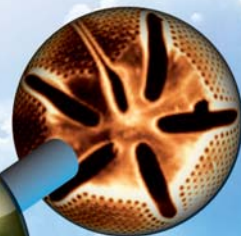


La chimie et la nature

Jacques Amouroux
Éric Blin
Marina Coquery
Marc Pontecave
Bruno Goffé
Françoise Guéritte
Samuel Martin Ruel
Pierre Monsan
Jean-Louis Morel
Michel Rohmer
Christophe Rupp-Dahlem
Clément Sanchez
Jean-François Soussana
Éric Villenave

Coordonné par
Minh-Thu Dinh-Audouin
Danièle Olivier
Paul Rigny



edp sciences
Extrait de la publication



Fondation Internationale
de la Maison de la Chimie

**l'actualité
chimique**
LIVRES

La chimie et la nature



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et nature »,
qui s'est déroulé le 25 janvier 2012 à la Maison de la Chimie.



Collection dirigée par Paul Rigny

La chimie et la nature

Jacques Amouroux, Éric Blin, Marina Coquery, Marc Pontecave, Bruno Goffé,
Françoise Guéritte, Samuel Martin Ruel, Pierre Monsan, Jean-Louis Morel,
Michel Rohmer, Christophe Rupp-Dahlem, Clément Sanchez,
Jean-François Soussana, Éric Villenave

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier et Paul Rigny



Fondation Internationale
de la Maison de la Chimie

edp sciences

Extrait de la publication

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari

Images de la couverture :
Feuille avec goutte : Suez Environnement.
Infographie : Minh-Thu Dinh-Audouin
Mise en pages : Patrick Leleux PAO (Fleury-sur-Orne)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0754-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2012

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Extrait de la publication

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Jacques Amouroux

*Professeur Émérite de Génie Chimique – Docteur Honoris Causa
Chimie ParisTech
Laboratoire de Génie des Procédés Plasmas et de Traitements de Surface, EA 3492*

Éric Blin

*Lyonnaise des eaux
Direction de la Protection de l'Environnement*

Marina Coquery

*Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea)
Laboratoire d'Analyses Physico-chimiques des Milieux Aquatiques
U. R. Milieux aquatiques, Écologie et Pollution*

Marc Fontecave

*Professeur au Collège de France
« Chaire de Chimie des Processus Biologiques »
Académie des Sciences
Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux, UMR5249
Laboratoire de Chimie des Processus Biologiques, FRE3488*

Bruno Goffé

*Directeur de recherche CNRS au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (CEREGE)
Institut National des Sciences de l'Univers (INSU)
Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
Université Aix-Marseille*

Françoise Guéritte

*Directrice de Recherche INSERM
Institut de Chimie des Substances Naturelles (ICSN), CNRS*

Armand Lattes

*Professeur Émérite
Université Paul Sabatier*

Samuel Martin Ruel

*Suez Environnement, Cirsee
Département Recherche et Développement, Assainissement et Environnement*

Pierre Monsan

*Professeur Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse et Mines ParisTech
Senior IUF
Académie des Technologies
Directeur de Toulouse White Biotechnology, UMS INRA 1337*

Jean-Louis Morel

*École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA)
Laboratoire Sols et Environnement, UMR 1120
Université de Lorraine - INRA*

Michel Rohmer

*Académie des Sciences
CNRS/Université de Strasbourg*

Christophe Rupp-Dahlem

Roquette Frères

Clément Sanchez

*Collège de France
Académie des sciences*

Jean-François Soussana

Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) Paris

Éric Villenave

*Institut National des Sciences de l'Univers
Université Bordeaux I
Directeur de l'Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers (OASU)*

Équipe éditoriale

**Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier
et Paul Rigny**

This page intentionally left blank

Sommaire

Avant-propos : par Paul Rigny	9
Préface : par Bernard Bigot	11
Introduction : par Armand Lattes	15

Partie 1

La chimie pour comprendre la nature

Chapitre 1 : La chimie, un outil pour comprendre la nature par Michel Rohmer	25
Chapitre 2 : La chimie atmosphérique : contexte, récents développements et applications par Éric Villenave	47
Chapitre 3 : Biogéochimie et écologie des sols par Jean-François Soussana	63
Chapitre 4 : L'eau, sa purification et les micro-polluants par Marina Coquery et Samuel Martin Ruel	79

