale (réseau RENSEE du CNRS). Son développement pourra favoriser les convergences entre laboratoires impliqués sur des modèles différents, en particulier les sols, les milieux aquatiques continentaux et marins. Il serait aussi intéressant de rendre plus visible ce domaine, par exemple par l'organisation de journées thématiques sur l'Écogéochimie, mais aussi au travers de la formation des étudiants, afin de rassembler les équipes de recherches qui développent ces approches, de structurer la communauté et de la renforcer.

Des passerelles avec la Chimie du Vivant, la Biochimie, la Physicochimie mais aussi la Microbiologie, les Mathématiques et la Physique seraient donc des atouts indéniables pour lever des verrous techniques et renforcer cette approche interdisciplinaire qui est l'essence même de l'Écologie chimique.

III

CHIMIE DU VIVANT ÉCO-INSPIRÉE

Coordinateurs : C. Grison, S. Rebuffat, A. Al-Mourabit

L'association des forces de recherches dans les domaines de l'Écologie chimique et de la Chimie des produits naturels ouvre de nouvelles opportunités pour les deux disciplines. Ces deux disciplines s'appuient sur le socle commun des connaissances fondamentales que constituent les propriétés physicochimiques et biologiques des produits naturels. L'Écologie chimique contemporaine réduit ainsi les frontières entre Chimie et Biologie.

Directement inspirée des grands centres d'intérêt de l'Écologie chimique, la Chimie du Vivant est impliquée à deux niveaux :

- le premier est celui d'une approche fondamentale des interactions biotiques* à l'échelle moléculaire en mettant à profit les connaissances sur les produits naturels ;
- le second est celui d'une démarche appliquée qui utilise les connaissances précédentes et développe les écotechnologies nécessaires à la résolution de problèmes environnementaux répondant à la demande sociétale et aux enjeux du développement durable.

Il s'agit du reflet d'une interface en pleine mutation, s'intégrant dans le nouveau regard de la Chimie 2.0, et se situant d'une façon pertinente en amont et en aval de l'Écologie chimique. Son rôle peut être schématisé comme suit :

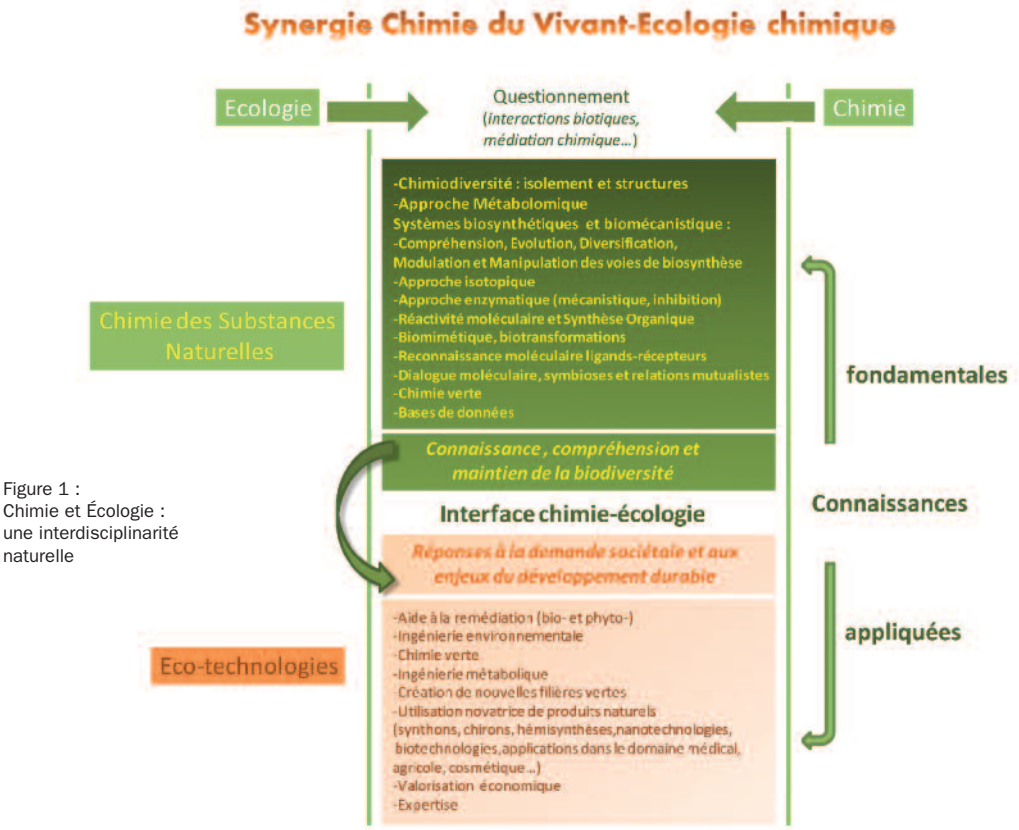


Figure 1 :
Chimie et Écologie :
une interdisciplinarité naturelle

III.1 Dans l'axe de l'atelier et au-delà

III.1.1 Chimie des produits naturels : Apports et impacts en Écologie chimique

La Chimie des produits naturels issus de la biodiversité a subi au cours des vingt dernières années l'influence réductrice du criblage pharmacologique à haut débit. La recherche des substances naturelles orientée vers le médicament a néanmoins réussi à maintenir cette discipline dans le cursus universitaire français, particulièrement dans les filières pharmacochimiques.

L'évolution récente de la recherche multidisciplinaire a montré que la Chimie, la Biologie et la Physique doivent s'affranchir des barrières disciplinaires pour aller vers de nouvelles frontières. Dans ce contexte nouveau, l'Écologie chimique est une formidable discipline pour sa contribution à aborder des questions essentielles comme les interactions entre espèces et l'influence des variations environnementales sur ces interactions.

Les messagers chimiques que sont les produits naturels, déterminent l'expression de la biodiversité à l'échelle moléculaire. C'est pourquoi, **la découverte d'une nouvelle molécule contribue incontestablement à l'émergence de nouvelles questions concernant son origine et son action en tant que signal biologique. Chaque nouvelle molécule peut constituer un « coup d'envoi » à des questions fondamentales comme la réactivité moléculaire, la séquence biosynthétique (chimique et génomique) qui la génère, l'impact sur les fonctions biologiques ainsi que leurs régulations.**

En clair, la détermination des structures de produits naturels, toutes origines confondues, l'étude de leurs propriétés physicochimiques, leurs réactivités chimique et biomécanistique sont des préalables à leur exploitation pour résoudre des questions d'Écologie chimique. Ainsi, les études chimiques visant la connaissance du métabolome (global ou ciblé) de chaque organisme s'avèrent essentielles. Le développement des outils techniques de la métabolomique permet aux chimistes de dresser des profils chimiques précis qui peuvent être renseignés sur une base de données des caractéristiques chimiques de chaque organisme.

Dans le domaine de l'Écologie chimique, la Chimie des produits naturels trouve naturellement sa place comme acteur privilégié et incontournable pour approfondir les connaissances et la compréhension des relations qui régissent les écosystèmes. Les relations inter- et intra-spécifiques se font par une communication chimique et moléculaire entre individus/espèces vivant au sein de l'écosystème. Parmi les molécules impliquées (sémiochimiques*), les métabolites secondaires jouent un rôle essentiel dont le plus connu est celui opérant dans les stratégies de défense contre les prédateurs, comme les alcaloïdes impliqués dans la chimie des communications plantes-mammifères-insectes par leur goût amer et leur toxicité. La plupart de ces métabolites secondaires ont co-évolué au sein des interactions entre les espèces. La diversité chimique des métabolites secondaires est importante avec plus de 230 000 molécules isolées, caractérisées et répertoriées, mais ce chiffre est faible face au nombre d'espèces végétales, animales, microbiennes, de milieux terrestres et marins, existantes et capables de produire des métabolites secondaires. Le métabolome des espèces vivantes est en fait peu connu. Cette richesse est le résultat de l'évolution des espèces, mais les rôles biologiques des métabolites secondaires et leurs fonctions dans le vivant et les écosystèmes restent encore bien souvent à découvrir.

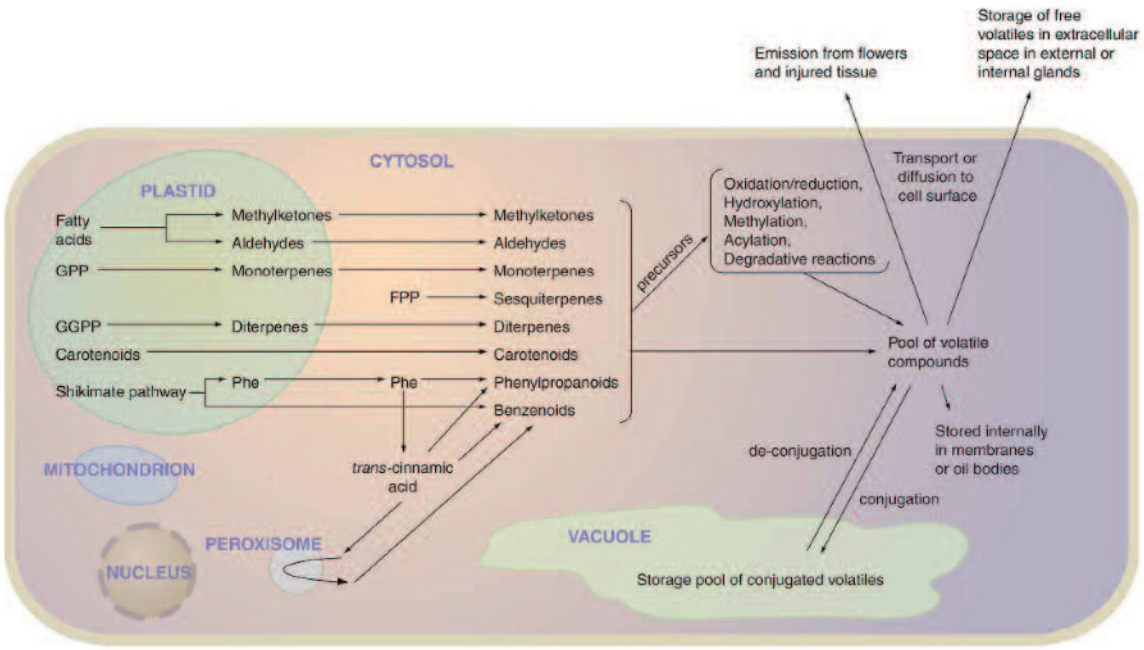
Les métabolites secondaires interviennent dans de nombreux types d'interactions (plante-plante, plante-animal, animal-animal, animal-environnement, bactéries-plantes, bactéries-éponges, etc.), au cours de réactions de stress*, et de défense, ou de communication, et le plus souvent à des doses très faibles mais très efficaces. La présence de métabolites secondaires dans des espèces spécifiques implique des stratégies métaboliques particulières, des processus de

transport et de stockage dans des organites cellulaires spécialisés, des systèmes d'activation et de libération.
La compréhension des mécanismes mis en jeu dans l'Écologie chimique nécessite d'explorer chimiquement la biodiversité, d'en isoler les métabolites secondaires acteurs et de les caractériser. Cette phase de prospection chimique est un domaine difficile de la Chimie des produits naturels pour différentes raisons :

- les faibles teneurs en produits et la complexité des mélanges en métabolites produits par un organisme vivant nécessitent d'utiliser des méthodes et techniques performantes et sophistiquées relevant du domaine de la Chimie extractive et analytique ;
- la recherche et la caractérisation de produits naturels impliqués dans la communication chimique continue à mettre en évidence des composés avec des architectures moléculaires imprévues. La diversité moléculaire des métabolites secondaires se traduit par la résolution d'un double problème : celui de la nature chimique, mais aussi de la connaissance d'une structure tridimensionnelle précise qui conditionne leur activité biologique*.

Les découvertes dans ce domaine de l'Écologie chimique peuvent également révéler des mécanismes complexes à élucider, qui peuvent nécessiter des synthèses parallèles, et inspirer l'étude de nouvelles voies biomimétiques originales et le développement d'utilisations.

Focus 1 : Les principales voies de biosynthèse dans une cellule eucaryote



(d'après Pichersky et al., 2006)

III.1.2
Développement d'Éco-technologies innovantes et durables

Les connaissances qui émanent conjointement de la Chimie du Vivant et de l'Écologie chimique peuvent être exploitées pour contribuer à l'élaboration de réponses concrètes aux problèmes environnementaux. L'approche chimio-écologique est idéale pour mettre en place des projets de recherche innovants dans le domaine et les transférer vers une phase industrielle. Une Chimie intégrée et éco-inspirée peut devenir « triplement verte » :

- s'il s'agit d'une Chimie bio-sourcée qui valorise les connaissances issues de la Chimie des produits naturels en utilisant des matières premières d'origine non-fossile (ressources environnementales telles que produits naturels hautement fonctionnalisés, pool chiral, organocatalyse, méthodes d'activation telle que lumière, oxygène de l'air, métaux de transition phytoextraits) ;
- s'il s'agit d'une Chimie innovante qui développe de nouveaux procédés éco-compatibles, respectueux de l'environnement et des exigences sociétales (solvants verts, économie d'atomes, catalyse hétérogène, réactions multicomposantes et en cascades) ;
- s'il s'agit d'une Chimie qui met en œuvre ses savoirs d'intégration au profit de la résolution de problèmes environnementaux (valorisation stimulante des déchets, économie et/ou alternatives à l'épuisement des ressources minérales).

C'est sur la base de la conception d'une Chimie éco-inspirée que cette nouvelle discipline d'interface possède les moyens de répondre à la demande sociétale en matière d'aide de remédiation* (bio- et phyto-remédiation), d'ingénierie environnementale, d'ingénierie métabolique, d'utilisation novatrice de produits naturels (synthons, chirons, hémisynthèses, nanotechnologies, biotechnologies, phytotechnologies, écoconception et préparation de nouveaux matériaux et systèmes moléculaires organisés, applications dans le domaine médical, agricole, sanitaire, cosmétique, etc.) et, plus largement, aux enjeux du développement durable. L'ensemble de cette approche peut permettre à court terme l'émergence de nouvelles filières vertes et durables permettant une adaptation aux mutations économiques à venir et une stimulation de la compétitivité industrielle.

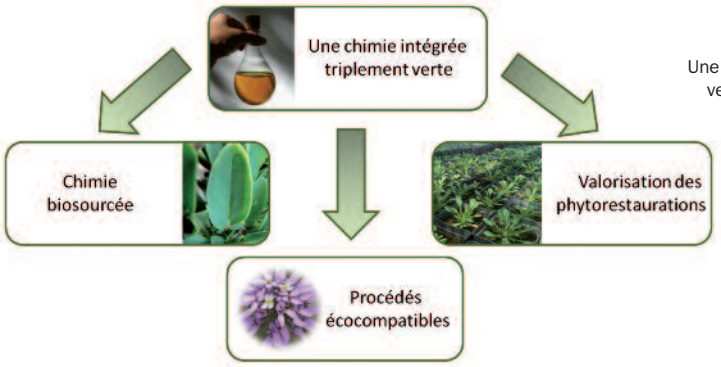


Figure 2 :
Une Chimie triplement verte et bio-inspirée

Focus 2 : Compétition microbienne

Les peptides lasso sont des molécules de défense des bactéries qui présentent une structure originale compacte et stable formant un « nœud moléculaire ». Ces peptides sont synthétisés chez différents genres bactériens à partir d'un précurseur linéaire sous l'action de deux protéines de maturation. Ils interviennent dans les compétitions microbiennes au sein d'un écosystème donné (microflore intestinale, microflore du sol, etc.). Leur structure constitue un modèle attractif pour la conception de peptides à visée thérapeutique.