Partie 2

La nature pour inspirer la chimie

Chapitre 5 : La nature pour inspirer le chimiste : substances naturelles, phytochimie et chimie médicinale par Françoise Guéritte	101
Chapitre 6 : Matériaux inorganiques et hybrides bio-inspirés par Clément Sanchez	117
Chapitre 7 : À la frontière de la chimie et de la biologie : biocatalyse et catalyse bio-inspirée par Marc Fontecave	139

Partie 3 La chimie pour protéger la nature et ses ressources

Chapitre 8 : Phytoremédiation des sols contaminés : des plantes pour guérir les sols par Jean-Louis Morel	157
Chapitre 9 : De la chimie des écosystèmes et des cocktails... par Éric Blin	185
Chapitre 10 : Le dioxyde de carbone, la molécule-clé de la chimie du développement durable par Jacques Amouroux, Paul Siffert, Jean-Pierre Massué, Simeon Cavadias, Béatriz Trujillo, Koshi Hashimoto, Phillip Rutberg et Sergey Dresvin	209

Partie 4 La chimie pour mieux utiliser les ressources naturelles

Chapitre 11 : Recyclage des métaux : mimer les processus naturels par Bruno Goffé	233
Chapitre 12 : Valorisation biologique des agro-ressources par Pierre Monsan	253
Chapitre 13 : Chimie du végétal, fer de lance de la chimie durable D'après la conférence de Christophe Rupp-Dahlem	277
Crédits photographiques	295

Avant-propos

Ouvrage après ouvrage, la collection *L'Actualité Chimique – Livres* veut informer les lecteurs sur la place de la chimie dans les préoccupations, voire les problèmes, de notre société. Après avoir publié *La chimie et la mer*, *La chimie et la santé*, *La chimie et l'art*, *La chimie et l'alimentation*, *La chimie et le sport* et *La chimie et l'habitat*, elle est heureuse de présenter aujourd'hui *La chimie et la nature*. Ces volumes sont issus, sans en être des comptes-rendus *stricto sensu*, de journées scientifiques, qui sont les colloques « La chimie et... », organisés chaque fois par la Fondation de la Maison de la Chimie avec l'aide de la Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC), et qui réunissent un public abondant et varié, comprenant de nombreux étudiants. Ni réservés aux spécialistes, ni conçus pour un public dénué de toute formation scientifique, ces ouvrages s'adressent aux lecteurs « médiateurs », passeurs entre les questions de sociétés dont tous sont conscients et les travaux des chercheurs et ingénieurs actifs dans le domaine.

La thématique abordée dans « Chimie et nature » n'est pas sans renvoyer à des polémiques multiples pas toutes

démodées. Qu'on se rappelle la surprise créée par la synthèse de l'urée par Wöhler en 1828 : une molécule « du vivant » fabriquée en laboratoire ! Qu'on se rappelle les débats sur le « principe vital » à la base des réactions microbiennes et qui s'est réduit en « enzymes », molécules certes spécifiques mais molécules bel et bien. Aujourd'hui, qu'on observe ces oppositions – psychologiques ? publicitaires ? confuses en tout cas – entre molécules « de synthèse » et molécules « naturelles », les mêmes pour le chimiste !

Premier champ de préoccupations : conserver la nature dans un bon état de santé. Nécessité fait loi ! L'écologie, jeune science d'observation, en grandissant a identifié l'importance des mécanismes moléculaires et fait aujourd'hui le plus grand usage des concepts et des méthodes de la chimie. Les inconciliables se réconcilient : la chimie permet de comprendre les milieux naturels, l'activité des chimistes (industrie, agriculture) peut, c'est bien sûr vrai, leur causer des dommages, et de graves dommages ; elle sait aujourd'hui les reconnaître et les analyser. Mais pour le traitement des milieux dégradés, par quelque

cause que ce soit, les sciences chimiques possèdent ou savent développer des solutions.

Deuxième champ de préoccupation : l'épuisement des ressources. Le phénomène que nous vivons, dans la longue durée (les XX^e et XXI^e siècles) est celui de l'incroyable accroissement démographique de la planète. L'homme, comme tout être vivant, a toujours vécu des ressources naturelles ; mais aujourd'hui, on atteint un stade où celles-ci ne peuvent plus être considérées comme sans limites. Les surfaces agricoles vont-elles suffire pour nourrir l'humanité ? Les éléments métalliques dont nous avons de plus en plus besoin, du fait des progrès de notre civilisation technologique, vont-ils rester disponibles ? Et surtout, que faire, alors que le pétrole dont nous tirons une telle partie de l'énergie dont nous avons besoin est en train de disparaître à tout jamais, faisant par là même disparaître la matière première royale pour les matériaux polymères que nous utilisons de plus en plus ?