Quelques enjeux d'intervention de la Chimie du Vivant en lien avec l'Écologie chimique peuvent être soulignés :

- développer l'étude de la diversité chimique issue de la biodiversité terrestre et marine. Isolement et caractérisation structurale de métabolites secondaires nouveaux ou peu connus (alcaloïdes, saponosides, polycétides, macrolides, hétérocycles complexes, etc.) ;
- comprendre les systèmes biosynthétiques par des approches biomécanistiques, isotopiques et biomimétiques ;
- comprendre l'évolution et la diversification des voies de biosynthèse en lien avec la Génomique ;
- moduler et manipuler les voies de biosynthèse (approches chimiques et génomiques combinées) ;
- approcher les stratégies d'adaptation des microorganismes et des plantes aux stress créés pas les activités anthropiques ;
- utiliser des produits naturels pour la découverte de nouvelles cibles biologiques impliquées dans l'Écologie chimique ;
- développer les recherches transversales sur le rôle des médiateurs chimiques dans les écosystèmes : interactions biotiques, messages moléculaires entre les espèces et leur environnement : substances sémiochimiques, allélochimiques, phéromones, allélobioses* (cf. Focus 4) ;
- utiliser des molécules naturelles pour accéder à des médiateurs par hémisynthèse ;
- approfondir les symbioses mutualistes et le dialogue moléculaire entre bactéries-plantes, champignons-plantes, bactéries-éponges d'un point de vue fondamental et à des fins environnementales ;
- utiliser des organismes, des microorganismes ou des systèmes enzymatiques isolés pour réaliser des transformations chimiques (bioconversions) de molécules d'intérêt ;
- développer une Chimie du Vivant éco-inspirée capable de contribuer à la résolution de problèmes environnementaux.

III.2 Aux interfaces (ateliers et disciplines)

La réalisation de ces objectifs s'inscrit dans le cadre de recherches interdisciplinaires nécessitant des collaborations étroites et des interfaces multiples : Chimie organique structurale, Synthèse organique fine et durable, Chimie du Vivant, Métabolomique, Physico-chimie des colloïdes, Microbiologie, Génomique, Transcriptomique, Écologie scientifique globale avec toutes ses différentes sensibilités (chimique, évolutive, microbienne, végétale, conservation-restauration, etc.).

POUR EN SAVOIR PLUS

Acebey-Castellon I.L., L. Voutquenne-Nazabadioko, H. D. T. Mai, N. Roseau, N. Bouthagane, D. Muhammad, E. L. M. Debar, S. C. Gangloff, M. Litaudon, T. Sevenet, N. V. Hung, and C. Lavaud. 2011. Triterpenoid saponins from *Symplocos lancifolia. J Nat Prod*, 74(2):163–168.

Al-Mourabit A. , M. A. Zancanella, S. Tilvi, and D. Romo. 2011. Biosynthesis, asymmetric synthesis, and pharmacology, including cellular targets, of the pyrrole-2-aminoimidazole marine alkaloids. *Nat. Prod. Rep.*, 28:1229–1260.

Bergstrom G. 2007. Chemical ecology = chemistry plus ecology! *Pure Appl Chem*, 79:2305–2323.

Eskander J., C. Lavaud, and D. Harakat. 2011. Steroidal saponins from the leaves of *Beaucarnea recurvata. Phytochem.* 72(9):946-51.

Grison C. and J. Escarré. 2011. Use of metal-accumulating plants for the preparation of catalysts that can be used in chemical reactions, International patent WO 2011/064462 and WO 2011/064487.

Knappe T.A., U. Linne, S. Zirah, S. Rebuffat, X. Xie, and M. A. Marahiel. 2008. Isolation and structural characterization of capistruin, a lasso peptide predicted from the genome sequence of *Burkholderia thailandensis* E264. *J Am Chem Soc*, 130(34): 11446–11454.

Langenfeld A., A. Blond, S. Gueye, P. Herson, B. Nay, J. Dupont, and S. Prado. Insecticidal cyclodepsipeptides from *Beauveria felina. J Nat Prod*, 74(4):825–830, 2011.

Losfeld G., V. Escande, T. Mathieu, and C. Grison. 2011. Phytoextraction et biodégradation dynamisée : une approche interdisciplinaire inventive au service de l'environnement. *Techniques de l'Ingénieur*, IN135:1–8.

Meinwald J. and T. Eisner. 2003. Natural products chemistry: New opportunities, uncertain future. *Helv Chim Acta*, 86(11):3633–3637.

Poupon B., E. 2011. Nay, editor. *Biomimetic Organic Synthesis*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

IV ÉCOLOGIE CHIMIQUE, UNE SCIENCE EXPÉRIMENTALE ET INTÉGRATIVE

Coordinateurs : A-G. Bagnères, B. Schatz

IV.1 Écologie Chimique et approche expérimentale

Les approches expérimentales en Écologie Chimique peuvent se répartir en trois grands groupes :

1) L'étude détaillée des structures et des mécanismes impliqués dans l'émission des médiateurs chimiques, formant un message à valeur aussi bien chimiosystématique que fonctionnelle (phéromone, allomone, kairomone, etc. ; cf. Focus 4), et dans l'émission, la diffusion et la réception de ce message chimique.
(Approches : Histologie, Physiologie, Neurobiologie, Écologie sensorielle, Biologie du comportement, Biochimie, Physique, Métabolomique, Chimie analytique, Synthèse organique, etc.).

2) L'analyse de l'origine et des effets du message chimique impliquant des modifications ciblées des organismes en interactions.
(Approches : Génomique, Transcriptomique, Électrophysiologie, Physiologie, Éthologie, etc.).

3) La recherche des composantes écologiques et évolutives liées à la médiation chimique* impliquée dans l'interaction inter-organismes.
(Approches : Écologie comportementale, (co-)Évolution, Génétique des populations, Dynamique des populations, Écologie des communautés, etc.).

Ces études expérimentales peuvent déboucher vers des études appliquées en Pharmacochimie, Agrochimie, à l'étude des invasions biologiques, jusqu'à la lutte intégrée, lutte biologique, ou encore à l'étude de l'anthropisation des milieux, voire même à la remédiation par ingénierie écologique.
Ces trois approches sont développées par des chercheurs étudiant les processus de communication et de diversité chimique au sein de biotopes très divers des milieux aquatiques (dulcicoles et marins) ou terrestres, tant dans le règne animal que végétal ou bactérien. On peut noter l'émergence d'études sur les écosystèmes d'interfaces entre ces deux milieux.
Dans le milieu aquatique (eau douce et milieu marin), sont étudiés aussi bien les poissons que les invertébrés (cnidaires, ascidies, éponges, mollusques, crustacés, etc.), leurs différents stades phénologiques et états physiologiques, mais également des microorganismes procaryotes* et eucaryotes benthiques, bentho-pélagiques, pélagiques, vivant aussi bien dans des écosystèmes côtiers qu'hauturiers. A ce jour, l'étude des substances naturelles marines intègre l'observation et la récolte d'organismes marins, mais aussi la caractérisation structurale de leurs molécules souvent complexes. L'étude des voies de biosynthèse de ces métabolites dits secondaires, de leur activité biologique, de leur mode d'action, ou des facteurs contrôlant leur expression, constitue aujourd'hui un champ de recherche de pointe.
Dans le milieu terrestre, les chercheurs étudient aussi bien les organismes animaux tels que, les petits et grands mammifères (des rongeurs aux mammifères d'élevages), les insectes (ou plus largement des invertébrés), ou encore les oiseaux, ainsi que les organismes végétaux. On peut noter une part importante de la communauté travaillant sur les interactions entre organismes, avec une intégration plus récente des micro-partenaires (bactéries, champignons, mésofaune de la litière, etc.). Parmi les espèces animales et végétales, plusieurs types d'interactions sont étudiées, comme celles au sein des espèces (relations sociales, reproduction), ou entre une plante et un insecte (pollinisation, phytopha-

Figure 3 :
Mimétisme sexuel
chez l'orchidée
Ophrys ficalhoana

gie, protection, dispersion des graines, mutualismes), celles entre insectes (insectes hôtes et parasites, relations prédateur-proie), celles entre plantes (relations allélopathiques, allélobioses) et entre une espèce et son milieu (reconnaissance du site de reproduction, du territoire, etc.). L'état d'avancement dans ces différentes approches par les équipes est variable en fonction des objectifs de recherche, des modèles biologiques et de leurs milieux de vie, ainsi que des contraintes techniques qui peuvent y être associées. En particulier la force des recherches en milieu aquatique porte surtout sur l'étude détaillée des structures chimiques impliquées principalement dans les mécanismes de défense. Celle en milieu terrestre porte plus sur le rôle écologique de ces molécules et cherche à identifier les mécanismes d'interactions entre organismes dans un contexte intégratif.

La diversité chimique des molécules est immense et dépend souvent de leur mode de diffusion (eau/air). Cette diversité et complexité des messages chimiques ont très vite amené les écologues à se rapprocher des chercheurs en Chimie organique structurale pour avancer dans la description et la compréhension de la chimio-biodiversité.

Les chercheurs en Écologie marine identifient (LC-

La crépidule, une espèce invasive
des côtes de la Manche

Focus 3 : Invasions biologiques

Les invasions biologiques résultent de l'introduction accidentelle ou volontaire d'une nouvelle espèce dans un environnement, en relation avec des activités humaines variées (commerce maritime, agriculture, aquaculture, etc.). Ces espèces non-indigènes peuvent se propager et proliférer au détriment d'espèces locales, conduisant à perturber fortement et durablement les écosystèmes. Cela peut se traduire par la disparition rapide d'espèces endémiques sous l'action directe de composés toxiques et/ou d'une compétition accrue pour la ressource et l'espace. L'Écologie chimique est une des disciplines qui met en œuvre concepts et outils pour mieux comprendre ces mécanismes, ainsi que les interactions entre espèces natives et espèces invasives. Par exemple, l'étude des modifications comportementales ou reproductives chez le termite *Reticulitermes flavipes*, largement répandu en France, dont la population d'origine a été retrouvée aux USA grâce, entre autre, à la comparaison de sa signature chimique et son caractère anormalement homogène. De même, l'analyse des phéromones d'alarme chez des crapauds invasifs, ou des signaux déclenchant la métamorphose des larves du mollusque *Crepidula fornicata* est importante pour la compréhension des mécanismes biologiques et écologiques à l'origine de la prolifération de ces espèces non-indigènes. L'étude de leurs effets sur les écosystèmes est donc essentielle pour prévenir leur propagation, limiter leurs impacts et mettre en place des stratégies de lutte (ex. lutte biologique).

MS, RMN, etc.) des molécules de poids moléculaire souvent supérieur à ce qui peut être rencontré en milieu terrestre (certaines possèdent plus de 150 atomes de carbone). Ces molécules agissent par contact ou diffusion dans l'eau, où elles sont déterminantes, par exemple, pour le passage de la phase larvaire pélagique à la phase adulte benthique chez de nombreux invertébrés (crustacés, mollusques). D'autres chercheurs, en Écologie terrestre, identifient de plus nombreuses mais plus petites molécules (10 à 35 atomes de carbones, identifiées par GC-MS), diffusées dans l'air ou par contact, où elles permettent, par exemple, la rencontre parfois spécifique entre une plante et son pollinisateur. Cependant il n'y a pas de lien strict entre volatilité, solubilité, organisme et biotope. Ces signaux chimiques sont souvent dus à des molécules complexes, parfois d'origine protéique et requièrent des techniques analytiques sophistiquées comme la chromatographie en phase supercritique (CPS), la spectrométrie de masse à ionisation Laser (MALDI-TOF/TOF) ou en mode électrospray et la résonance magnétique nucléaire (RMN) utilisant des sondes de mesure adaptées aux micro-quantités (microsondes, cryosondes). L'étude de l'émission, la transmission et la réception de ces signaux protéiques se révèle très complexe.

De fait, les différentes équipes d'Écologie chimique sont dispersées sur tout le territoire national, chacune d'entre elles avec leurs spécialités et leurs appareillages particuliers. Ces équipes ont cependant connu une évolution commune allant, d'une première étape marquée par l'inventaire des médiateurs chimiques, à une situation actuelle reposant sur la recherche de la compréhension des interactions, la mise en place et l'utilisation de plusieurs techniques innovantes (Génomique, biosynthèse, inhibition enzymatique, nanotechnologies).

Cette diversité d'approches expérimentales, d'objets de recherche, de disciplines scientifiques, peut cependant constituer une force pour répondre à des programmes intégrés, prenant en compte une grande diversité d'organismes interagissant de manière complexe.

IV.2 Thématiques émergentes

Les grandes thématiques à développer en Écologie chimique expérimentale sont :

1. **la détection, la réception, la diffusion, l'identification des composés actifs dans des mélanges complexes** (en qualité et/ou quantité), en lien avec la Physiologie sensorielle, et l'élucidation des mécanismes moléculaires impliqués ;

2. **la prise en compte de la plasticité des phénomènes de médiation chimique**, autant au niveau de l'émission qu'aux niveaux les plus élevés de la réception (i.e. cognitif) ;

3. **l'intégration de la Biologie et de l'Écologie des modèles biologiques**, du contexte et de la multimodalité de la médiation chimique, ainsi que des différents niveaux évolutifs étudiés ;

4. **l'analyse à différentes échelles comme, l'individu, la population, l'espèce et la communauté d'espèces**, en étudiant les variations des modalités de la médiation dans le temps et dans l'espace ;

5. **la prise en compte de la médiation chimique dans la dynamique évolutive des interactions interspécifiques** mais aussi du poids de l'inertie phylogénétique dans la synthèse et la construction des messages olfactifs ;

6. **le rôle et l'impact des microorganismes, comme les bactéries.** Les études à développer dans ce cadre devraient être autant sur la synthèse et le mode d'action des médiateurs chimiques émis par une espèce animale (par ex. l'homme et ses secrétions axillaires) ou végétale (litière), que sur la recherche de la localisation et de l'origine de la production des médiateurs, ainsi que sur l'interaction de cette association avec le milieu (par ex. tellurique, aérien). Ce domaine largement sous-estimé est sans doute parmi ceux qui seront les plus innovants dans les années à venir.

Focus 4 : Le vocabulaire de la communication chimique

Communication par médiation chimique chez les insectes *(d'après Dicke & Sabelis, 1988)*

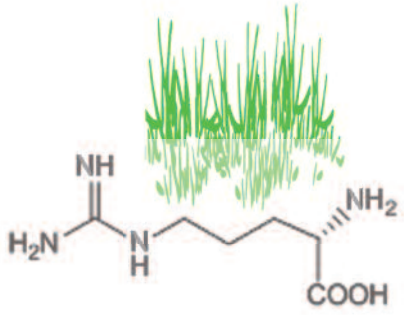
Infochimiques ou sémiochimiques *(Nordlund & Lewis, 1976)* **: substances chimiques émises dans l'environnement, qui ont valeurs de signaux chimiques entre deux ou plusieurs individus et classées comme suit :**

ALLÉLOMONE : sémiochimique entre individus d'espèces différentes (inter-spécifique).