Il n'est guère surprenant que la chimie, science de la transformation de la matière, soit appelée au rôle de premier plan pour proposer des solutions à ces difficultés vitales. Plusieurs chapitres de *La chimie et la nature* montrent son rôle, déjà actuel mais aussi futur, sur ces questions : le recyclage des métaux qui peut nous fournir parfois autant que l'extraction minière, le traitement des sols pour éviter leur dépérissement, et l'utilisation de la matière végétale dont on apprend à exploiter la richesse chimique

afin d'en faire une matière première pour la chimie des polymères si sollicitée par le développement technique.

Le monde vivant est source inépuisable d'émerveillement pour le scientifique comme pour le citoyen curieux. C'est particulièrement vrai pour le chimiste qui sait en décrypter les secrets au niveau des mécanismes moléculaires et qui, comme de bien entendu, cherche à les capter, à les reproduire en laboratoire pour conquérir une partie de leur puissance. Cette démarche, pas nouvelle mais toujours en progrès, fournit de nouveaux médicaments si attendus par la médecine. Les médicaments, c'est encore le vivant, mais on voit les laboratoires s'inspirer du monde vivant pour d'autres objectifs et chercher à ouvrir des voies nouvelles pour répondre aux besoins fondamentaux de l'humanité. C'est la conception et la fabrication « bio-inspirée » de nouveaux matériaux aux propriétés subtiles, ou encore c'est la conquête – on pourrait dire le domptage – des mécanismes moléculaires de l'utilisation de l'énergie par les organismes vivants. L'ouvrage donne ainsi une ouverture vers ces perspectives d'avenir, rêves réalistes qui ne manqueront pas de signifier – enfin – une totale réconciliation entre chimie et nature.

Équipe éditoriale :

Minh-Thu Dinh-Audouin,
L'Actualité Chimique – Livres

Danièle Olivier,
Fondation de la Maison
de la Chimie

Paul Rigny,
L'Actualité Chimique – Livres

Préface

L'association des deux mots, chimie et nature, est une source d'interrogation sur leur relation et souvent de préoccupation sur leur compatibilité, non seulement pour le grand public, les médias, les relais d'opinions, les responsables politiques, mais aussi pour certains scientifiques non spécialistes de ces domaines !

De manière générale, ce sujet intéresse tous nos concitoyens, quel que soit leur âge, sachant combien il est important pour le présent et l'avenir de l'environnement, de l'économie et de l'emploi.

La Fondation de la Maison de la Chimie s'investit depuis de nombreuses années pour mieux faire connaître à tous les publics, et notamment aux jeunes, les apports actuels et espérés dans le futur des applications de la chimie dans tous les domaines d'activité de la vie quotidienne, avec l'objectif de répondre, avec honnêteté et avec toute la rigueur scientifique qui s'impose, à la soif de comprendre du public, en demeurant attentif à ses interrogations et à ses inquiétudes.

La série des colloques « Chimie et... » et la collection des livres accessibles à un large public qui en découlent sont depuis 2007 des outils importants de cette action.

C'est dans ce cadre que nous avons organisé sur le thème « Chimie et nature » le 7^e colloque de la série qui s'est tenu le 25 janvier 2012 à la Maison de la Chimie en collaboration avec la Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC) et d'où sont issus les chapitres de cet ouvrage réalisé en collaboration avec l'équipe éditoriale de *L'Actualité Chimique-Livres*.

Ce colloque a rassemblé plus de 950 participants d'origines très variées, dont un tiers de lycéens et leurs enseignants.

L'enregistrement vidéo de ce colloque est accessible librement sur le site http://actions.maisondelachimie.com/prochains_colloques.html

Nous souhaitons mettre ainsi à la disposition d'un large public, sous une forme accessible et attrayante, les mises au point et les échanges entre les scientifiques universitaires et industriels sur des questions d'ordre scientifique,

industriel ou sociétal du plus haut intérêt.

Dans ce colloque et dans cet ouvrage, quelques-uns des meilleurs experts scientifiques, universitaires et industriels des sciences de l'atmosphère, des sols, de l'eau et des substances naturelles, sont réunis avec des chimistes pour montrer ce que cette collaboration apporte à la compréhension des réactions chimiques impliquées, des molécules et des éléments qui régissent l'évolution du milieu naturel, non seulement pour en préserver la beauté et la diversité, mais également pour savoir en exploiter intelligemment les richesses dans le présent et dans l'avenir, et mieux identifier ce que la nature inspire à la chimie qui se veut au service de l'homme.

Les océans occupent 70 % de la surface de notre planète. Comprendre la nature, c'est pour partie, comme nous l'avons vu dans l'ouvrage de cette collection intitulé *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, comprendre la mer, ses courants profonds planétaires et séculaires qui jouent un rôle clé dans nos prévisions sur le changement climatique. C'est aussi expliquer l'ensemble des facteurs déterminant la formation et le devenir des polluants atmosphériques, et les conséquences de cette dissémination dans notre atmosphère et sur le climat.

Les sols sont une ressource non renouvelable à l'infini qui fournit des services essentiels pour la production de la biomasse et des aliments,

ainsi que pour la filtration et l'épuration des eaux. Le sol apparaît comme un réacteur chimique complexe dont les propriétés sont exceptionnelles dans le fonctionnement de la biosphère et pour lequel la compréhension des interactions entre les plantes, les micro-organismes et la matière organique débouchera sans doute sur une ingénierie agro-écologique. Mais les sols sont aussi soumis à des contaminations ponctuelles ou diffuses, à des dégradations physico-chimiques dont il faut comprendre les mécanismes et prévoir les conséquences pour pouvoir les limiter ou les éviter.

La chimie est donc un outil pour comprendre la nature, et cela commence par la compréhension des réactions chimiques qui au sein d'une cellule vivante transforment les nutriments extérieurs en molécules utilisables par une plante ou un organisme doué de mobilité.

En retour, la nature offre au chimiste des modèles performants pour créer de nouvelles molécules actives ou des matériaux mieux adaptés aux besoins de l'homme. Le milieu naturel est riche d'une large palette de processus physico-chimiques de remobilisation de la matière, et il peut être une source d'inspiration féconde dans le cadre de la nécessaire économie des ressources comme nous le verrons dans cet ouvrage avec le développement de procédés de recyclage de métaux avec des produits peu agressifs, à basse température et peu consommateurs d'énergie.

Une nouvelle chimie se développe qui utilise la nature comme un réservoir unique de molécules aux structures diverses, aux propriétés biologiques variées, aux applications potentielles multiples. Plus de 50 % des médicaments proviennent directement du milieu naturel : plantes, micro-organismes, organismes marins, insectes. D'autres sont obtenus par modification de substances naturelles.

Nous verrons qu'une métallurgie verte, encore limitée au cadmium, nickel, arsenic et zinc, se développe et peut constituer un complément intéressant pour les agriculteurs des terrains pauvres, et que l'absorption des métaux par les plantes (la phyto-extraction) fournit un nouveau rôle à l'agriculture, celui de dépolluer les sols et de récupérer les ressources métalliques qu'ils contiennent.

D'un autre côté, le CO₂ tellement craint pour son effet sur le réchauffement climatique pourrait devenir la matière première d'une véritable révolution industrielle grâce à son recyclage.

Enfin la chimie du végétal, avec le développement de la biotechnologie industrielle basée sur les procédés de fermentation et de catalyse, ainsi que les progrès en ingénierie métabolique, transforme les produits de l'agro-industrie (notamment glucose et acides gras) en monomères et polymères de base pour la chimie.

Si par méconnaissance des effets néfastes des doses trop fortes relâchées dans la nature, et avec le développe-

ment parfois mal maîtrisé du monde industriel, la chimie a effectivement contribué à polluer dans les années passées, il n'y a pas aujourd'hui d'écologie sans chimie. Non seulement, les règlements européens (REACH, 2007) imposent aux industriels des normes nouvelles pour produire des produits recyclables, utiliser des procédés propres et des matériaux plus respectueux de l'environnement et des cycles de vie, mais à l'échelle du globe, il faut « nettoyer » les sols et les eaux contaminés par les polluants organiques et inorganiques issus des activités agricoles, industrielles et urbaines mal maîtrisées. Et il est beaucoup plus difficile de nettoyer des sols que de l'eau et de l'air ! La chimie est indispensable pour dépolluer et réhabiliter après les dégâts de l'activité humaine. Elle intervient à tous les niveaux, non seulement dans la réduction des rejets industriels, mais aussi dans l'amélioration des performances des stations d'épuration et dans la surveillance du milieu. 100 000 molécules fabriquées par l'homme sont homologuées en Europe comme susceptibles de contribuer à la pollution, et 200 à 300 nouvelles molécules sont découvertes chaque année. Il faut donc développer les techniques analytiques pour étudier l'impact de ces nombreuses molécules résiduelles qui diffusent dans l'environnement et dont les effets synergiques sur le vivant sont souvent méconnus dans le long terme. La nature, elle-même, est source