- **Allomone : sémiochimique qui bénéficie à l'espèce émettrice.**
- **Kairomone : sémiochimique qui bénéficie à l'espèce réceptrice.**
- **Synomone : sémiochimique qui bénéficie à la fois à l'espèce émettrice et réceptrice.**

PHÉROMONE : sémiochimique entre individus de la même espèce (intra-spécifique).

- **Phéromone sexuelle : sémiochimique agissant sur le comportement sexuel des individus.**
- **Phéromone d'alarme : les abeilles et les fourmis utilisent ce type de message chimique pour avertir leurs congénères lorsqu'un agresseur menace la colonie.**



POUR EN SAVOIR PLUS

Baldwin I. T. 2010. Plant volatiles. *Curr Biol*, 20(9):R392–R397.

Baluška F., S. Mancusko, and D. Volkmann. 2006. Communication in plants neuronal aspects of plant life. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Blomquist G.J. and A.-G. Bagnères. 2010. *Insect Hydrocarbons: Biology, Biochemistry and Chemical Ecology*. Cambridge University Press.

Ferrero D.M. and S. D. Liberles. 2010. The secret codes of mammalian scents. *Wiley Interdiscip Rev Syst Biol Med*, 2(1):23–33.

Hay M. E. 2009. Marine chemical ecology: chemical signals and cues structure marine populations, communities, and ecosystems. *Ann Rev Mar Sci*, 1:193–212.

Morgan D. 2010. *Biosynthesis in Insects - Advanced Edition*. Royal Society of Chemistry.

Paul V. J., R. Ritson-Williams, and K. Sharp. 2011. Marine chemical ecology in benthic environments. *Nat Prod Rep*, 28(2):345–387.

Raguso R.A. 2008. Wake up and smell the roses: the ecology and evolution of floral scent. *Ann. Rev. Ecol., Evol. Syst.*, 39,549-569.

Schröder R. and M. Hilker. 2008. The relevance of background odor in resource location by insects: A behavioral approach. *BioScience*, 58(4):pp. 308–316.

Yi H.-S., M. Heil, R. M. Adame-Álvarez, D. J. Ballhorn, and C.-M. Ryu. 2009. Airborne induction and priming of plant defenses against a bacterial pathogen. *Plant Physiol*, 151(4):2152–2161.

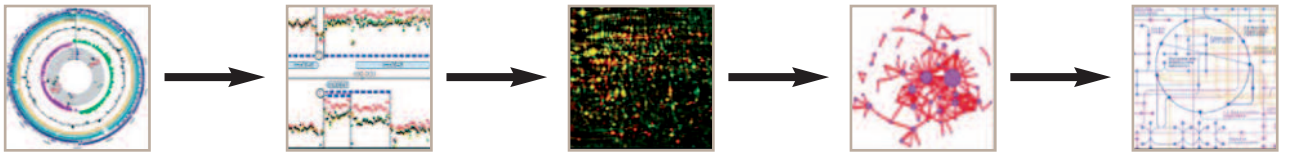
V L'ÉCOLOGIE CHIMIQUE ET LES OMIQUES

Coordinateurs : C. Smadja, C. Lucas, J-C. Caissard

Même si les approches dites « Omiques », i.e. techniques permettant d'étudier simultanément un grand nombre de gènes, protéines ou métabolites sans *a priori* sur leur fonction biologique, ont un apport certain et reconnu par tous dans de nombreux champs de recherche, leur implication dans l'Écologie chimique va au-delà de la simple approche méthodologique technique de Biologie moléculaire dans laquelle on la cantonne trop souvent. Au contraire, les « Omiques » s'imposent de plus en plus comme un champ de recherche à part entière et qui devrait devenir incontournable avec la démocratisation croissante des analyses de séquençage à haut débit.

Les « Omiques » ne représentent qu'une étape dans la réponse aux enjeux de l'Écologie chimique et ont déjà fait surgir de nouvelles questions. Par exemple, grâce à la Métagénomique, il est désormais possible d'appréhender les mécanismes directement dans leurs milieux naturels. De plus, les « Omiques » apportent un nouvel éclairage sur les mécanismes évolutifs. Enfin, l'étape post-génomique permettra d'élucider la fonction des gènes, de leurs régulations génétiques à leurs interactions en réseaux complexes.

Les thématiques sont très variées et se basent sur des modèles biologiques allant des micro-organismes aux mammifères en passant par les plantes et les insectes. Il est regrettable de noter que les différentes thématiques sont relativement isolées mais cela s'explique par la multiplicité des modèles biologiques et des questions scientifiques associées, à l'instar de la séparation entre Écologie chimique "terrestre" et "marine". C'est pourquoi la restitution des discussions de l'atelier prend la forme de réponses à des questionnements ayant une démarche scientifique commune et qui sont associées à des exemples caractéristiques des différents modèles étudiés.



GÉNOMIQUE
Séquençage de génomes entiers
Séquençage ciblé
Génotypage

TRANSCRIPTOMIQUE
Séquençage de transcriptomes entiers
Puces à ADN et tiling arrays

PROTÉOMIQUE

INTERACTOMIQUE

MÉTABOLOMIQUE

Figure 4 :
Les techniques « Omiques »

V.1 Des « Omiques » aux signaux : de nouveaux outils pour identifier les signaux chimiques impliqués dans les interactions biotiques.

L'utilisation de technologies « Omiques » ouvre la voie vers :

V.1.1 La recherche systématique

La recherche systématique des molécules actives par analyse sans *a priori* (1.1.a.) ou par analyse d'une famille de molécules chimiques souvent impliquée dans la signalisation (1.1.b.). C'est totalement l'objet de la Métabolomique mais il est aussi possible d'utiliser les autres « Omiques » comme la Protéomique ou la Transcriptomique.

1.1.a.
Recherche de nouveaux signaux par expression hétérologue de transcrits isolés directement de l'environnement d'ascidies. Recherche systématique des composés volatils émis par la tomate pour trouver la molécule qui attire à distance les germinations de cuscute (plante parasite de la tomate). Ce type d'interactions plante/plante, parfois appelé allélobiose est très novateur mais on peut citer des dizaines de démarches identiques pour les relations plantes/insectes.

1.1.b.
Recherche systématique d'antibiotiques dans des communautés de micro-organismes parce que l'on sait que les antibiotiques sont des signaux.

V.1.2 L'identification du signal

En découvrant d'abord des systèmes d'émission (1.2.a.) ou de réception (1.2.b.)

1.2.a.
Recherche de nouveaux transcrits correspondant à des élongases, enzymes qui fabriquent des acides gras à longue chaîne, utilisés comme signaux dans la communication entre insectes. Recherche systématique de l'ensemble des transcrits de glandes de noctuelles impliquées dans la production des signaux phéromonaux. La même démarche a été faite sur le tube digestif ou les corps gras d'insectes ravageurs.

1.2.b.
Recherche de nouveaux signaux par mise en compétition des micro-organismes et recherche de nouveaux transcrits. Recherche de modes de communication par les antennes d'abeilles en comparant les protéomes d'antennes de mâles et d'ouvrières et/ou en annotant les séquences obtenues.

V.2 Des « Omiques » aux bases moléculaires : vers la caractérisation des bases génétiques et moléculaires des interactions chimiques

Il s'agit probablement du domaine d'Écologie chimique dans lequel les « Omiques » sont les plus utiles. Il existe des dizaines (voire centaines) d'articles présentant une étude « Omiques » complète conduisant à la compréhension partielle ou totale d'une voie de biosynthèse d'un métabolite secondaire, d'une phéromone, d'un composé volatil ou de tout autre signal. Côté micro-organismes, les « Omiques » permettent également l'identification du « quorum sensing » bactérien qui représente un système clé de communication entre bactéries (2.a.).
Certaines études cherchent aussi à mettre en évidence les facteurs de transcription régulant la réception des signaux et quelques études émergentes utilisent les « Omiques » pour identifier des gènes impliqués dans la réception (récepteurs olfactifs, OBP, enzymes de dégradation, etc.) (2.b.).

2.a.
Identification par Transcriptomique du premier facteur de transcription végétal régulant une voie de biosynthèse de composés volatils chez l'œillet et le pétunia. Identification des protéines du « quorum sensing » bactérien par Protéomique.

2.b.
Recherche des récepteurs olfactifs et des éléments de réponse cellulaire associés (canaux ioniques) dans les antennes d'un papillon par EST (Expressed Sequence Tag). Identification de domaines cis-régulateurs par changement des niveaux d'expression génique lors de la perception d'une phéromone par une abeille. Bases génétiques des récepteurs olfactifs et gustatifs chez le puceron du pois.

Focus 5 : Le parfum des fleurs et les « Omiques »

Dans le domaine de l'Écologie chimique, il existe de très nombreux exemples d'interactions entre les animaux et les fleurs. Dans les fleurs, les signaux qui influencent le comportement des animaux, aussi bien insectes, que rongeurs, oiseaux-mouches ou chauve-souris par exemple, reposent le plus souvent sur la forme, sur la couleur et sur l'odeur. La compréhension de ces interactions est une clé importante pour comprendre les lois de l'évolution. Ainsi par exemple, des études comparatives transcriptomiques entre différentes variétés odorantes ou non odorantes ont permis différentes avancées. C'est le cas de la voie de biosynthèse du 3,5-diméthoxytoluène des roses horticoles décryptée grâce à des EST. Il a été montré que cette voie de biosynthèse est apparue chez des roses sauvages chinoises probablement par duplication et néo-fonctionnalisation d'un gène codant pour une *O*-méthyl transférase. D'autres enzymes de biosynthèse ont aussi été découvertes par analyses protéomique, par EST, ou par hybridation soustractive non seulement chez les roses mais aussi chez le pétunia, l'œillet ou le muflier. De plus, chez le pétunia, une analyse comparative par puce à ADN a permis de cloner le gène *ODORANT1* codant pour un facteur de transcription régulateur de la biosynthèse des phénylpropanoïdes. Ce facteur de type MYB est à ce jour le seul régulateur de voies de biosynthèse de composés volatils connu chez les végétaux. Bien sûr, toutes les voies ne sont pas connues, beaucoup restent encore très énigmatiques et, surtout, de très nombreuses questions se posent sur leur fonctionnement. Face à une pression de sélection due à des pollinisateurs ou à des ravageurs, quels mécanismes génétiques permettent de créer rapidement de nouveaux bouquets d'odeurs ? Quels sont les régulateurs des différentes voies de biosynthèse de ces composés ? Comment expliquer les modifications de bouquets d'odeur durant l'épanouissement d'une fleur du bouton à la fleur pollinisée ?
S'il existe donc des travaux de Transcriptomique, de Protéomique voire de Métabolomique des fleurs, il n'y a, à ce jour, aucun génome de fleur odorante séquencé. Ces séquences seraient pourtant une aide précieuse pour répondre aux questions précédentes. Plusieurs espèces sont candidates au séquençage, parmi lesquelles le pétunia, le tabac et la rose. Récemment, plusieurs consortiums se sont constitués pour travailler à des stratégies de séquençage de quelques fleurs odorantes. Il est donc possible que de tels génomes soient disponibles à l'avenir et aident la communauté scientifique à répondre à des problématiques d'écologie chimique plus générales.

V.3 Des « Omiques » aux bases physiologiques : mieux appréhender les modes de production, sécrétion et réception des signaux chimiques et leurs conséquences physiologiques

Il s'agit ici d'identifier les organes, les tissus et les cellules (3.a.) qui produisent ou reçoivent les signaux chimiques. Quelques travaux permettent aussi de passer à l'échelle subcellulaire (3.b.).

3.a.
Recherche de l'organe responsable de la sécrétion permettant l'immunoprotection des pontes d'un gastéropode (*Biomphalaria*) par EST et protéomique. Recherche des tissus chimiosensoriels du moustique par séquençage du transcriptome entier et analyse des profils d'expressions (RNA-seq). Comparaison des transcriptomes de plusieurs types de glandes épidermiques chez la tomate pour identifier le rôle de chaque glande dans la répulsion des insectes.

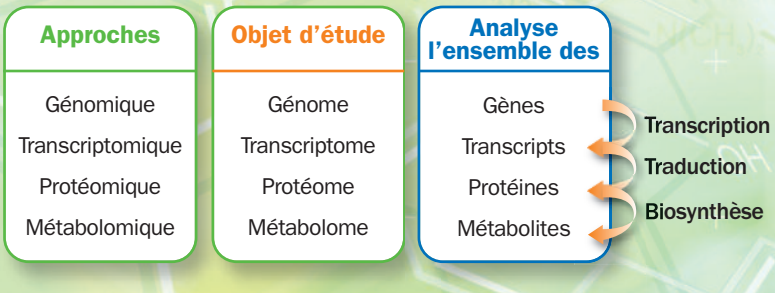
3.b.
Étude du sécrétome (partie sécrétée du protéome) du parasite *Leishmania* pour chercher les acteurs de virulence.

V.4 Des « Omiques » à l'Écologie des communautés : de nouveaux moyens d'étudier les mécanismes et interactions chimiques des organismes dans leurs milieux naturels

Au sein de communautés parfois complexes, plusieurs signaux chimiques sont émis ou tout simplement présents dans l'environnement. Les « Omiques » permettent d'identifier les partenaires d'une interaction au sein d'un environnement chimique complexe après avoir détecté un signal. Cette question concerne plutôt la Métagénomique des communautés de micro-organismes qui permet de distinguer les symbiontes des autres interactions parmi les bactéries symbiotiques d'un organisme, comme par exemple les éponges. Un autre exemple est la détermination par Métagénomique et expression hétérologue de l'origine d'un polycétide (provenant d'une bactérie symbiotique) chez un scarabée.

Focus 6 : Les approches « Omiques »

Les approches dites « Omiques » sont des techniques permettant d'étudier simultanément un grand nombre de gènes, transcrits, protéines ou métabolites sans *a priori* sur leurs fonctions biologiques.



Schématisation des approches « Omiques » et de leurs liens à l'échelle d'un organisme vivant.

La Génomique est l'étude du matériel génétique codant ou non codant d'un organisme. Lorsqu'on étudie le contenu génétique d'un échantillon constitué de nombreux organismes issus d'un environnement complexe (intestin, océan, sols, etc.) on parle de Metagénomique. Cette approche est notamment utilisée pour aborder la systématique de microorganismes difficiles à identifier, ou pour comprendre le potentiel fonctionnel d'un environnement. De façon similaire, la Transcriptomique, Protéomique, Métabolomique est l'analyse et l'identification de l'ensemble des transcrits, protéines, métabolites constituant le Transcriptome, Protéome, Métabolome d'un ou de plusieurs organismes dans un état physiologique ou un environnement donné.
Actuellement, les techniques innovantes à haut débit (puces à ADN, séquençage massif, génotypage à haut débit) permettent de développer des études de Génomique et Transcriptomique à moindre coût chez la plupart des espèces.

Un peu de vocabulaire :

Puce à ADN (DNA microarray) : ensemble de molécules d'ADN fixées en rangées ordonnées sur une petite surface (verre, silicium ou plastique) qui sont utilisées comme sondes pour s'apparier à des brins complémentaires d'ADN contenu dans un extrait biologique et ainsi révéler le niveau d'expression des gènes (transcrits) dans une cellule, un tissu, un organe ou un organisme.