d'inspiration à cet égard à partir de la connaissance du fonctionnement biochimique des écosystèmes.

Sur mer comme sur terre, nos comportements sont bien souvent irresponsables en matière d'environnement, la plupart du temps par ignorance de l'interaction chimie/nature. Dans bien des cas, la chimie est et sera le meilleur moyen pour aider la nature à une auto-réparation au moins partielle par l'utilisation de techniques chimiques ou biochimiques avancées pour réduire la pollution. C'est ce que nous avons voulu essayer de vous montrer à travers cet ouvrage dont les chapitres sont regroupés au-

tour des trois thèmes que je viens d'évoquer :

- la chimie pour comprendre la nature et savoir s'en inspirer ;
- la chimie pour mieux utiliser la nature et ses ressources ;
- la chimie pour protéger durablement la nature et ses ressources.

Je vous en souhaite une agréable lecture.

Bernard Bigot
Président de la Fondation
internationale de
La Maison de la Chimie

Introduction

Entrons dans le cœur du sujet « chimie et nature ». On parle de « chimie et nature », « chimie artificielle », « nature », « naturel »... Mais comment ose-t-on faire cette représentation et comparer ainsi la chimie à la nature, surtout si l'on se souvient des relations que l'homme a pu entretenir avec celle-ci, relations qui ont pu être teintées de domination ? On lit dans la Genèse : « *Dominez la terre, soumettez la nature* » ; Descartes déclarait de son côté qu'il faut « *connaître la nature pour la dominer...* » Mais, fort heureusement, après l'ère industrielle du XIX^e siècle, est arrivée une « ère écologique » dans laquelle cette domination a laissé la place au respect.

Nature ou environnement ?

Il nous faut, en premier lieu, réfléchir aux termes couramment employés dans ce contexte. Quand on évoque la nature, pensons-nous bien nature ou environnement ? Et quand on évoque environnement, de nouveau, pensons-nous nature ou environnement ? (**Figure 1**). La différence est cependant sen-

sible : on dit par exemple « *il faut respecter la nature* », alors que l'on dit seulement « *il faut préserver l'environnement* » (**Figure 2**).

Examinons les significations de ces deux termes. Le terme nature provient du latin *naturia*, signifiant l'origine, c'est-à-dire tout ce qui est de l'univers, tout ce qui existe indépendamment de l'homme et de ses interventions. L'environnement indique tout ce qui entoure l'homme, y compris ses activités. Ce sont donc les activités de l'homme vis-à-vis de la nature qui vont différencier la nature et l'environnement. On pourrait donc parler de l'un et de l'autre indépendamment, comme ce sera le cas dans les chapitres qui vont suivre.

Quelles peuvent être nos visions de la nature et de l'environnement ? Si la nature a pu être idéalisée, voire représentée comme un « miroir de Dieu », petit à petit l'environnement a pris sa place dans la pratique alors que la nature est restée principalement un terme de contemplation.

Mais rappelons que selon Edgar Morin, si l'écologie est certes une science,



Figure 1

Nature ou environnement, deux termes pouvant être utilisés indépendamment ou dans un sens commun.



Figure 2

*« Protéger la nature » ou
« préserver l'environnement »...*



Figure 3

La nature, vue comme une combinaison des quatre éléments feu, air, eau et terre.

c'est surtout une éthique bio-humaniste et peut être une esthétique rassemblant par cela même les langages communs ou non à la nature et à l'environnement. C'est aussi ce qui est réalisé dans cet ouvrage, qui aborde à la fois la nature et l'environnement.

Les quatre éléments de la nature

Les thématiques qui seront abordées dans les premiers chapitres concerneront les éléments qui, selon le philosophe grec Empédocle au V^e siècle av. J.-C., constitueraient tout l'univers : l'air, la terre, l'eau et le feu (ce dernier thème ne sera pas abordé) (Figure 3).