RNA-Seq (RNA sequencing) : technique de séquençage du transcriptome entier d'une espèce qui permet l'identification et l'analyse des profils d'expression de l'ensemble des transcrits d'un tissu, organe ou organisme donné. Cette technique est particulièrement efficace pour les espèces non modèles (c'est à dire sans génome de référence).

EST (Expressed Sequence Tag ou marqueur de séquence exprimée) : courte portion séquencée d'un ADN complémentaire (ADNc), utilisée comme marqueur pour différencier les gènes entre eux dans une séquence ADN.

SNP (Single-nucleotide polymorphism ou polymorphisme nucléotidique) : type de polymorphisme de l'ADN pour lequel au moins deux chromosomes diffèrent par une seule paire de bases. Un SNP peut être détecté entre individus ou entre chromosomes homologues au sein d'un seul individu.

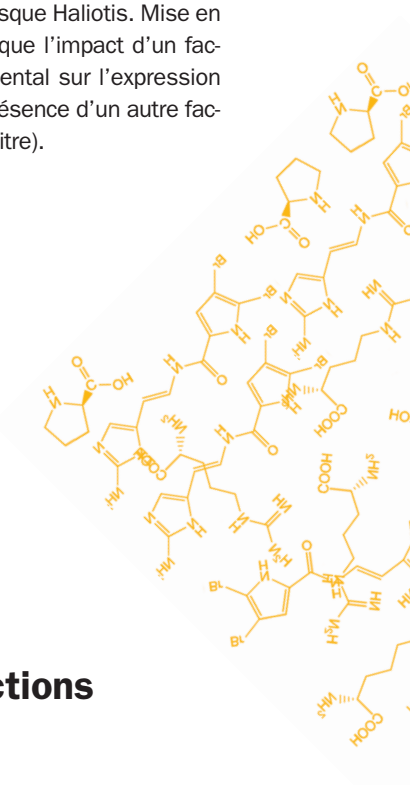
RAD (Restriction-site associated DNA) : court fragment d'ADN adjacent à un site d'enzyme de restriction déterminé. L'utilisation des marqueurs RAD permet d'analyser le polymorphisme des individus.

V.5 Des « Omiques » au rôle de l'environnement : établir les conditions environnementales qui influencent la production de signaux et leur réception

Il s'agit ici d'identifier les facteurs biotiques (5.a.) ou abiotiques (5.b.) qui déclenchent des émissions de signaux ou qui influencent leur réception.

5.a.
Étude transcriptomique et métabolomique de l'activation des gènes du métabolisme secondaire d'un champignon (*Aspergillus* sp.) en présence de 58 espèces bactériennes (Streptomyces). Étude de l'expression de gènes impliqués dans la reconnaissance dans différentes conditions de stress, interactions sociales, environnementales, alimentaires, rythmes circadiens. Effet de l'accouplement sur les modifications physiologiques et la production de phéromones chez les reines d'abeilles par Transcriptomique du cerveau et des ovaires. Étude transcriptomique des interactions tritrophiques tabac/chenille/parasitoïde en lien avec l'émission de composés volatils par les feuilles attaquées.

5.b.
Mise en évidence, par puce à ADN, de facteurs endogènes et exogènes (chimiques) déclenchant la métamorphose du mollusque Haliotis. Mise en évidence par puce à ADN que l'impact d'un facteur de stress environnemental sur l'expression des gènes dépend de la présence d'un autre facteur de stress exogène (huitre).



V.6 Des « Omiques » aux réponses adaptatives : comprendre et prédire l'évolution des interactions chimiques

L'un des grands défis actuels concerne notre compréhension des capacités adaptatives des populations naturelles face aux changements environnementaux, qu'ils soient biotiques (e.g. environnement social, 6.a.) ou abiotiques (e.g. climat, oligoéléments, 6.b.). Les technologies « Omiques » comme le génotypage à haut débit de marqueurs de type SNP (Single Nucleotide Polymorphism) ou le séquençage RAD (Restriction-site associated DNA) révolutionnent l'étude de la variation génétique (polymorphisme, divergence) dans les populations naturelles.

6.a.
Analyse des variations individuelles dans la réponse aux phéromones chez l'abeille permettant de produire de la variabilité dans la réalisation de tâches ergonomiques au sein du groupe. Évolution adaptative des familles multi-géniques des récepteurs du gout et de l'odorat chez les drosophiles et les pucerons. Implication d'une famille de protéines de réception olfactive dans le mécanisme de spéciation des mammifères non murins. Évolution d'une famille de gènes impliqués dans la différence d'odeurs des roses chinoises et européennes. Identification par Transcriptomique d'une famille de gènes liés aux processus chimiosensoriels et impliqués dans la spéciation d'un diptère (*Rhagoletis* sp.).

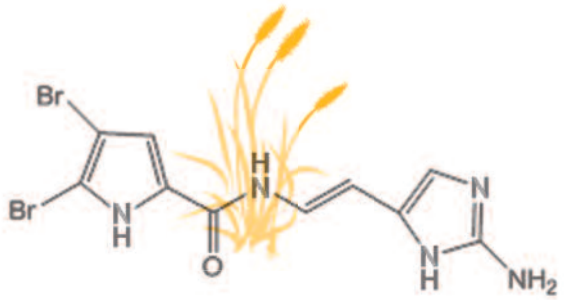
6.b.
Étude par Protéomique des mécanismes adaptatifs de la résistance au cuivre chez une algue (*Ectocarpus* sp.).

Quel avenir pour les « Omiques » en Écologie chimique en France ?

L'utilisation des technologies « Omiques » dans l'Écologie chimique mobilise encore un nombre relativement restreint de chercheurs en France qui constituent une communauté naissante à la pointe de ces avancées techniques. Les forces actuelles identifiées se répartissent sur plusieurs organismes de recherche : CNRS (Montpellier, Tours, Gif-sur-Yvette), MNHN, Universités (Paris 6, Saint-Etienne, Toulon), INRA (Versailles, Avignon, Lille).

On assiste à l'heure actuelle à une réelle révolution technologique qui s'établit à grande vitesse et qui impose une adaptation rapide de la communauté scientifique. Afin que les laboratoires français répondent à cet enjeu majeur, il sera important que la France s'offre les moyens de former ses chercheurs (technologies, traitement des données, Bioinformatique), de promouvoir le transfert de compétence entre laboratoires français (ateliers, écoles thématiques, consortium, etc.), et de structurer cette communauté (accès aux plateformes de séquençages, personnels techniques, etc.).

Le développement des « Omiques » en Écologie chimique et plus généralement dans le domaine des Sciences de la biodiversité (Écologie, Évolution, Environnement) permettra de renforcer les ponts avec d'autres approches et disciplines (cf. Figure 5). En particulier, les « Omiques » ont des liens très étroits avec les approches « métabolomiques », qui ont été discutées au cours d'un autre atelier (cf. ci-après).



POUR EN SAVOIR PLUS

Alaux C., Le Conte Y., Adams H.A., Rodriguez-Zas S., Grozinger C. M., Sinha S., Robinson G. E. 2009. Regulation of brain gene expression in honey bees by brood pheromone. *Genes Brain Behav*, 8(3):309-19.

Donia M.S., Ruffner D.E., Cao S., Schmidt E.W. 2011. Accessing the hidden majority of marine natural products through Metagenomics. *Chembiochem*, 12:1230-36.

Feng M., Song F., Aleku D.W., Han B., Fang Y., Li J. 2011. Antennal proteome comparison of sexually mature drone and forager honey bees. *J Proteome Res*, 10:3246-60.

Krupp J.J., Kent C., Billeter J-C., Azanchi R., So A. K.-C., Schonfeld J. A., Smith B. P., Lucas C., Levine J. D. 2008. Social experience modifies pheromone expression and mating behavior in male *Drosophila melanogaster*. *Current Biology*, 18:1373-83.

Legeai F., Malpel S., Montagne N., Monsempes C., Cousserans F., Merlin C., François M.-C., Maïbèche-Coisné M., Gavory F., Poulain J., Jacquin-Joly, E. 2011. An expressed sequence tag collection from the male antennae of the noctuid moth *Spodoptera littoralis*: a resource for olfactory and pheromone detection research. *BMC Genomics*, 12:86.

Meslin C., Brimau F., Nagnan-Le Meillour P., Callebaut I., Pascal G., Monget P. 2011. The evolutionary history of the SAL1 gene family in eutherian mammals. *BMC Evolutionary Biology*, 11:148.

Piel J. 2002. A polyketide synthase-peptide synthetase gene cluster from an uncultured bacterial symbiont of Paederus beetles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 99:14002-7.

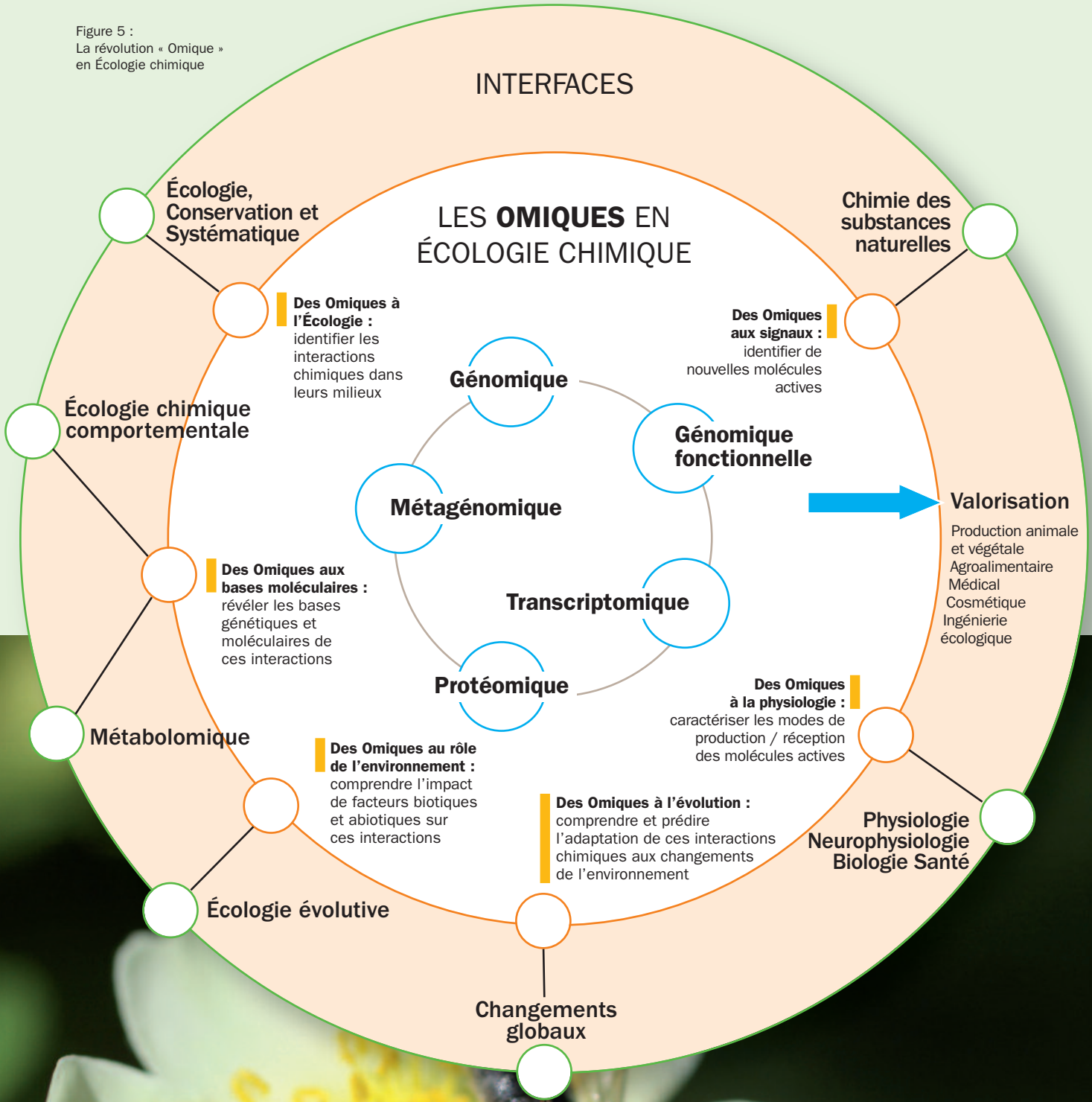
Pitts R.J., Rinker D.C., Jones P.L., Rokas A., Zwiebel L.J. 2011. Transcriptome profiling of chemosensory appendages in the malaria vector *Anopheles gambiae* reveals tissue- and sex-specific signatures of odor coding. *BMC Genomics*, 12:271.

Smadja C.M., Canbäck B., Vitalis R., Gautier M., Ferrari J., Zhou J.J. and Butlin R.K. 2012. Large-scale candidate gene scan reveals the role of chemoreceptor genes in host plant specialization and speciation in the pea aphid. *Evolution*, Online first.

Smulders M.J.M., Arens P., Koning-Boucoiran C.F.S., Gitonga V.W., Krens F., Atanassov A., Atanassov I., Rusanov K.E., Bendahmane M., Dubois A., Raymond O., Caissard J.-C., Baudino S., Crespel L., Gudin S., Ricci S.C., Kovatcheva N., Van Huylenbroeck J., Leus L., Wissemann V., Zimmermann H., Hensen I., Werlemark G., Nybom H.. 2011. Chapter 12 Rosa. In: Wild crop relatives: genomics and breeding resources plantation and ornamental crops (ed. Rose CK), pp243-275. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

Verdonk J.C., Haring M.A., van Tunen A.J., Schuurink R.C. 2005. ODORANT1 regulates fragrance biosynthesis in petunia flowers. *The Plant Cell Online*, 17:1612-24.

Figure 5 :
La révolution « Omique »
en Écologie chimique

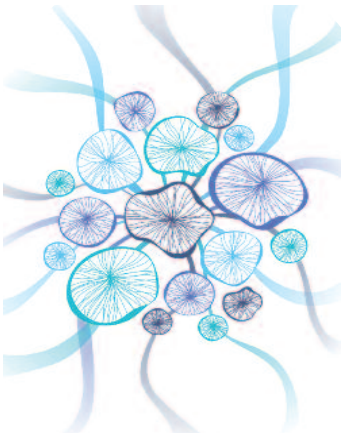


VI APPROCHES MÉTABOLOMIQUES EN ÉCOLOGIE CHIMIQUE

Coordinateurs : T. Pérez, C. Leblanc, P. Potin

Depuis 1998, le métabolome désigne l'ensemble des molécules de faible poids moléculaire (<1500 Da) synthétisées par un organisme (intermédiaires métaboliques, hormones et autres molécules signal et métabolites secondaires). Ces molécules jouent des rôles clés dans les interactions entre les organismes et leur environnement.