Au sujet de l'air (Chapitres d'É. Villenave et de J.-L. Mo-

rel), nous sommes préoccupés par l'évolution des gaz à effet de serre, en particulier du CO₂, associés au développement industriel, aux transports et à l'habitat. Mais les pollutions d'origine volcanique, caractérisées par des émissions considérables de gaz et particules, sont également responsables d'une part non négligeable de ces nuisances : rappelons l'éruption du volcan Pinatubo aux Philippines qui s'est étendue jusqu'à vingt kilomètres d'altitude détruisant environ 80 % de la couche d'ozone (Figure 4). Citons aussi les pluies acides, dont les dégâts sont maintenant très limités car les chimistes sont capables d'enlever le soufre dans les combustibles du type charbon ou pétrole, évitant



Figure 4

Les pollutions atmosphériques, d'origine naturelle ou anthropique, sont une préoccupation majeure sur laquelle se penchent notamment les chimistes.



Figure 5

Quand la pollution touche les océans et côtoie les animaux. Il est de la responsabilité du citoyen, en particulier du chimiste, d'empêcher cette situation et d'y remédier.

ainsi que des gaz, comme le dioxyde de soufre, viennent perturber l'environnement et attaquer les arbres et les pierres fragiles.

L'eau est un autre élément majeur de l'univers dont nous connaissons malheureusement de fortes pollutions, comme le montrent des images aujourd'hui bien connues d'animaux côtoyant des déchets plastiques (Figure 5). On peut y voir certes une responsabilité du chimiste, qui travaille sur des plastiques à l'usage du consommateur afin de les rendre résistants, ce qui conduit à leur accumulation, mais il y a aussi la

responsabilité des citoyens, qui doivent veiller à ne jeter ces déchets qu'aux endroits appropriés. On sait que l'Océan Pacifique et l'Océan Atlantique sont sensibles à des vortex qui provoquent l'accumulation de kilomètres carré de plastiques. Face à ces problèmes, les chimistes essayent de trouver des polymères qui soient biocompatibles et facilement décomposables. Une autre contribution majeure des chimistes concerne la dépollution de l'eau qui nous permet de rendre potables des ressources aqueuses souillées (Figure 6), comme cela sera abordé dans les



Chapitres de M. Coquery/S. Martin Ruel et É. Blin.

Le thème de la **terre** (**Figure 7**) est également abordé, autant sous des aspects positifs que négatifs : si l'homme apporte des richesses au sol pour le développement de cultures, il y apporte aussi régulièrement des déchets. Les **Chapitres de J.-F. Soussana et J.-L. Morel** abordent ce problème majeur de la pollution des sols et la manière dont les chimistes peuvent y remédier.

Les richesses de la nature : biodiversité et processus naturels

La richesse de la nature se caractérise aussi par sa **bio-diversité** (**Figure 8**), qui nous donne l'accès à une multitude de molécules pouvant être ex-

plorées pour des propriétés utiles à l'homme, dont on peut citer principalement les vertus thérapeutiques, comme cela est décrit dans le **Chapitre de F. Guéritte**, vertus que l'homme a exploitées pendant des millénaires (**Figure 9**).

La biodiversité est aussi fragile et doit être protégée. En témoigne l'histoire très emblématique d'une étude réalisée en 1974 par le docteur John Daly, chercheur du National Institute of Health aux États-Unis, sur une grenouille minuscule, vivant en Amérique latine, dont il a pu extraire un produit présentant une activité semblable à celle de la morphine mais sans les inconvénients de celle-ci. Lorsque le Dr. Daly est retourné sur les lieux où avaient été trouvées ces grenouilles dans l'espoir d'en ramener davantage afin



Figure 6

Les progrès de la chimie nous permettent d'obtenir de l'eau potable.