Une caractéristique inhérente au métabolisme secondaire est sa grande diversité et sa plasticité génétique qui traduisent les adaptations des organismes aux contraintes d'un environnement changeant. D'un point de vue conceptuel, il y a **deux approches analytiques** permettant de caractériser le métabolome : (1) les stratégies de « profilage métabolique » principalement employées pour de la classification et basée sur une analyse qualitative d'un grand nombre de composés ; (2) les analyses « ciblées » avec lesquelles les métabolites sont identifiés sans ambiguïté et quantifiés. Historiquement, cette dernière approche a été réservée pour des analyses de petits nombres de métabolites (<20). Actuellement, **les principales applications du profilage métabolique** sont : (1) en sciences médicales à des fins de diagnostic (santé publique, sécurité alimentaire, etc.), et (2) pour classer et/ou caractériser des souches (bactéries, champignons, plantes). La métabolomique permet d'orienter les analyses ciblées du métabolisme. Ce type d'approche permet par exemple de détecter les effets sur le métabolome d'une modification génétique provoquée (e.g. agro-alimentaire).
La Métabolomique environnementale est aussi un champ disciplinaire en plein essor. Il s'agit d'une application à l'étude des interactions entre les organismes et leur environnement, dans le but de caractériser le fonctionnement d'un organisme au niveau moléculaire et/ou informer sur l'état de l'environnement. **Un atout majeur des approches de métabolomique est qu'elles sont applicables à des organismes non modèles**. Ainsi, de nombreuses applications sont possibles (1) en Écophysiologie, pour étayer les réponses biochimiques des organismes aux conditions biotiques et abiotiques de leur environnement ; (2) en Écotoxicologie pour indiquer les risques potentiels des polluants chimiques sur les organismes dans leur milieu ; et surtout (3) en Écologie chimique pour identifier des composés bioactifs impliqués dans les interactions écologiques.



VI.1 Biodiversité chimique et chimio-taxonomie*

La Métabolomique offre une « méthode rapide d'évaluation de la chimio-diversité » et permet d'identifier des molécules d'intérêt économique (une alternative au bioguidage utilisé en Chimie des produits naturels) ou des biomarqueurs. En particulier, les approches de profilage métabolique, représentent des outils précieux pour évaluer la diversité et la complexité structurale du métabolome. Comme les caractères morphologiques ou moléculaires, la composition en métabolites a souvent été utilisée comme caractère en systématique. Ainsi, après s'être affranchi de l'hypothèse d'indépendance des caractères (codage par voies de biosynthèse ou par groupes de molécules dépendantes), il est possible de faire de la chimio-taxonomie ou chimio-systématique, i.e. établir des rapports entre la composition chimique des espèces vivantes et leur classification systématique. Cependant, la détermination de marqueurs chimio-taxonomiques dépend souvent de l'étude d'un taxon* par la Chimie des produits naturels, un champ disciplinaire qui restait légitimement concentré sur l'isolement, la caractérisation structurale de molécules nouvelles et bioactives. Ainsi les rapports de substances communes à plusieurs taxons, potentiellement marqueurs chimiques synapomorphiques, restent très rares et les nombreuses études de chimio-systématique ne considèrent que des portions très incomplètes du métabolome. C'est pourquoi, la chimio-taxonomie basée jusqu'à présent sur la présence ou l'absence d'un métabolite rencontre des limites. Aujourd'hui, la Métabolomique révolutionne la chimio-systématique en offrant la possibilité de comparer un grand nombre d'échantillons par l'analyse de fractions beaucoup plus complètes du métabolome, et ce, pour obtenir des classifications comparables à celles fournies par la systématique moléculaire.

Elle permet ainsi de soutenir des hypothèses phylogénétiques ou phylogéographiques, ou de discriminer des espèces « sœurs » entre elles, notamment pour des groupes taxonomiques difficiles à étudier (petite taille, caractères morphologiques traditionnels absents ou au contraire trop polymorphes). Le métabolome peut être utilisé comme une signature de l'évolution ou comme un « indicateur des effets de la sélection naturelle » et permet aussi de mieux comprendre l'apparition de certaines voies de biosynthèse (voir Focus 1 p.9).

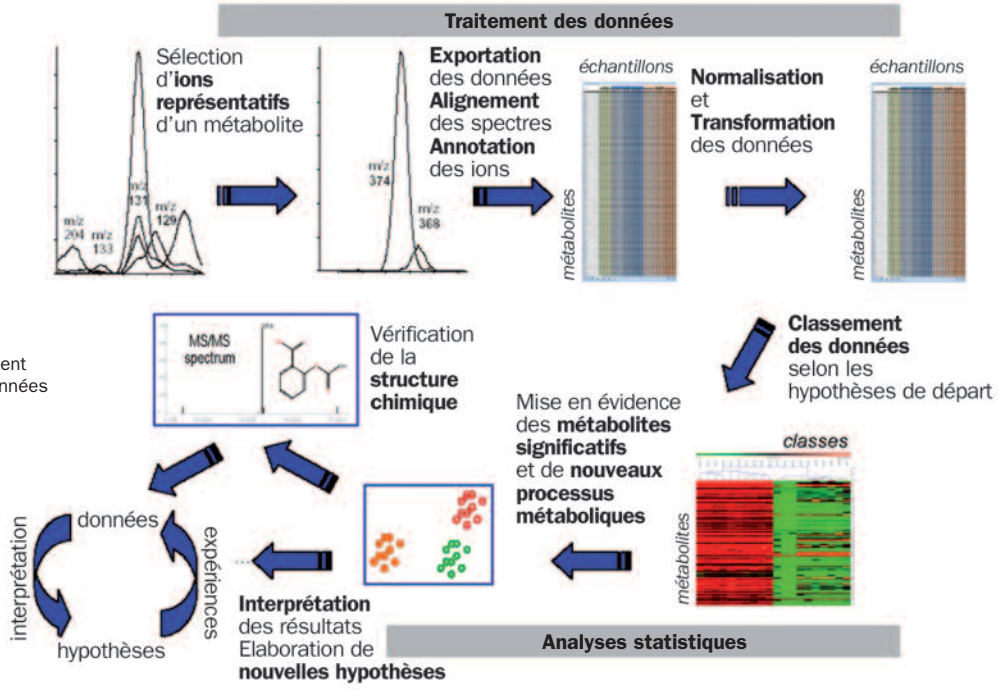


Figure 6 :
Pipeline de traitement et d'analyse de données métabolomiques

VI.2 Régulation et évolution des voies métaboliques

Les connaissances actuelles portant sur les voies de biosynthèse des métabolites secondaires sont encore très nettement insuffisantes, particulièrement en France où une structuration des efforts dans ce domaine nécessite une interdisciplinarité difficile à mettre en place. En particulier, les études des voies métaboliques chez les organismes marins restent très nettement insuffisantes voire absentes. Chez les plantes terrestres et un nombre croissant de micro-organismes, l'accession au génome complet a accéléré la compréhension des métabolismes et de leur évolution. En particulier, la Génomique comparée et la Phylogénomique ont révélé le rôle majeur des transferts horizontaux de gênes dans « l'invention métabolique » et dans l'émergence de nouveaux phylums*. Par exemple, la conquête de la vie sur terre a été possible pour les plantes terrestres par l'acquisition de la phénylalanine ammonia-lyase productrice de l'acide cinnamique et son intégration dans des réseaux métaboliques préexistants tels que celui des polycétides.

Les approches génétiques ont également été décisives pour révéler de nouvelles voies et des étapes manquantes et apporter une validation fonctionnelle. Des progrès sur la biosynthèse de métabolites secondaires peuvent être issus d'une combinaison d'approches de génétique quantitative et de travaux d'ingénierie métabolique utilisant des systèmes hétérologues (e.g. voie des glucosinolates indoliques chez le tabac). En l'absence de génome complet, les outils de Génomique fonctionnelle, qui intègrent les données de Métabolomique et de Transcriptomique, permettent de mieux comprendre un système complexe dans son ensemble et de mieux interpréter les conditions de modulation de ses voies métaboliques. L'utilisation de précurseurs marqués isotopiquement combinée à des approches métabolomiques permet maintenant d'accéder à des données cinétiques sur les flux de production de ces métabolites.

Des projets interdisciplinaires centrés sur des modèles communs permettront sans nul doute d'élucider des voies de biosynthèse de métabolites secondaires d'intérêt mais aussi de mieux comprendre la régulation de ces voies en condition de stress ou dans leur environnement. L'émergence de la Métabolomique appliquée à ce domaine est donc particulièrement prometteuse.

VI.3 Apport de la Métabolomique à l'Écologie fonctionnelle

Dans l'environnement, des signaux chimiques jouent des rôles essentiels à différents niveaux écologiques, de l'espèce (e.g. dynamique des cycles de vie, développement larvaire, phénologie, morphogénèse, croissance vs défense), aux réseaux trophiques (e.g. herbivorie, « brown food chain », relation proie/prédateur) jusqu'à la structuration des communautés (allélopathie) mais aussi au niveau des cycles biogéochimiques intégrant le compartiment microbien, que ce soit en milieu marin ou terrestre. L'Écologie fonctionnelle est un champ d'application de la Métabolomique en plein essor. Elle s'accompagne en général d'approches combinées de type « Omiques » et est rendue possible par une certaine connaissance des processus chimiques et moléculaires à la base de la Physiologie de l'espèce et des interactions biotiques. En effet, le changement d'échelle lié au transfert d'études du laboratoire vers l'environnement naturel induit différents niveaux de complexification, comme :

- l'impact des facteurs abiotiques et de l'ontogénie sur la synthèse et la libération de métabolites secondaires et sur les interactions biotiques, qu'elles soient trophiques, symbiotiques, endophytes, pathogènes ou autres ;
- la forte dilution ou la transformation spatio-temporelle des signaux chimiques ;
- la nécessité d'intégrer des réseaux de communication intra- et inter-spécifiques et à l'échelle de la communauté ou de l'écosystème.

Ainsi le domaine de recherche sur les relations plantes-insectes, l'un des plus avancé en termes de compréhension des mécanismes de signalisation chimique entre eucaryotes, a évolué ces dernières années vers des études plus complexes à l'échelle des communautés. De même, l'apport de la Métabolomique associée à la Métagénomique a permis d'explorer la dynamique et le fonctionnement de certaines communautés bactériennes (sol, tractus digestif) et de progresser dans la compréhension d'assemblages bactériens (biofilms). En milieu marin, les interactions biotiques régies par des communications chimiques semblent être au centre de la dynamique de certaines populations planctoniques mais souvent la nature des signaux chimiques et les mécanismes responsables de leur biosynthèse restent inconnus. En milieu terrestre, le rôle des métabolites secondaires en écologie des interactions et plus particulièrement sur la biodiversité via les processus allélopathiques reste encore à explorer. Dans les deux cas, la Métabolomique permettra d'identifier des marqueurs de ces processus écologiques.

Figure 7 :
Communauté benthique de substrats durs en Méditerranée occidentale, dominée par des anthozoaires et des spongiaires luttant pour l'espace

VI.4 Études des relations procaryotes-eucaryotes

Le dialogue moléculaire entre organismes eucaryotes et procaryotes peut être à l'origine de l'installation d'une symbiose entre organismes ou de coévolution, mais aussi de l'apparition de pathologies. Un effet mesuré à ce niveau peut être une réponse à des stress environnementaux qu'il devient important de comprendre pour pouvoir proposer des moyens de lutte écologique contre des pathogènes ou encore des espèces invasives. Ces interactions ont d'abord fait l'objet d'études aux niveaux transcriptomique et protéomique qui ont permis de comprendre quels sont les gènes impliqués dans les phénomènes de régulation. Mais l'étude des métabolites dans leur ensemble ou encore des variations du contenu chimique (biochimique), abordée grâce aux analyses métabolomiques, permet de caractériser la fonction des gènes impliqués au niveau de ces interactions. Environ 90% des plantes établissent des interactions avec les champignons mycorhiziens. Le profilage métabolique a permis de montrer l'impact de la présence de ces champignons sur la plante et la modification de leurs voies métaboliques. Des phénomènes du même type ont été observés lors d'interactions entre plantes et bactéries, entre insectes et procaryotes divers, et doivent certainement exister également chez les organismes marins. Dans tous les cas, le recensement des métabolites synthétisés et l'étude de l'évolution du contenu chimique de chacun des acteurs ou de leurs exsudats permettent d'avancer dans la compréhension de ces interactions bénéfiques. Une démarche équivalente doit être développée pour une meilleure compréhension des relations hôte/pathogènes. Les avancées effectuées dans les technologies de post-génomique permettent désormais d'identifier des réponses locales ou systémiques de différents organismes face à l'attaque d'un agent pathogène (bactérien le plus souvent) et ceci au niveau du transcriptome et du protéome. Ces études ont généré un nombre important de données qui peuvent être attribuées à l'hôte mais aussi au pathogène. Dans ce cadre, la Métabolomique peut constituer l'outil ultime des analyses post-génomiques, dans la mesure où elle

est le reflet des régulations transcriptionnelle et post-transcriptionnelle. Enfin, les outils de la Métabolomique permettent d'étudier de manière globale l'influence de l'environnement sur ces relations : perturbation du dialogue moléculaire, stabilité de la symbiose, émergence de maladies, etc. En effet les changements environnementaux s'accompagnent souvent de variations fonctionnelles et métaboliques, expression directe de mécanismes d'adaptation aux nouvelles conditions environnementales pouvant remettre en cause une symbiose, provoquer l'émergence ou l'exercice de la virulence d'un pathogène. L'association de la Métabolomique avec les outils d'analyse génomique permettra de démultiplier le potentiel d'investigation des processus co-évolutifs et de pouvoir en dégager des traits généraux au sein de ces processus qui peuvent déboucher sur une nette amélioration des connaissances dans le domaine des interactions biotiques et dans les processus impliqués lors de leur mise en place.

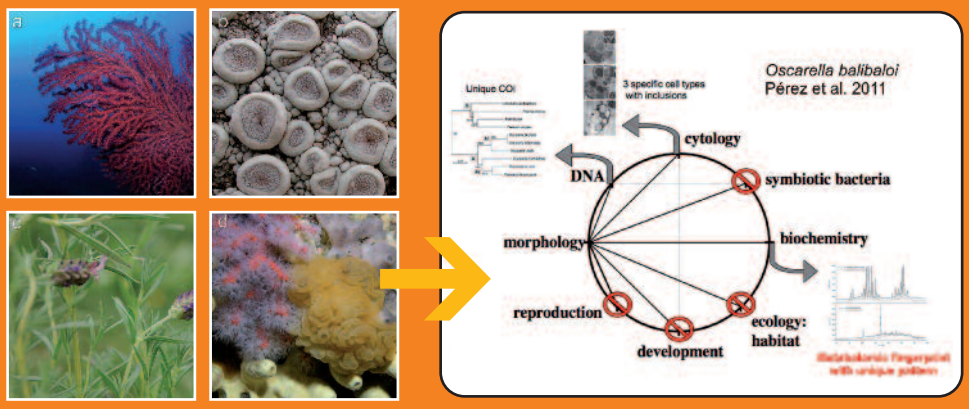
VI.5 Application de la Métabolomique environnementale à l'étude des perturbations de grande ampleur

Les conséquences du changement climatique sur le métabolome des espèces et les conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes sont loin d'être établies. En effet, elles varient selon les espèces, et en fonction du type de métabolite secondaire et de l'intensité du changement. Des études sont nécessaires afin d'évaluer si ce changement mène à une redistribution de ressources avec une augmentation des défenses naturelles chez les espèces les plus compétitrices et donc une amplification des processus allélopathiques. De même, il est indispensable d'approfondir les connaissances sur les conséquences rétroactives de cette réallocation des ressources, en termes de croissance, de biodiversité et d'interactions biotiques par le biais des processus allélopathiques.

Les invasions biologiques constituent un des quatre piliers des changements globaux qui modifient et altèrent la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes à une échelle planétaire, avec des conséquences écologiques et économiques majeures. De par leur caractère universel (tous les phylums, tous les habitats), les introductions biologiques sont de véritables laboratoires naturels pour étudier les mécanismes d'acclimatations, d'adaptations et d'évolution d'espèces confrontées à un nouvel environnement, où l'Écologie chimique joue un rôle central. Dans ce contexte, la Métabolomique peut intervenir dans l'identification des médiateurs chimiques de ces interactions biotiques et des perturbations en résultant. L'espèce introduite peut ainsi produire des composés chimiques toxiques, acquérir de nouvelles ressources nutritives ou modifier son comportement sous la dépendance de signaux chimiques particuliers (e.g. formation de supercolonie chez une fourmi invasive, métamorphose larvaire de la crépidule marine), ce qui peut être essentiel au succès de son expansion. Des résultats suggèrent aussi une évolution des traits chimiques dans le territoire d'invasion où les génotypes les plus agressifs pourraient présenter des cocktails chimiques nouveaux résultant des hybridations post-introduction. Ce phénomène est particulièrement important à prendre en compte car il offre la possibilité aux hybrides d'accéder par exemple à des niches écologiques différentes ou bien d'être mieux armés, plus compétitifs. Les approches métabolomiques pourraient également permettre de mieux comprendre quelles sont les phéromones impliquées dans des interactions conspécifiques d'une espèce invasive et en fonction de leurs spécificités être utilisées à des fins de contrôle des populations invasives.

De façon générale, la Métabolomique, comme les autres disciplines « Omiques », est encore toutefois marginale dans l'étude des réponses des écosystèmes au changement global à côté des approches plus « classiques » d'Écologie. Des interactions plus fortes entre les communautés de chercheurs concernés ainsi que le développement d'outils plus univerels pourront certainement permettre à une communauté élargie de développer des approches d'Écologie chimique et notamment métabolomiques afin de décrypter les mécanismes physiologiques et moléculaires mis en œuvre. Cet enjeu est d'autant plus important que les facteurs de perturbation qu'ils soient biotiques (nouveaux pathogènes, espèces invasives) ou abiotiques (polluant, anomalies climatiques) influencent profondément les cycles biogéochimiques globaux (cf. le chapitre Écogéochimie p.31).

Focus 7 : Taxonomie intégrative



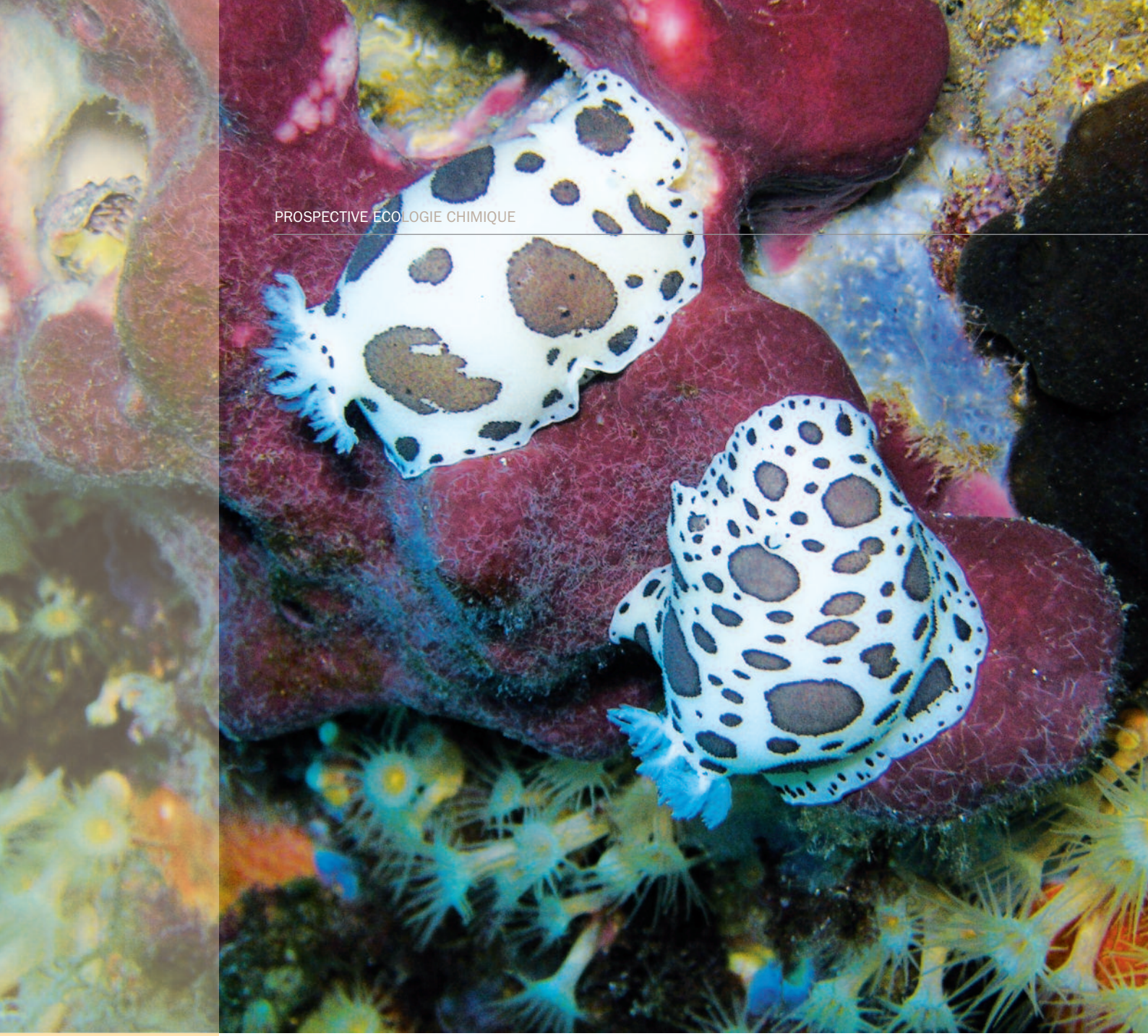
La taxomomie intégrative s'avère particulièrement intéressante pour résoudre des complexes d'espèces dans des groupes taxonomiques difficiles (ici octocoralliaires, lichens, plantes ou éponges), et ainsi décrire des espèces cryptiques. Dans le cas des éponges *Homoscleromopha* sp. l'absence des caractères fondamentaux de la systématique de ce groupe (squelette de spicules) a stimulé l'utilisation de six jeux de données différents pour décrire une nouvelle éponge du genre *Oscarella* (d'après Cardenas et al., 2012)

La combinaison de plusieurs types de caractères complémentaires pour évaluer le statut d'une espèce est appelée Taxonomie intégrative. Elle est aujourd'hui considérée comme l'approche la plus rigoureuse en Systématique, recommandant un minimum de trois types de caractères taxonomiques différents. Le « cercle taxonomique » (DeSalle et al., 2005) est une façon d'illustrer comment la taxonomie intégrative fonctionne. Les lignes qui traversent le cercle indiquent les différentes voies possibles pour vérifier des hypothèses taxonomiques. Pour créer un nouveau taxon, il est nécessaire de confirmer l'hypothèse taxonomique en croisant le cercle à l'aide de jeux de données indépendants. Ces jeux de données sont traditionnellement morphologiques et moléculaires, mais d'autres caractères sont de plus en plus fréquemment utilisés (e.g. cytologie, symbiontes procaryotes, reproduction, écologie). Parmi eux, les marqueurs chimio-taxonomiques peuvent être particulièrement informatifs, et les signatures métabolomiques offrent aujourd'hui des perspectives d'application nombreuses dans la mesure où elles ne nécessitent pas obligatoirement l'isolement et la caractérisation des composés chimiques pour donner une indication pertinente.

VI.6 Apport de la Métabolomique à la compréhension des mécanismes de l'adaptation

Toute modification de l'environnement constitue une source potentielle, nouvelle ou intensifiée, de sélection directionnelle sur des traits importants pour la valeur sélective d'une espèce. A la combinaison de pressions de sélections fortes (notamment dans le cadre du changement global actuel), les organismes peuvent répondre de façon intégrative par des réponses adaptatives (e.g. ajustements physiologiques, processus micro-évolutifs). Ces actions synergiques peuvent faire varier l'état de stress physiologique des organismes et des populations, et éventuellement affecter en retour le potentiel adaptatif des espèces aux changements environnementaux contemporains. Cependant on connaît mal les mécanismes par lesquels la combinaison de facteurs de stress environnementaux est traduite en une réponse physiologique, modifiant ainsi la valeur sélective en milieu naturel. De même distinguer les parts respectives des réponses génétiques et phénotypiques (plasticité phénotypique) reste toujours difficile. Or, les mécanismes de l'adaptation opèrent du gène à l'organisme et se répercutent jusqu'à l'écosystème. Le métabolome constitue un niveau clé, quoique encore peu utilisé, dans l'étude des mécanismes de l'adaptation. En effet un facteur de stress peut induire une modification de la production des métabolites secondaires, qui, compte tenu de leur rôle majeur dans l'organisme (notamment défense chimique et survie) peut conduire à une modification de la valeur sélective.

Aujourd'hui, la démocratisation de la Métabolomique et des nouvelles technologies de séquençage appliquées au génome et au transcriptome permet d'accéder de façon très complète à la quasi-totalité de ces niveaux d'organisation et par là-même d'envisager une approche intégrative amenant à une connaissance approfondie des mécanismes de l'adaptation.



POUR EN SAVOIR PLUS

Allwood J.W., A. Clarke, R. Goodacre, and L. A. J. Mur. 2010. Dual metabolomics: a novel approach to understanding plant-pathogen interactions. *Phytochemistry*, 71(5-6):590–597.

Bundy J., M. Davey, and M. Viant. 2009. Environmental metabolomics: a critical review and future perspectives. *Metabolomics*, 5:3–21.

DeSalle R.,, M.G. Egan, and M. Siddall. 2005. The unholy trinity: taxonomy, species delimitation and DNA barcoding. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360, 1905-1916.

Dicke M. and I. T. Baldwin. The evolutionary context for herbivore-induced plant volatiles: beyond the cry for help, *Trends Plant Sci*.,15:167–75.

Field K. J., and J. A. Lake. 2011. Environmental metabolomics links genotype to phenotype and predicts genotype abundance in wild plant populations. *Physiol Plant*, 142(4):352–360.

Ivanišević J., O. Thomas, C. Lejeusne, P. Chevaldonné, and T. Pérez. 2011. Metabolic fingerprinting as an indicator of biodiversity: towards understanding inter-specific relationships among Homoscleromorpha sponges. *Metabolomics*, 7:289–304.

Lindon J.C., J. K. Nicholson, E. Holmes, H. C. Keun, A. Craig, J. T. M. Pearce, S. J. Bruce, N. Hardy, S.-A. Sansone, H. Antti, P. Jonsson, C. Daykin, M. Navarange, R. D. Beger, E. R. Verheij, A. Amberg, D. Baunsgaard, G. H. Cantor, L. Lehman-McKeeman, M. Earll, S. Wold, E. Johansson, J. N. Haselden, K. Kramer, C. Thomas, J. Lindberg, I. Schuppe-Koistinen, I. D. Wilson, M. D. Reily, D. G. Robertson, H. Senn, A. Krotzky, S. Kochhar, J. Powell, F. van der Ouderaa ,R. Plumb, H. Schaefer, M. Spraul, and S. M. R. S. working group. 2005. Summary recommendations for standardization and reporting of metabolic analyses. *Nat Biotechnol*, 23(7):833–838.

Macel M. , N. M. V. Dam, and J. J. B. Keurentjes. 2010. Metabolomics: the chemistry between ecology and genetics. *Mol Ecol Resour*, 10(4):583–593.

Mollo E., M. Gavagnin, M. Carbone, F. Castelluccio, F. Pozone, V. Roussis, J. Templado, M. T. Ghiselin, and G. Cimino. 2008. Factors promoting marine invasions: a chemoecological approach. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105(12):4582–4586.

Nielsen M.C., and J. Jewett. 2007. *Metabolomics - A Powerful Tool in Systems Biology*. Topics in Current Genetics Series. Heidelberg, Germany: Springer.

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 CO_2 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. H_2S) 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.

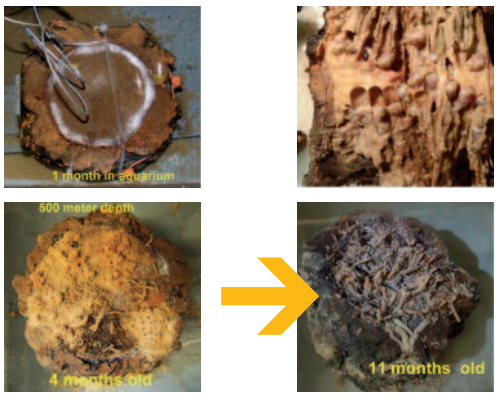
VII.1 Nécessaire convergence de la Chimie environnementale, de la Biogéochimie et de l'Écologie

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 changements 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 changements 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, détoxication) 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'expliciter 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 secrétés 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, bentho-pélagique, etc.) ;
- Importance des évènements 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.

Vaquer-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.

VIII BASES DE DONNÉES

Coordinateurs : N. Barthes, M. Litaudon

L'atelier bases de données a été l'occasion de référencer les principales bases de données de nos disciplines et de permettre à leurs développeurs/gestionnaires de se rencontrer. En effet, les bases de données sont principalement conçues comme des outils de collaboration au sein d'une équipe et leurs utilisations sont généralement spécialisées dans un domaine de recherche. Ceci explique leur faible visibilité par la communauté scientifique au sens large. Cinq bases de données principales ont été identifiées dans le cadre des travaux en Écologie chimique :

L'extractothèque de l'ICSN de Gif-sur-Yvette

(http://www.icsn.cnrs-gif.fr/article.php3?id_article=144).

Cette base informatique, créée en 2005, recense une collection d'extraits naturels, préparés à partir de plantes supérieures provenant généralement des « points chauds de la biodiversité », répartis en plaques multi-puits. Pour chaque échantillon, sont répertoriées les données relatives (1) à l'organisme collecté : pays collaborant, taxonomie, date et lieu de prélèvement, photos, etc. ; (2) à la gestion des plaques multipuits : référencement, position des échantillons sur la plaque, déclaration de lots, déclaration des envois de plaques et retour des résultats ; (3) aux essais biologiques : cibles, domaine pharmacologique, « laboratoire propriétaire de la cible », résultats biologiques. A la mi-2011, l'extractothèque recensait approximativement 6500 plantes et 14000 extraits dont la plus grande partie était régulièrement transférée vers la Chimiothèque Nationale. L'objectif est d'entreprendre un certain nombre de criblages biologiques par la mise en œuvre d'essais robotisés et miniaturisés. Les extraits qui présentent une activité biologique significative sur une cible donnée sont étudiés pour en isoler les constituants responsables de cette activité. La base de données de l'extractothèque ICSN constitue aujourd'hui un outil de gestion et de recherche extrêmement puissant, mais limité toutefois aux seuls extraits des plantes supérieures. A moyen terme cette base pourra s'étendre à d'autres types d'extraits organiques comme des extraits issus de micro-organismes ou d'organismes marins. Il pourrait également être envisagé d'y intégrer les structures des molécules découvertes ainsi que l'ensemble des activités biologiques qui les concernent.