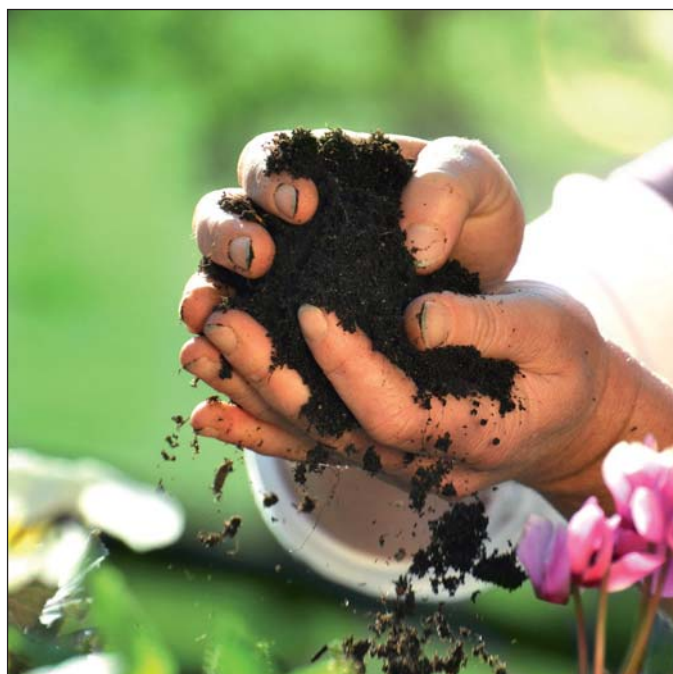


Figure 7

Comment enrichir les sols et les protéger ? Quelles sont les pistes des chimistes ?

cluster biosynthesis: organometallic chemistry nature's way, *Dalton Trans.*, **22** : 4274-4285.

Fig. 17 : Le Goff A., Artero V., Jusselme B., Dinh Tran P., Nicolas Guillet, Métayé R., Fihri A., S. Palacin, Fontecave M. (2009). From Hydrogenases to Noble Metal-Free Catalytic Nanomaterials for H₂ Production and Uptake, *Science*, **326** : 1384-1387.

CHAPITRE 8

Fig. 2 : source : FAO, 1998.

Fig. 3 : source : Agence Européenne de l'Environnement.

Fig. 5 : laboratoire Sols et Environnement de l'Université de Lorraine et de l'INRA : A) photo : J.-L. Morel ; B) photo : C. Schwartz.

Figs. 6, 8B, 8C, 14, 17A, 17D et 26 : photos : J.-L. Morel.

Fig. 14 : d'après Zayed et Terry, 1992.

Fig. 17B : IRD, Jérôme Munzinger.

Fig. 17C : photo : C. Schwartz.

Fig. 18 : d'après Chardot *et coll.*, 2005.

Fig. 19 : source : Schwartz C., Morel J.-L., Saumier S., Whiting S.N., Baker A.J.M. (1999). Root development of the Zn-hyperaccumulator plant *Thlaspi caerulescens* as affected by metal origin, content and localization in soil, *Plant and Soil*, **208** : 103-115.

Fig. 20 : source : Blossfeld S., Perriguet J., Sterckeman T., Morel J.-L., Löscher R., (2010). Rhizosphere pH dynamics in trace-metal-contaminated soils, monitored with planar pH optodes, *Plant & Soil*, **330** : 173-184.

Fig. 21 : photos : G. Echevarria.

Fig. 22 : source : Montargès-Pelletier E., Eschevarria G., Michot L., Bauer A., Morel J.-L. (2008). Identification of nickel chelators in three hyperaccumulating plants: an X-ray spectro-

scopic study, *Phytochemistry*, **69** : 1695-709.

Fig. 28 : photo : G. Echevarria.

Fig. 29 : d'après Bani *et coll.*, 2007.

Fig. 30 : A) Barbaroux, 2010 ; B) Mercier, Smonnot, Barbaroux *et coll.*, Brevet 2011.

CHAPITRE 9

Fig. 1 : d'après C. Lévêque, *Écosystèmes aquatiques*, Hachette, 1996. Adapté par É. Blin.

Fig. 2 : www.ademe.fr

Fig. 3 : US EPA Great Lakes National Program Office.

Fig. 8 : Landes *et coll.* 2010.

CHAPITRE 10

Fig. 1 : C&EN chemical Engineering News 24, July 26, 2010.

Fig. 5 : source : ACS, 6 oct. 2009.

Fig. 6 : source : EMRS Fall Meeting, Varsovie, 13-15 sept 2010, European Parliament STOA 22/3/2011, EMRS/UPMC.

Fig. 7 : source : European Parliament STOA 22 /3/2011, J. Amouroux EMRS/UPMC.

Fig. 9 : source : Chemical Engineering, dec. 2003, p. 7. Power span Conf. Portsmouth, NH, USA.

Fig. 10 : source : EMRS Fall Meeting, Varsovie 13-15 sept. 2010, J. Amouroux, Symposium A.