Cantharella de l'IRD à Nouméa

(http://cantharella.ird.nc).

Cette base de données opérationnelle depuis 2010 est particulièrement modulable. Elle a été pensée pour faciliter la gestion des différentes campagnes d'échantillonnage d'équipes travaillant sur des projets du milieu marin. L'outil a cependant été conçu de telle façon qu'il peut s'adapter aux produits naturels quelle qu'en soit l'origine. Bien que Cantharella référence le même type de données que l'extractothèque (taxonomie, gestion des échantillons – prélèvement, traitement, purification, analyses chimiques – et essais biologiques – cibles biochimiques, résultats d'analyses –), elle met fortement l'accent sur la gestion des droits d'accès aux données et permet d'ajuster très finement la diffusion des informations, que ce soit aux différents collaborateurs ou dans le cadre de restitutions vis-à-vis des pays, territoires, communautés d'où proviennent les orga-

nismes. Des développements de modules informatiques sont encore prévus (adjonction de documents, bibliothèque de molécule, SIG, etc.). Ceci étant, l'application Cantharella est pleinement fonctionnelle et actuellement utilisée pour partager et pérenniser l'information scientifique entre équipes d'un même projet. Elle permettra à terme la diffusion des données publiques. Il est à noter que l'application Cantharella sera prochainement diffusée sous licence libre (http://sourceforge.net/p/cantharella/home/Cantharella/), avec comme objectif d'élargir la communauté des utilisateurs et de rassembler des développeurs autour du projet.

La base de données collaborative du projet ANR Ecimar

Cette base de données a été initiée en 2007 pour réunir les données recueillies au cours des campagnes d'échantillonnage du projet ANR d'Écologie chimique marine ECIMAR. Pour chaque échantillon récolté, elle comporte des données de taxonomie, des illustrations des organismes *in situ* (éponges, cnidaires en majorité), et les signatures chimiques acquises selon plusieurs détecteurs. Elle regroupe aussi les informations concernant les lieux d'échantillonnage et la localisation précise des prélèvements. Les signatures chimiques regroupées dans cette base de données ont été acquises selon un protocole standardisé, et complétées par les caractérisations structurales de composés et des tests de bioactivité. Cette base a été alimentée par les différents partenaires du programme, et elle recense actuellement plus de mille échantillons prélevés sur environ 200 espèces marines. La structure de la base de données est évolutive, et elle va d'ailleurs servir à la création d'une base de données « fille » pour la gestion d'autres programmes de recherche (e.g. projet européen « Bammbo »).

L'EcoChimiothèque du GDR 2827 d'Écologie chimique

(http://ecochimiotheque.cefe.cnrs.fr).

Cette base de connaissances, initiée en 2010, a pour objectif de fédérer, classer et permettre d'analyser les informations biologiques, chimiques et physico-chimiques disponibles dans le domaine des médiateurs chimiques. Elle permet aux chimistes et écologues de partager leurs informations liées à la taxonomie, aux lieux et techniques de prélèvement ou de traitement de l'échantillon ainsi que les données physico-chimiques, analyses chimiques effectuées sur ces échantillons, disponibilité et accessibilité par synthèse chimique. Développée sur la base de l'application de « chimiothèque départementale » de la Chimiothèque Nationale (pour lui assurer une pleine compatibilité), elle est actuellement en phase de tests et devrait être alimentée dès 2012.

La Chimiothèque Nationale

(http://chimiotheque-nationale.enscm.fr).

Née au début des années 2000 de plusieurs initiatives individuelles, la Chimiothèque Nationale est aujourd'hui un GIS, auquel adhèrent 34 établissements d'enseignement supérieur ou organismes de recherche (Directeur : Marcel Hibert). Elle est représentée dans cet atelier par Philippe Jauffret, directeur de l'UGCN (UPS 3035 du CNRS), unité support du GIS CN. La Chimiothèque Nationale a pour mission principale de regrouper les collections de produits de synthèse, de composés naturels et d'extraits naturels existant dans les laboratoires publics français et d'en promouvoir la valorisation scientifique et industrielle. Les informations (structure chimique, propriétés physico-chimiques, données pharmacologiques, etc.) concernant les molécules et extraits disponibles sont regroupées dans deux bases de données interrogeables via le WEB. En juin 2011, la CN référençait 46000 substances et 14500 extraits, tous libres de droits et disponibles. Ces produits sont conditionnés en vrac ou en microplaques de 96 puits (ou les deux), afin de permettre leur évaluation biologique, ciblée ou systématique. L'ICSN et le MNHN sont les principaux contributeurs des collections de composés et d'extraits naturels de la Chimiothèque Nationale.

Thématiques émergentes

En Écologie chimique comme dans beaucoup de domaines, les bases de données sont devenues un outil central et essentiel dans la gestion des données scientifiques. Les technologies actuelles permettent de stocker des informations de nature très variable, de les rendre accessible à distance et ainsi de les partager immédiatement avec des collaborateurs. Ces progrès technologiques ont permis à diverses équipes d'organiser plus efficacement leur programme de recherche en permettant un meilleur suivi de leur état d'avancement ou parfois en offrant un outil d'aide à la rédaction de rapports. En tâche de fond, la centralisation des données au sein de bases de données permet une pérennisation de ces données scientifiques par la sauvegarde massive et automatisée rendue possible par l'accroissement des capacités de stockage des disques durs. Il faudra tout de même veiller à mettre à jour les formats de données afin de permettre leur lecture dans les années futures et ne pas se laisser dépasser par l'évolution des normes de fichiers.

Une contrepartie importante à ces déploiements facilités de bases de données est que chacun a pu, personnellement ou dans le cadre de son équipe de travail, développer sa propre base conduisant a un morcellement de l'information au sein de multiples bases de petite taille. De plus, si les Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) sont généralement homogènes et principalement articulés autour de la norme SQL, les interfaces de connexion font appel à toute une multitude de technologies et de langages informatiques.

Un second écueil des progrès technologiques apportés aux méthodes de travail en recherche scientifique (dans tous leurs aspects) est que la quantité de données à traiter est devenue conséquente. Pour faire face à ces flots d'informations et arriver à les interpréter de manière pertinente, des outils statistiques sont en cours de développement ou d'utilisation pour les plus avancés (MSEASY ou XCMS par exemple pour le traitement assisté de données d'analyses chimiques). Ces outils doivent permettre de gérer au mieux les différentes sources de données et se confrontent souvent à un obstacle majeur : il n'y a pas de norme associée au format des fichiers de sorties générés par les machines, en particulier, pour ce qui nous concerne, dans le domaine de l'analyse chimique ou du séquençage.

Par ailleurs, le rapprochement de ces bases en Écologie chimique avec l'initiative d'inventaire et de gestion des bases de données réalisée par INEE est en cours, en particulier avec la création depuis septembre 2011 d'une Unité Mixte de Service (UMS 3448, CNRS-MNHN) Bases de données Biodiversité, Ecologie, Environnement et Sociétés (BBEES).

IX PARTENARIAT AVEC LES AUTRES INSTITUTS OU D'AUTRES ÉTABLISSEMENTS DE RECHERCHE

En France

Au niveau du CNRS la thématique de l'Écologie chimique portée par l'INEE nécessite un partenariat fort avec l'Institut de Chimie, ne serait-ce que par l'interaction avec l'ICSN et le MNHN, mais également avec d'autres équipes et/ou chercheurs rattachés à la section 16 de l'INC, la Chimie du Vivant, et à la section 11, Systèmes supra et macromoléculaires. Un lien important et historique reste celui avec l'Institut de Biologie, car anciennement de nombreuses équipes faisant de l'Écologie chimique dépendaient des SDV. Certaines équipes rattachées à d'autres Instituts, comme l'INSB, poursuivent des thématiques proches, comme les équipes de Toulouse (Olfaction et cognisciences : CRCA) ou de Dijon (Goût et communication chimique : CSGA). L'Écogéochimie possède également de fortes interactions avec les Sciences de l'univers (géochimie, climat/océanographie, plateformes analytiques, observatoires).
Le partenariat avec l'INRA, également historiquement associé à la thématique, est important. Une partie appliquée de l'étude des médiateurs chimiques (lutte intégrée, lutte biologique, pollinisation, élevage sain, etc.) est depuis longtemps développée dans des laboratoires des différents départements de l'INRA qui reste un partenaire incontournable.
De même de nombreux chercheurs universitaires, soit dans des unités mixtes (CNRS, INRA), soit non rattachés au CNRS, font ou ont fait de l'Écologie chimique, et ce pour certains depuis la création de la société internationale en 1984. Il est essentiel, par leur intermédiaire également, que des enseignements sur cette thématique s'étendent en France et que des passerelles plus fortes soient établies entre les enseignements de Chimie et d'Écologie. Ces passerelles sont encore à construire de façon à développer, dès la formation universitaire, un intérêt des chimistes pour l'Écologie, et inversement.
Le développement des « Omiques » a conduit aussi à des collaborations avec l'INRIA.
Dans le domaine marin les collaborations avec l'IFREMER et l'IRD sont nombreuses.
De même il existe des partenariats avec :

- les Grandes Écoles : Partenariats de recherche, menés en synergie avec les activités d'enseignement dans le but de créer des filières adaptées aux activités interdisciplinaires ciblées, et inexistantes actuellement (Chimie-Écologie notamment)
- les fondations, les réseaux et les groupes : à titre d'exemple la FRB, les GDSA, la SCF, Green Chemistry Network, Suschem

A l'international

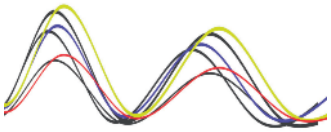
Les différents membres des GDR et autres laboratoires développant cette thématique ont des collaborations fortes avec des laboratoires du monde entier faisant de l'Écologie chimique, autant en Europe que dans le reste du monde ; les USA, à l'origine de la création de la société internationale ISCE (International Society of Chemical Ecology : https://sites.google.com/a/chemecol.org/welcome/home), est le pays ayant le plus développé cette thématique et il est donc naturellement celui avec lequel le plus grand nombre de collaborations soient actives. Cependant, cette thématique est également très développée en Europe du Nord (par ex. en Grande-Bretagne : Rothamsted ; Suède : Lund ; Pays-Bas : Wageningen), en Suisse (par ex. Neuchâtel) et en Allemagne. Dans ce dernier pays, il existe même un institut Max Planck dédié à l'Écologie chimique à Iéna (http://www.ice.mpg.de/ext/).
Le développement de différents thèmes de l'Écogéochimie apparaît aujourd'hui plus avancé dans certains pays tels que l'Allemagne, le Danemark, les États-Unis ou le Canada mais il est mené par des communautés différentes n'ayant que peu d'interactions entre elles (ex : Écologie microbienne et Géobiologie d'une part et Écologie des écosystèmes d'autre part). L'originalité de l'approche française CNRS pourra être une intégration renforcée de ces différents thèmes.
Le concept de Chimie verte, écologique et durable exprimé à travers le réseau international GSCN et la plateforme européenne SUSCHEM sont les témoins d'une discipline en pleine mutation, où l'Écologie chimique, mais aussi globale, sont des sources d'inspiration nouvelles pour la création de filières vertes innovantes :
Green Chemistry Network (http://www.greenchemistry-network.org), *Suschem* (www.suschem.org).

Et encore d'autres réseaux plus spécifiques à la métabolomique :
Metabolomics Core, Genome Center, UC Davis, États-Unis (http://metabolomics-core.ucdavis.edu/) ;

Metabolomics Research, University of Birmingham Royaume-Uni (http://www.metabolomics.bham.ac.uk/) ;

Netherlands Metabolomics Centre (www.metabolomics-centre.nl) et *Plant Research International* (http://www.pri.wur.nl), Pays Bas.

X OUTILS À PROMOUVOIR



La Chimie des produits naturels nécessite des outils pointus et performant compte-tenu de la particularité des systèmes à étudier : UPLC, SPE, Head-space-CPG, méthodes couplées LC-MS, GC-MS. L'identification des métabolites fait appel aux méthodes modernes de spectroscopie (Résonance Magnétique Nucléaire, spectrométrie de masse, Radiocristallographie aux rayons X, dichroïsme circulaire, etc.) et au développement de méthodologies informatisées et mathématiquement assistées (Analyse métabolomique, Analyses multivariées, Modélisation moléculaire, etc.). La déréplication d'un mélange de métabolites secondaires produit par une plante, un organisme marin ou un microorganisme est un challenge pour le chimiste des produits naturels qui nécessite des outils performants où la spectroscopie de RMN joue un rôle central.

L'apport de la Chimie des produits naturels à l'Écologie chimique ne peut se limiter à l'isolement et la structure de métabolites secondaires. Mettre en évidence les voies de biosynthèse qui y conduisent et comprendre les mécanismes réactionnels qui les génèrent sont deux aspects essentiels à une approche moléculaire approfondie de la communication chimique et des stratégies d'adaptation observées. L'aspect dynamique de l'interface Chimie-Écologie est encore largement sous-estimé et nécessite d'être promu et développé en soutenant la communauté des chimistes organiciens de synthèse qui se sont spécialisés dans le domaine.

Figure 9 :
Sonde électrochimique pour caractériser *in situ* l'environnement chimique des écosystèmes profonds (profondeur : 2500m)

X.1 Dans les problématiques expérimentales

a. **Extraction des signaux** pertinents en lien avec la phénologie des modèles étudiés, leur milieu de vie (par ex. chez les organismes vivant en milieu extrême) et de l'approche fonctionnelle ciblée ;

b. Développement de méthodologies pour les **essais biologiques quantitatifs** (tests comportementaux, sensoriels), soit rapides (criblage), soit fines (analyse des mécanismes) ;

c. **Imagerie** pour le suivi des médiateurs (FISH, spectroscopie proche infrarouge, RMN, imagerie par spectrométrie de masse) ;

d. Utilisation d'**organismes « modifiés »** ; modifications post-traductionnelles ;

e. Étude des **relations structure-fonction** des médiateurs chimiques avec leurs protéines de liaison et/ou récepteur (imagerie calcique, modélisation moléculaire) ;

f. Outils de **chimie utilisables sur le terrain** (LC-MS *in situ*, PTR-MS par ex.) ; outils de dosage des signaux en temps réel ; appareillages plus sensibles (pour analyse des doses véritablement biologiques) et plus spécifiques ;

g. Mise au point de **capteurs et de diffuseurs stables et répétables *in situ***.

L'analyse chimique des sols est un bon exemple. Cette analyse est peu développée, même si son importance est reconnue. Ce domaine présente des difficultés particulières, notamment dans l'étude des composés volatils ou des micro-éléments (sélénium, soufre, calcium, etc.), ou même dans l'analyse des facteurs abiotiques, comme les rapports stœchiométriques des éléments (C:N:P), sur la libération des médiateurs chimiques, alors que l'enjeu en agriculture ou dans la lutte contre les feux de forêt est important. Par exemple, l'analyse d'activités métaboliques dans le sol par IR ou l'analyse des substances à très faibles concentrations ou faisant intervenir les micro-éléments (GC-ICP-MS et LC-ICP-MS) devrait être développée. L'établissement de stations expérimentales et de sites d'expérimentations en milieu contrôlé de type écotron (macro-, méso- et microcosmes) ou chambres d'enfermement sont à favoriser. En effet l'analyse multimodale et multitemporelle de communautés souvent complexes et de leurs émissions en lien avec les nombreuses variables abiotiques, effet du stress, suivi temporel des émissions, nécessiterait l'emploi fréquent de ce type d'outils. Les écotrons (voir aussi le Focus 8 p.42) permettent de travailler sur des écosystèmes complexes et réalistes, à des échelles très différentes sur un même site et de disposer d'une forte puissance statistique.

L'expérimentation *in situ* en milieu naturel, complémentaire de l'observation et de l'expérimentation en environnement contrôlé, reste une étape clé pour la définition et la validation des modèles. Des stations instrumentées d'écologie expérimentale avec des suivis des paramètres chimiques et biologiques de l'environnement sont nécessaires.

Un effort important doit être apporté au développement de capteurs qui permettront de compléter les stratégies d'observation en continu de la biodiversité et de la dynamique des écosystèmes en y ajoutant des traceurs des relations réciproques entre l'activité des organismes et conditions environnementales.

De plus nombreuses plateformes techniques (avec des ingénieurs spécialisés), dédiées à l'Écologie chimique, seraient à promouvoir afin de faciliter le développement de cette communauté scientifique. En effet bon nombre de technologie de pointe ou très coûteuses (RMN, LC-MS, GC-MS-MS par ex.) sont inaccessibles, ou tout du moins difficilement accessibles, aux écologues. L'initiative d'un réseau de plateaux techniques mutualisés dans le grand ouest (Metabo-Mer) est un exemple à suivre.

X.2 Dans le domaine des « Omiques » et de la Métabolomique

a. **Promouvoir la mise en place de plateaux de métabolomique performants** (RMN haut champ, UPLC, HRMS équipés pour le haut débit) **dédiés à des applications en Écologie** (notamment en marin), et le recrutement de personnels spécialisés **;**

b. Faciliter l'accès au **séquençage des espèces non modèles** dans les plateformes nationales et régionales de séquençage.

L'essor des nouvelles techniques « omiques » est une opportunité unique pour le développement de l'Écogéochimie. Ces techniques permettent d'aborder sur des bases qualitatives et quantitatives la complexité des réseaux d'interaction écogéochimique. Largement utilisés pour les communautés de procaryotes grâce aux plateformes de séquençage génomique ou de protéomique, l'utilisation de ces outils doit encore être élargi à des communautés plus complexes, incluant la meiofaune, et pour accéder à toute la gamme d'activités métaboliques et de réponse aux stress.

Le développement récent de la Géomicrobiologie, à l'interface de l'Écologie microbienne et de la Géochimie, a permis l'essor de nouveaux outils d'analyse microgéochimique et d'imagerie. XANES (spéciation chimique via les techniques liées au synchrotron), SIMS (isotopie à l'échelle cellulaire) combinées aux techniques d'imagerie moléculaire (FISH) ont permis de décrire la structuration spatiale des communautés microbiennes en parallèle à la distribution de traceurs (isotopes stables, structure minéralogiques et gradient redox à échelle nanométrique. Ces techniques lourdes sont développées et opérées à partir de plateformes sous la gestion d'autres communautés (Physique, Biologie).

X.3 Dans le traitement mathématique des résultats (statistiques, analyses multivariées, gestion des bases de données, biomathématiques, modélisation)

a. **Modélisation** de systèmes complexes et prise en compte des rétroactions du vivant sur l'environnement physique et chimique par approches de réseau. En représentant l'organisation des interactions entre espèces par des graphes de nœuds interconnectés, **la modélisation des réseaux écologiques complexes** offre un cadre essentiel à la compréhension de la réponse des écosystèmes aux perturbations anthropiques.

b. **Développement d'outils de traitement des données métabolomiques, libres, simples et automatisés** (pré et post « processing »). Engager une réflexion pour **homogénéiser les outils, les protocoles, le format de fichiers**, pour le traitement des données métabolomiques, et leur intégration dans d'autres bases de données « Omiques » ;

Évaluer les conséquences écologiques et environnementales de différents types de perturbations, le plus souvent combinées, et prédire les possibilités de mitigation et de remédiation, sont des enjeux sociétaux majeurs. Pour cela, il est crucial de développer une trame conceptuelle commune à l'interface de l'Écologie et des Sciences de l'environnement permettant de prédire la dynamique de systèmes écogéochimiques complexes aux différents niveaux d'intégration des systèmes écologiques. L'Écogéochimie doit relever des défis expérimentaux nouveaux afin de faire le lien entre la prédictibilité des modèles mathématiques et la réalité des conditions de terrain, lien qui repose jusqu'à présent excessivement sur les seules règles de la physique.

X.4 Dans la mise en place d'échanges interdisciplinaires

a. **Former / recruter** des personnes aux interfaces Écologie, Chimie analytique, Géochimie de l'environnement et Bioinformatique et Physique de l'atmosphère

b. **Renforcer les interactions avec les chimistes des produits naturels,** notamment pour alimenter des bases de données de molécules naturelles (Écochimiothèque), favoriser la caractérisation de métabolomes complets et identifier des marqueurs de processus biologiques et/ou écologiques ;

c. **Promouvoir l'interdisciplinarité et les échanges d'expérience et méthodologiques** entre les communautés de scientifiques (notamment marins et continentaux) : congrès, journées de formation et écoles thématiques.

Focus 8 : L'Écotron (UPS 3248, Montpellier)

L'Écotron est une plateforme de recherche expérimentale pour étudier le fonctionnement des écosystèmes, des organismes et de la biodiversité face aux changements environnementaux. Les expériences en Écologie chimique peuvent y être associées à une diversité de conditions expérimentales avec une manipulation rigoureuse des paramètres du milieu (température, conditions hydriques, CO_2, polluants, etc.) et des mesures précises des flux (cycles biogéochimiques, etc.). En plus d'instruments de mesures des isotopes, l'acquisition d'un spectromètre de masse est en projet pour l'analyse en ligne des composés organiques volatils, notamment émis dans le sol. Les plateaux expérimentaux ont été conçus pour accueillir des blocs-échantillons d'écosystèmes prélevés in situ et placés dans des enceintes de trois types : 12 macrocosmes de 35 m^3, 24 mésocosmes de 1 à 3 m^3 et de nombreux microcosmes de 1 à 200 dm^3. Les macrocosmes permettent l'étude la Physiologie d'écosystèmes terrestres herbacés ou ligneux bas et la Biologie des populations animales et microbiennes associées alors que les plus petites enceintes rendent possible l'étude de la Physiologie d'organismes ou de micro-écosystèmes terrestres ou aquatiques. L'accès à cette plate-forme s'effectue par proposition de projets de recherche en réponse à des appels à propositions au niveau international, sélectionnés par le comité scientifique.

www.ecotron.cnrs.fr

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 micronutrients entre compartiments du vivant (groupes d'espèces représentants 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. A 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.

LISTE DES PARTICIPANTS

Chimie du Vivant Éco-inspirée

Ali Al-Mourabit (CNRS, Gif sur Yvette)
Anne-Geneviève Bagnères (CNRS, Tours)
Cédric Bertrand (Université de Perpignan)
Didier Buisson (MNHN, Paris)
Brigitte Frérot (INRA, Versailles)
Claude Grison (Université Montpellier 2)
Catherine Lavaud (Université de Reims)
Yanyan Li (MNHN, Paris)
Georges Massiot (INC, CNRS)
Bastien Nay (MNHN, Paris)
Soizic Prado (MNHN, Paris)
Sylvie Rebuffat (MNHN, Paris)
Isabelle Rico-Lattes (CNRS, Toulouse)

Écologie chimique, une science expérimentale et intégrative

Arnaud Ameline (Université d'Amiens)
Jacques Auger (Université de Tours)
Anne-Geneviève Bagnères (CNRS, Tours)
Virginie Baldy (Université de Provence, Marseille)
Bernard Banaigs (Université de Perpignan Via Domitia)
Jean-Philippe Christidès (CNRS, Tours)
Thierry Comtet (CNRS, Roscoff)
Anne-Marie Cortesero (Université de Rennes)
Catherine Fernandez (Université de Provence, Marseille)
Brigitte Frérot (INRA, Versailles)
David Giron (CNRS, Tours)
Martine Hossaert McKey (CNRS, Montpellier)
Christelle Le Danvic (INRA, Lille)
Patricia Nagnan LeMeillour (INRA, Lille)
Elena Ormeno (Université de Provence, Marseille)
Michel Renou (INRA, Versailles)
Bertrand Schatz (CNRS, Montpellier)

L'Écologie chimique et les Omiques

Cédric Alaux (INRA, Avignon)
Sylvie Baudino (Université de Saint-Etienne)
Marie-Lise Bourguet-Kondracki (MNHN, Paris)
Jean-Claude Caissard (Université de Saint-Etienne)
Emmanuelle Jacquin-Joly (INRA, Versailles)
Yanyan Li (MNHN, Paris)
Christophe Lucas (CNRS, Tours)
Maëlle Molmeret (Université du Sud-Toulon-Var)
Patricia Nagnan-Le Meillour (INRA, Lille)
Carole Smadja (CNRS, Montpellier)
Marcelino Suzuki (Université Paris 6)
Frédérique Viard (CNRS, Roscoff)
Claude Wicker-Thomas (CNRS, Gif sur Yvette)

Approches métabolomiques en Écologie chimique

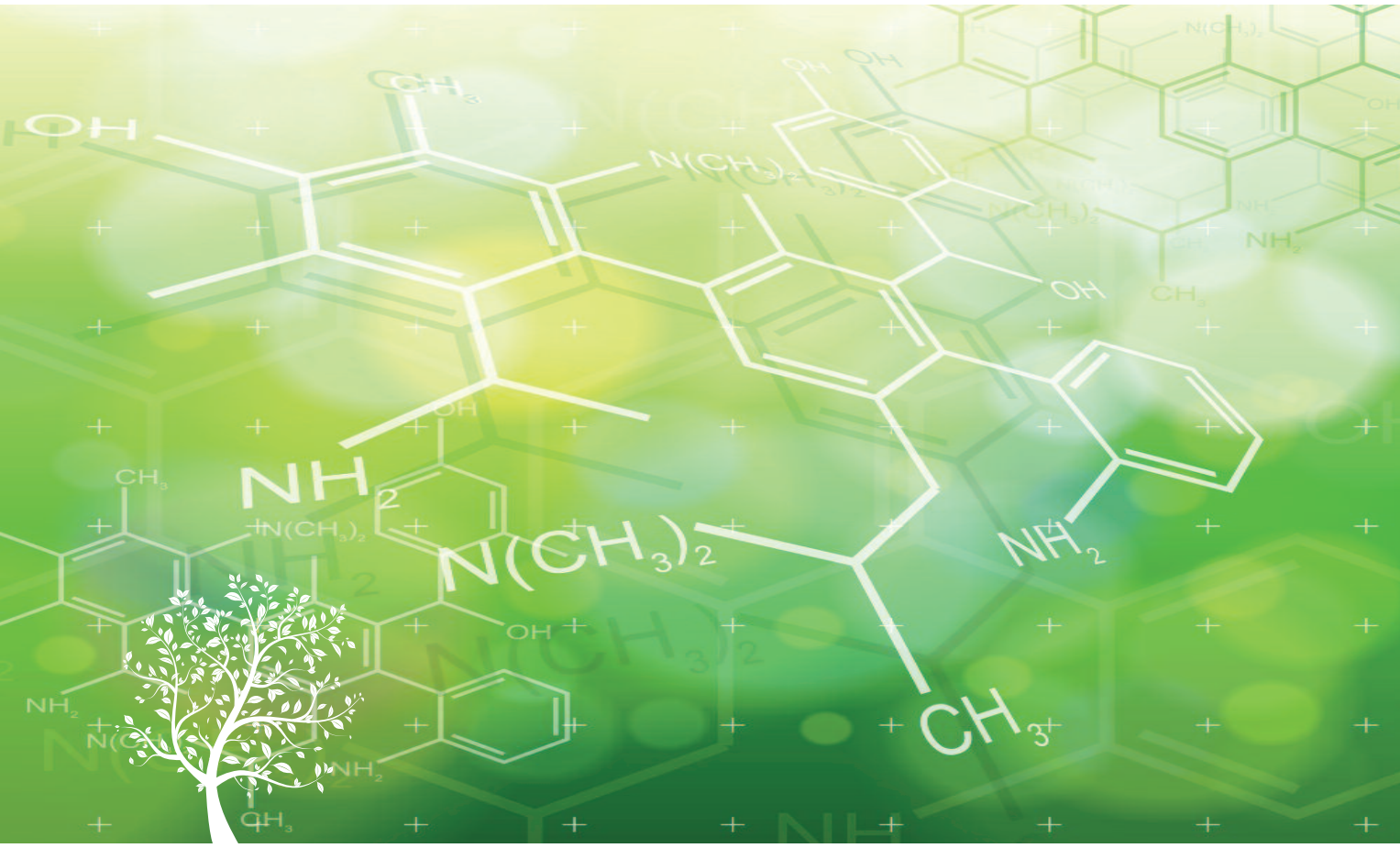
Bernard Banaigs (Université de Perpignan Via Domitia)
Pierre Chevaldonné (CNRS, Marseille)
Gilles Comte (Université de Lyon 1)
Gerald Culioli (Université du Sud-Toulon-Var)
Catherine Fernandez (Université de Provence, Marseille)
Emmanuel Gaquerel (Max Planck Inst. for Chemical Ecology, All.)
Marie Geneviève Dijoux-Franca (Université de Lyon 1)
Catherine Leblanc (CNRS, Roscoff)
Christophe Lejeusne (CSIC Estación Biológica de Doñana, Esp.)
Florence Nicolé (Université de St Etienne)
Thierry Pérez (CNRS, Marseille)
Florence Piola (Université de Lyon 1)
Philippe Potin (CNRS, Roscoff)
Pierre Sauleau (Université de Bretagne-Sud, Lorient)
Olivier Thomas (Université de Nice - Sophia Antipolis)
Sophie Tomasi (Université de Rennes)
Frédérique Viard (CNRS, Roscoff)

Écogéochimie

Luc Abbadie (CNRS, Paris)
Virginie Baldy (Université de Provence, Marseille)
Pierre Barré (ENS, Paris)
Pierre Chevaldonné (CNRS, Marseille)
Rutger De Wit (CNRS, Montpellier)
Catherine Fernandez (Université de Provence, Marseille)
Jean-Marc Guarini (Observatoire Océanologique de Banyuls)
Isabelle Jouanneau (Ecotron Foljuif)
Gérard Lacroix (CNRS, ENS Paris)
Nadine Le Bris (Observatoire Océanologique de Banyuls)
Katell Quenea (UPMC, ENS Paris)
Thierry Pérez (CNRS, Marseille)
Emma Rochelle-Newall (IRD, ENS Paris)

Bases de données

Nicolas Barthes (CNRS, Montpellier)
Philippe Jauffret (CNRS, Montpellier)
Marc Litaudon (CNRS, Gif-sur-Yvette)
Sylvain Petek (IRD, Nouméa)
Olivier Thomas (Université de Nice - Sophia Antipolis)



Photos © CNRS Photothèque / Yann FONTANA / CEFE / T. PÉREZ / S. Tomasi / Florence Nicolé / LECOB CNRS-UPMC / N. Le Bris/WHOI - Illustrations © Fotolia

www.cnrs.fr

Les Cahiers Prospectives