Fig. 11 : source : Max Planck Institute, Magdebourg/BMBF/Siemens seminar: CO₂ utilization potential 22/09/2009/EMRS, sept. 2010, Varsovie.

Fig. 12 : Martin E. Carrera Manager Biotechnology BP, EMRS Paris 5/02/2008.

Fig. 14 : source : Gerald Ondrey, Chemical Engineering, Janvier 2009, p.13.

Fig. 18 : Brevet : D. Hildebrandt, D. Glasser, B. Hausberger, International Patent application WO/2007/122498, schéma d'après : *Science*, 2009, **323** : 1680.

Fig. 20 : conférence du Professeur Xianhong Wang EMRS/STOA, 22 mars 2011.

Fig. 21 : Laboratory of polymer ecomaterial, CAS /STOA 22/03/2011, Changchun Inst. Applied Chemistry, CAS.

CHAPITRE 11

Fig. 1 : d'après un document de Rio Tinto.

Fig. 2 : cité d'après Patrice Christmann (BRGM) et dessiné d'après van der Wath, Bateman Beijing Axis, "China and Africa: A Global Natural Resources Alliance?"

Fig. 3 : Christian Hocquard (BRGM).

Fig. 4 : d'après le document de prospective de l'U.S. Department of energy (DOE), Critical Materials Strategy, déc. 2010.

Fig. 5 : d'après Patrice Christmann (BRGM), construit à partir des données de Weber *et coll.* (2012). World Mining data.

Fig. 6 : d'après un document d'A. Rollat (Rhodia).

Fig. 7 : d'après Patrice Christmann (BRGM), issu d'une conférence de H. Sverdrup.

Fig. 8 : d'après Patrice Christmann (BRGM).

Fig. 9 : Licence : CC-BY-SA-3.0, Doc Carbur.

Fig. 11 : fumeurs : photo Yves-Fouquet, Ifremer ; nodules polymétalliques : Ifremer.

Fig. 12 : d'après Michel Cathelineau, G2R, CNRS Université de Lorraine.

Fig. 13 : schéma d'après Gleb Potrosky (GET, CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse).

Fig. 14 : images de Marie-Christine Boiron (G2R, CNRS, Université de Lorraine).

Figs. 15, 16 et 18 : images de B. Goffé.

Fig. 17 : image de C. Monnin (Géosciences Environnement Toulouse).

Fig. 19 : photo Yves-Fouquet, Ifremer.

Fig. 20 : image d'Olivier Vidal (CNRS-Université Joseph Fourier, Grenoble).

CHAPITRE 12

Fig. 5 : d'après P. Soucaille, LISBP, INSA Toulouse.

Fig. 9 : d'après Science, août 2009.

Fig. 10 : d'après J.-C. Portais, LISBP, INSA Toulouse.

Fig. 11 : d'après C. Jouve, LISBP, INSA Toulouse.

Fig. 12 : d'après M. Remaud-Siméon, LISBP, INSA Toulouse.

Figs. 14 et 15 : d'après G. Véronèse, LISBP, INRA.

Fig. 15 : référence : Tasse L., Bercovici J., Pizzut-Serin S., Robe P., Tap J., Klopp C., Cantarel B.L., Coutinho P.M., Henrissat B., Leclerc M., Doré J., Monsan P., Remaud-Siméon M., Potocki-Véronèse G. (2010). Functional metagenomics to mine the human gut microbiome for dietary fiber catabolic enzymes, *Genome Res.*, **20** : 1605-1612.

Figs. 16 et 17 : d'après I. André, LISBP, CNRS.

Fig. 17 : reprinted with permission from Champion E., André I., Moulis C., Boutet J., Descroix K., Morel S., Monsan P., Mulard L., Remaud-Siméon M. (2009). Design of α -transglucosidases of controlled specificities for programmed chemo-enzymatic synthesis of antigenic oligosaccharides, *J. Am. Chem. Soc.*, **131** : 7379-7389. Copyright 2012 American Chemical Society.

Fig. 19 : d'après A. Marty, LISBP, INSA Toulouse.

CHAPITRE 13

Fig. 1A : cliché ministère de la Culture et de la Communication, Direction régionale des affaires culturelles de Rhône-Alpes, Service régional de l'archéologie.

Fig. 7 : d'après le Cefic Chemdata International.

Figs. 11 et 16 : ROQUETTE Frères S.A. - Tous droits réservés, Pour tous pays.